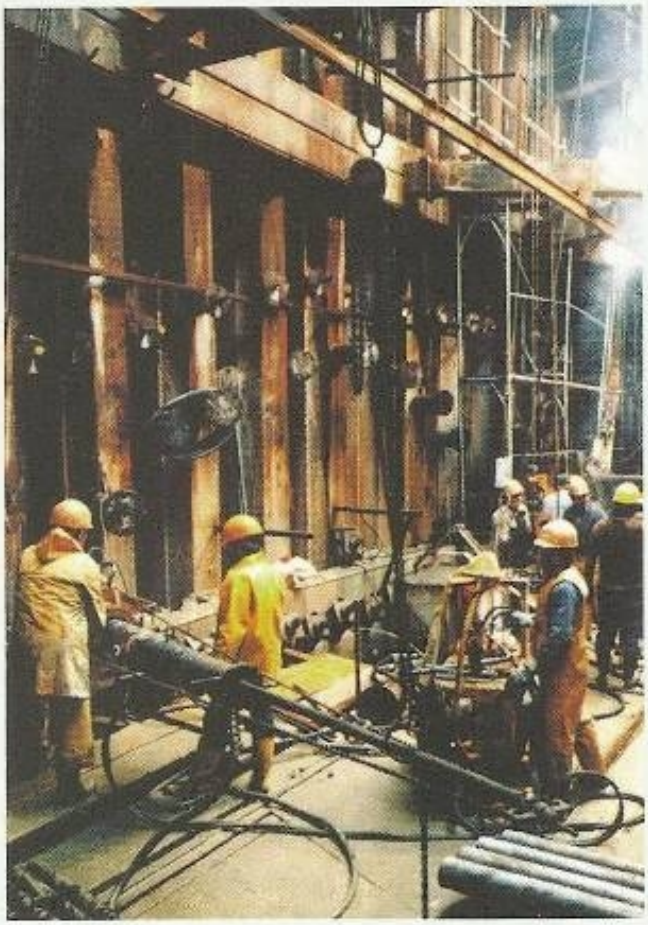
Claudio Zaror Zaror

# Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos



I.S.B.N. 956-227-252-4

**Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos**

Este texto comprende un conjunto de tópicos directamente relacionados con la práctica moderna de la ingeniería ambiental, cuyo objetivo fundamental es controlar y reducir el impacto ambiental de la actividad humana a través del diseño y la aplicación de medidas tecnológicas y de gestión. En este contexto se presenta, en primer lugar, una breve descripción de los componentes del medio físico, los contaminantes generados por la acción humana, sus impactos y sus principales fuentes. En seguida, se introducen los diferentes sistemas de tratamiento de residuos y los principios de diseño de procesos limpios, con un enfoque cualitativo accesible a quienes no tienen una formación ingenieril. Ello se complementa con la presentación de diferentes herramientas de gestión ambiental, incluyendo la evaluación de impacto ambiental, sistemas de gestión ambiental, auditorías, indicadores de desempeño ambiental, análisis de ciclo de vida y análisis de riesgos.

Esta obra está destinada a un amplio espectro de lectores, entre los cuales se contemplan estudiantes universitarios, ingenieros y otros profesionales involucrados en la actividad productiva en el ámbito público o privado. Por tal motivo, el enfoque es introductorio y descriptivo, entregando referencias más especializadas para quienes deseen profundizar tales conceptos.

EDITORIAL UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
SERIE MONOGRAFIAS

Serie MONOGRAFIAS

Dirigida por Mario Rodríguez Fernández

INTRODUCCION A LA INGENIERIA
AMBIENTAL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS

©Claudio Alfredo Zaror Zaror
©Editorial Universidad de Concepción

Reg. Propiedad Intelectual Nº 107.396

I.S.B.N. 956-227-252-4

Segunda edición, febrero 2002
Reimpresión, marzo 2005

DIRECCION DE EXTENSION
EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
Biblioteca Central, Of. 11, Campus Universitario
Fono (56-41)204590 - Fax (56-41)228262
Casilla 160-C, Correo 3
Concepción - Chile
E-mail: lgaravil@udec.cl

Diseño y edición de Oscar Lermanda

Corrección de pruebas
Gabriel Obreque M.
José Uribe M.

Impreso en
Trama Impresores S.A.
Hualpén, Chile

IMPRESO EN CHILE / *PRINTED IN CHILE*

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**


# “INTRODUCCION A LA INGENIERIA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS”


**DR. CLAUDIO ALFREDO ZAROR ZAROR**
**PROFESOR TITULAR**
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**


**Concepción – Chile**

## ÍNDICE


| | Página |
|---|---|
| **CAPÍTULO 1) INTRODUCCIÓN.....** | **1-1** |
| 1.1) OBJETIVO..... | 1-1 |
| 1.2) EL PROBLEMA..... | 1-3 |
| 1.3) DESARROLLO SUSTENTABLE | 1-6 |
| 1.4) NUEVOS CONCEPTOS EN CONTROL AMBIENTAL..... | 1-9 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 1-10 |
| **CAPÍTULO 2) EL ENTORNO NATURAL.....** | **2-1** |
| 2.1) LA TIERRA..... | 2-1 |
| 2.2) LA VIDA..... | 2-6 |
| 2.3) LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS..... | 2-8 |
| 2.4) EQUILIBRIOS EN UN ECOSISTEMA..... | 2-13 |
| 2.5) LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS..... | 2-17 |
| 2.5.1) Ciclo Hídrico..... | 2-18 |
| 2.5.2) Ciclo del Oxígeno..... | 2-19 |
| 2.5.3) Ciclo del Carbono..... | 2-20 |
| 2.5.4) Ciclo del Nitrógeno..... | 2-22 |
| 2.5.5) Ciclo del Fósforo..... | 2-25 |
| 2.5.6) Ciclo del Azufre..... | 2-26 |
| 2.6) NUEVOS CONCEPTOS SOBRE LOS PROCESOS GEOQUÍMICOS: LA HIPÓTESIS DE GAIA..... | 2-27 |
| 2.7) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROBIOLOGÍA..... | 2-32 |
| 2.7.1) Tipos de Microorganismos..... | 2-32 |
| 2.7.2) La Química de la Vida..... | 2-41 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 2-52 |
| **CAPÍTULO 3) LOS CONTAMINANTES Y EL AMBIENTE.....** | **3-1** |
| 3.1) CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA..... | 3-2 |
| 3.1.1) Contaminantes Atmosféricos..... | 3-2 |
| 3.1.2) Cambios Atmosféricos Globales..... | 3-13 |
| 3.1.3) Transporte y Destino de los Contaminantes Atmosféricos. | 3-19 |
| 3.1.4) Modelos de dispersión atmosférica..... | 3-20 |
| 3.2) CONTAMINACIÓN DEL AGUA..... | 3-31 |
| 3.2.1) Contaminantes Líquidos..... | 3-32 |
| 3.2.2) Capacidad de Autodepuración del Medio Hídrico..... | 3-36 |
| 3.2.3) Modelos de Calidad de Agua..... | 3-42 |
| 3.3) CONTAMINACIÓN DEL SUELO..... | 3-47 |
| 3.3.1) Principales Características del Suelo..... | 3-47 |
| 3.3.2) Contaminación de Suelos..... | 3-52 |

3.3.3) Transporte de los Contaminantes en el suelo..... 3-53
3.4) TOXICIDAD..... 3-55
3.4.1) Absorción y Distribución en el cuerpo..... 3-57
3.4.2) Clasificación de las Respuestas Tóxicas..... 3-59
3.4.3) Modelos Dosis-Respuesta..... 3-62
BIBLIOGRAFÍA..... 3-67

**CAPÍTULO 4) ACTIVIDADES GENERADORAS DE RESIDUOS..... 4-1**

4.1) UN POCO DE HISTORIA..... 4-1
4.2) REQUERIMIENTOS MATERIALES Y ENERGÉTICOS..... 4-7
4.2.1) Materias Primas Básicas..... 4-7
4.2.2) Requerimientos Energéticos..... 4-8
4.3) FUENTES Y TIPOS DE RESIDUOS..... 4-11
4.3.1) Residuos Sólidos..... 4-11
4.3.2) Residuos Líquidos..... 4-13
4.3.3) Residuos Gaseosos..... 4-15
4.4) TIPOS DE PROCESOS Y TECNOLOGÍAS..... 4-16
4.4.1) Operaciones Unitarias Típicas de la Industria de Procesos.... 4-16
4.5) ACTIVIDADES INDUSTRIALES..... 4-19
4.5.1) Industria de Alimentos..... 4-19
4.5.2) Industria de Productos Forestales..... 4-32
4.5.3) Refinación de Petróleo..... 4-36
4.5.4) La Industria del Cobre..... 4-39
BIBLIOGRAFÍA..... 4-43

**CAPÍTULO 5) TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....** 5-1

5.1) MECANISMOS PRESENTES EN LOS TRATAMIENTOS DE RESIDUOS..... 5-1
5.2) TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS..... 5-7
5.2.1) Tratamiento Primario..... 5-14
5.2.2) Tratamiento Secundario..... 5-39
5.2.3) Tratamiento Terciario..... 5-39
5.3) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS..... 5-41
5.3.1) Confinamiento de Residuos Sólidos Industriales..... 5-41
5.3.2) Tratamiento de Residuos Biodegradables..... 5-42
5.3.3) Tratamiento Térmico de Residuos Sólidos..... 5-43
5.3.4) Tratamiento Físico-Químico de Residuos Peligrosos..... 5-46
5.3.5) Estabilización y Solidificación de Residuos Peligrosos..... 5-47
5.4) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS GASEOSOS..... 5-48
5.4.1) Sistemas para Remoción de Material Particulado..... 5-49
5.4.2) Sistemas para la Remoción de Compuestos Gaseosos..... 5-55
5.4.3) Descarga de los Gases Residuales a la Atmósfera..... 5-59
BIBLIOGRAFÍA..... 5-60

**CAPÍTULO 6) PRINCIPIOS DE DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS..... 6-1**

6.1) EL CONCEPTO DE PROCESOS LIMPIOS..... 6-1
6.2) DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS..... 6-4
6.3) LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO..... 6-5
6.3.1) Producción Limpia en Procesos Existentes..... 6-7
6.4) ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE RESIDUOS INDUSTRIALES..... 6-11
6.4.1) Reducción de Residuos..... 6-11
6.4.2) Medidas Prácticas para la Reducción de los Residuos..... 6-14
6.4.3) Segregación de Residuos..... 6-17
6.5) MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE AGUA..... 6-23
6.6) CONSIDERACIONES ECONÓMICAS..... 6-32
BIBLIOGRAFÍA..... 6-35

**CAPÍTULO 7) EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL..... 7-1**

7.1) LA EIA Y EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS..... 7-2
7.2) METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL..... 7-6
7.2.1) Identificación de los Aspectos Ambientales del Proyecto..... 7-6
7.2.2) Factores Ambientales..... 7-8
7.2.3) Identificación de los Factores Ambientales Afectados..... 7-13
7.2.4) Valoración de los Impactos Ambientales..... 7-14
7.2.5) Medidas de Mitigación..... 7-23
7.3) EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO REQUISITO LEGAL..... 7-24
7.3.1) Proyectos o Actividades que deben someterse al SEIA..... 7-24
7.3.2) Causales para la Elaboración de un EIA..... 7-28
7.3.3) Contenidos de los Estudios de Impacto Ambiental..... 7-32
7.3.4) Otras Consideraciones Legales..... 7-36
BIBLIOGRAFÍA..... 7-38

**CAPÍTULO 8) SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL..... 8-1**

8.1) INTRODUCCIÓN..... 8-1
8.2) DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL..... 8-10
8.2.1) Definiciones..... 8-10
8.2.2) Principios y Elementos del Sistema de Gestión Ambiental... 8-11
8.2.3) Compromiso y Política..... 8-13
8.2.4) Planificación..... 8-16
8.2.5) Implementación..... 8-23
8.2.6) Medición y Evaluación..... 8-31
8.2.7) Revisión y Mejoramiento..... 8-33
8.2.8) Mejoramiento Continuo..... 8-34
8.3) EVALUACION DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL ..... 8-35
8.3.1) Planificación ..... 8-35
8.3.2) Implementación..... 8-35

8.3.3) Revisión y Mejoramiento..... 8-37
8.3.4) Indicadores de Desempeño Ambiental..... 8-37
8.4) SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL..... 8-44
BIBLIOGRAFÍA..... 8-47

**CAPÍTULO 9) INTRODUCCIÓN A LA AUDITORÍA AMBIENTAL..... 9-1**

9.1) INTRODUCCIÓN..... 9-1
9.2) TIPOS DE AUDITORÍAS AMBIENTALES..... 9-1
9.3) CONTENIDOS DE UNA AUDITORÍA AMBIENTAL..... 9-4
9.4) METODOLOGÍA DE AUDITORÍA AMBIENTAL..... 9-6
9.4.1) Actividades Previas: Planificación de la Auditoría..... 9-7
9.4.2) Actividades en Terreno..... 9-10
9.4.3) Actividades Finales: Informe Final y Plan de Seguimiento 9-12
9.5) AUDITORIA DE RESIDUOS..... 9-13
9.6) UN EJEMPLO DE AUDITORIA..... 9-16
9.7) LISTAS DE VERIFICACION PARA AUDITORIAS PRELIMINARES... 9-22
BIBLIOGRAFÍA..... 9-29

**CAPITULO 10) ANALISIS DEL CICLO DE VIDA..... 10-1**

10.1) INTRODUCCION..... 10-1
10.2) METODOLOGIA DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA..... 10-7
10.3) DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCES..... 10-7
10.4) ANALISIS DE INVENTARIO..... 10-8
10.5) EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA..... 10-12
10.5.1) Clasificación..... 10-13
10.5.2) Caracterización..... 10-14
10.6) VALORACION..... 10-20
10.7) UN EJEMPLO: ANALISIS DE INVENTARIO DE LA PRODUCCION DE CELULOSA KRAFT BLANCA..... 10-20
BIBLIOGRAFIA..... 10-27

**CAPITULO 11) PRINCIPIOS DE ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS..... 11-1**

11.1) INTRODUCCIÓN..... 11-1
11.2) ANÁLISIS DE RIESGOS COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO Y GESTIÓN..... 11-5
11.3) TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS..... 11-11
11.3.1) Métodos Comparativos para la Identificación de Peligros. 11-16
11.3.2) Análisis de Peligro y Operatividad (Hazop)..... 11-17
11.3.3) Análisis ¿Qué Sucedería Sí?..... 11-23
11.3.4) Análisis de Modalidades de Fallas y sus Efectos..... 11-24
11.3.5) Análisis Arbol de Fallas..... 11-27
11.3.6) Análisis del Arbol de Sucesos..... 11-31
11.3.7) Índices de Riesgo: Índice Dow de Fuego y Explosión..... 11-34
11.4) ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS..... 11-37

11.4.1) Análisis Preliminar de Consecuencias..... 11-37
11.4.2) Análisis de Consecuencias: Casos Específicos..... 11-40
11.4.3) Vulnerabilidad de Personas e Instalaciones..... 11-47
11.5) PROBABILIDAD DE OCURRENCIA..... 11-53
11.5.1) Utilización del Análisis de Arbol de Fallas..... 11-56
11.5.2) Errores Humanos..... 11-57
11.6) LISTAS DE COMPROBACION PARA IDENTIFICACION DE PELIGROS..... 11-60
11.7) EJEMPLO DE CATEGORIZACION DE RIESGOS Y MEDIDAS DE PREVENCION EN UNA PLANTA DE CELULOS KRAFT..... 11-66
GLOSARIO..... 11-76
BIBLIOGRAFÍA..... 11-77

PALABRAS FINALES

## PREFACIO

La semilla de este texto surgió en 1991, cuando la Asociación de Técnicos en Celulosa y Papel (ATCP-Chile) me invitó a dictar un curso básico sobre control ambiental, destinado a los profesionales de la industria celulósica. Desde entonces, los focos de atención han ido cambiando, en la medida que el país adquiere mayoría de edad en su lucha por preservar su privilegiado entorno natural y lograr un efectivo desarrollo económico-social sustentable. En ese contexto, los desafíos que enfrenta el ingeniero de hoy van más allá de los puramente tecnológicos, obligándolo a mantener un proceso de educación continua.

Esta publicación intenta apoyar tales esfuerzos y resume algunos de los principales temas relevantes para las aplicaciones de ingeniería ambiental en la industria de procesos.

Está dedicada a todos mis estudiantes, colegas y amigos, que me han impulsado a expresar en palabras escritas, horas y horas de clases, charlas, seminarios, ponencias y discusiones sobre diferentes tópicos ambientales, de interés para los ingenieros. Está dedicada a quienes desean tener un devenir profesional que se ajuste a uno de los principios éticos de nuestra carrera: la obligación moral de cuidar el entorno y preservar los recursos naturales, ya que no sólo pertenecen a quienes hoy los disfrutan, sino que también son propiedad de todas las generaciones futuras.

Agradezco a quienes me han brindado su apoyo para hacer esta modesta contribución al proceso educacional de los ingenieros. A mis estudiantes memoristas de la carrera de Ingeniería Civil Química, por sus aportes en áreas temáticas nuevas. A mis colegas de la industria y de los servicios públicos, cuyas interrogantes me han obligado a seguir estudiando e investigando. Al Dr. Oscar Parra y a sus colaboradores del Centro EULA, con quienes he compartido discusiones, seminarios, auditorías y estudios de impacto ambiental, que han enriquecido mi percepción de los problemas ambientales. A los Profesores Roberto Melo, José Paz, Astoldo Solís (QEPD) y al resto de mis colegas y amigos del Laboratorio de Productos Forestales, quienes me cobijaron bajo su alero cuando crucé el océano en mi retorno a casa. A Lisette y Ricardo por sus sugerencias, correcciones y diagramaciones, que han permitido darle legibilidad al mosaico caótico de tópicos de las versiones originales.

Finalmente, mis agradecimientos a Patty, por su amor y amistad incondicional, su permanente motivación, y su apoyo profesional, que me han permitido concluir esta tarea.

Prof. Claudio A. Zaror Z.
Concepción, Diciembre de 2000

*Dedicado a mis hijos,*

*Claudio Rodrigo y Sebastián Andrés*

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

## 1.1) OBJETIVO

La actividad productiva es uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico. Sin embargo, los residuos generados y el excesivo consumo de recursos naturales, pueden constituirse en agentes de deterioro del medio ambiente, restando sustentabilidad al crecimiento económico. Como consecuencia de ello, la dimensión ambiental ha adquirido mayor importancia en el diseño de procesos, en la toma de decisiones de inversión y en la gestión productiva.

En Chile, la industria se desenvuelve en un marco legal ambiental que se acerca cada vez más al de los países de mayor desarrollo económico. La Ley 19.300 (Ley de Bases del Medio Ambiente) establece el requerimiento de evaluación de impacto ambiental a todos aquellos proyectos que pueden tener efectos negativos sobre el medio ambiente, la salud y la seguridad de las personas. Ello se suma a la especificación de estándares de calidad ambiental y normas de emisión para los residuos. Más aún, la globalización de los mercados y la fuerte competencia internacional, obligan a nuestro sector exportador a lograr niveles de desempeño ambiental compatibles con los requerimientos de las naciones líderes. Como consecuencia de ello, conceptos tales como: sistemas de gestión ambiental, auditorías ambientales, evaluación de desempeño ambiental, análisis de ciclo de vida y etiquetado ecológico, entre otros, adquieren cada vez mayor relevancia.

Las nuevas estrategias para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial, ***se basan en un enfoque integral preventivo***, que privilegia una mayor eficiencia de utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad. Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión que permiten reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos en su fuente misma, y reducir los riesgos operacionales y otros posibles aspectos ambientales adversos, a través de todo el ciclo de producción.

Esto representa un gran desafío para aquellos ingenieros y otros profesionales que están involucrados en el diseño y operación de procesos productivos, cuya responsabilidad es compatibilizar las exigencias ambientales y los requerimientos de calidad, seguridad, productividad y rentabilidad. Las herramientas conceptuales para cumplir esos objetivos trascienden los límites de la formación convencional de los ingenieros, y su introducción en los programas de estudio se encuentra en plena evolución. Dicha tarea es ardua debido a la naturaleza multidisciplinaria del problema, la que se visualiza claramente en la definición del

concepto de *medio ambiente*[1]:

***Medio ambiente***: E*s el sistema global constituído por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones.*

Esta publicación intenta hacer un aporte en aquellos aspectos de ingeniería ambiental, relevantes a la función profesional del ingeniero de proceso.

Aquí usamos el término "***ingeniería ambiental***" para definir: *el área de la ingeniería encargada de controlar y reducir el impacto ambiental de la actividad humana, a través del diseño y la aplicación de medidas tecnológicas y de gestión.* En rigor, esta definición es aplicable a todas las especialidades de la ingeniería, ya que las consideraciones ambientales constituyen una parte integral de dicha profesión.

El autor reconoce la imposibilidad de cubrir en un solo texto la amplia extensión de tópicos relevantes y enfatiza el carácter introductorio de éste. Los diferentes temas se presentan agrupados en las tres áreas siguientes:

- **Conceptos básicos de ciencias ambientales:** Estos se abordan en los capítulos 2, 3 y 4, donde se presenta un amplio rango de conceptos fundamentales, necesarios para comprender la relación entre el hombre y su entorno natural, y los problemas ambientales que enfrentamos.
- **Aspectos tecnológicos en ingeniería ambiental:** El capítulo 5 describe los diferentes sistemas de tratamiento de residuos líquidos, gaseosos y sólidos. Ello se complementa con el capítulo 6, que introduce los principios sobre los que se basa el diseño de procesos limpios y el control ambiental preventivo.
- **Aspectos de gestión en ingeniería ambiental:** Esto constituye un componente clave del control ambiental moderno. El capítulo 7 revisa las herramientas básicas para evaluar el impacto ambiental de un proyecto, en el contexto del diseño de procesos limpios. Los capítulos 8, 9 y 10 describen diferentes tópicos sobre la implementación de sistemas de gestión ambiental, auditorías ambientales y análisis de ciclo de vida, respectivamente. Finalmente, el capítulo 11 introduce las principales metodologías utilizadas en el análisis de riesgos operacionales.

Se espera que el lector obtenga una visión general de estos temas, recibiendo adecuada orientación para su profundización en referencias especializadas.

[1] Definición según la Ley 19300, “Ley de Bases del Medio Ambiente” , publicada en el Diario Oficial el 9 de Marzo de 1994, Chile.

## 1.2) EL PROBLEMA

Es importante comenzar un texto de esta naturaleza planteando la pregunta:

*¿Cual es el problema ambiental que genera la actividad humana?*

El Hombre ha modificado drásticamente su entorno, desde la aparición misma de la sociedad humana. Por muchos milenios, nuestros antepasados lucharon constantemente por sobrevivir y crecer. Una lucha que, en términos generales, fue exitosa, ya que el *Homo sapiens* logró constituirse en la especie dominante en el planeta. Como resultado de este proceso, el entorno natural ha sufrido grandes alteraciones, donde millones de hectáreas de bosques fueron reemplazados por terrenos agrícolas, por ciudades, ..... y también por desiertos.

Los seres humanos tenemos una larga lista de necesidades fundamentales que deben ser cubiertas para mantener nuestra factibilidad de existencia. En lo básico, necesitamos alimentarnos, protegernos del frío, de la lluvia, de las enfermedades y de las fieras; necesitamos, además, energía para preparar nuestros alimentos, y para iluminarnos en la oscuridad de la noche. Como entes sociales, necesitamos comunicarnos, relacionarnos, almacenar nuestras memorias y aprendizajes, satisfacer nuestras necesidades culturales, transportarnos, etc, etc etc.

Necesitamos .....

.....la lista (y su complejidad) crece y crece, en la medida que pensamos en el hombre moderno, en un mundo habitado por más de 6 mil millones de seres humanos, con ciudades de 20 millones de personas. Una parte importante de la actividad humana se destina a satisfacer estas necesidades, marcando el sello de nuestra Historia y de nuestro desarrollo como especie. También ha significado una drástica transformación de nuestro entorno.

Recientemente, el paso del progreso se ha acelerado, con un crecimiento exponencial de la población y del ritmo de explotación de los recursos naturales, adquiriendo ribetes dramáticos en los últimos 100 años. El crecimiento de la población humana conlleva a un incremento en la demanda de energía, alimentos y otros bienes de consumo. Durante el siglo XX, la población mundial se multiplicó por cuatro, superando los 5 mil millones de habitantes, mientras que el volumen de producción global a comienzos del nuevo milenio es 20 veces mayor que en 1900. En la actualidad, el consumo de combustibles fósiles es 30 veces superior al de ese entonces, aumentando aceleradamente en las últimas décadas. A ello hay que agregar que el consumo de agua ha crecido proporcionalmente al aumento de la población y de la producción agrícola e industrial, lo que ha impuesto una fuerte presión sobre los frágiles recursos hídricos del planeta.

Para comprender la dimensión del proceso productivo y su complejidad, bastaría con mirar a nuestro alrededor y evaluar lo que hay detrás de cada objeto que consideramos imprescindible para nuestro desenvolvimiento diario. ¿De qué

están hechos? ¿Cuáles fueron las fuentes originales de materias primas? ¿De qué lugar del mundo provienen? ¿Cuáles fueron los procesos que permitieron su fabricación? ¿Cuánta energía se requirió y de donde se obtuvo? ¿Cuántas manos y especialidades? ¿Cuántas decisiones de inversión? ¿Cuánta coordinación entre los diferentes agentes que tomaron parte en el proceso productivo? ¿Cuántos residuos se generaron a lo largo de ese proceso? ¿Cuántos accidentes?.

La actividad productiva implica la utilización de recursos materiales y energéticos, con el objetivo de generar bienes y servicios que satisfagan alguna necesidad humana actual o potencial. Tal como se ilustra en la Figura 1.1, los recursos naturales (materiales y energéticos) y humanos, son utilizados en una larga cadena de transformaciones. Su consumo desmedido o irracional puede afectar la calidad de vida y el estado de conservación del medio natural, cuestionando seriamente la sustentabilidad de la actividad productiva. Los recursos renovables y no renovables esenciales para la existencia del hombre en la Tierra están amenazados por nuestro propio desarrollo como especie.

A nivel mundial, hoy enfrentamos serios problemas de abastecimiento de agua y carencia de suelo agrícola en muchas regiones, destrucción masiva de bosques, erosión y desertificación, reducción de la disponibilidad de petróleo y de algunos minerales básicos, y explotación irracional de los recursos marinos y forestales. Esto se ve agravado por los cambios climáticos globales que afectan drásticamente el ciclo hidrológico. Al respecto, parece haber suficiente evidencia que demuestra la contribución de la acción humana en tales procesos naturales.

Además, en todo el ciclo de producción, incluyendo la manufactura, el transporte y el consumo del producto final, se generan residuos (materiales y energéticos) que al ser emitidos a los medios receptores (aguas, aire, suelo), entran en una compleja cadena de transformaciones físicas, químicas y biológicas naturales. Los residuos regresan, directa o indirectamente al entorno natural y pueden, en el peor de los casos, provocar serios desequilibrios en el ecosistema y/o afectar negativamente la salud y seguridad de las personas. En este sentido, la contaminación es una de las consecuencias más evidentes de la actividad humana, tanto industrial como doméstica. En un sentido amplio, se puede definir como [2] :

***Contaminación:*** *La presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.*

Gran parte de los esfuerzos actuales de control ambiental están destinados a combatir la contaminación provocada por la acción humana. La reducción de emisiones de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, de origen industrial, urbano-doméstico y agrícola, constituyen un objetivo primario en tal sentido y representa

[2] Adaptada de la Ley 19.300, artículo 2º.

uno de los pilares de la normativa ambiental. A ello se suma la urgencia por proteger los escasos recursos hídricos, los recursos marinos y forestales, los suelos con potencial de uso agrícola, y la biodiversidad.

Es importante destacar que los accidentes ocurridos durante el procesamiento, almacenamiento y/o transporte de materiales peligrosos, han sido responsables de serios daños a las personas, a la infraestructura y al medio natural, ya que esos eventos pueden liberar en forma no controlada, energía y sustancias tóxicas, patogénicas, corrosivas, radiactivas, combustibles y/o explosivas.

Los impactos ambientales adversos, a escala mundial y local, pueden constituirse en un factor limitante al desarrollo futuro. En algunos casos, los efectos son evidentes e incuestionables; por ejemplo, la contaminación atmosférica debido al uso de combustibles fósiles, la contaminación de importantes cuerpos de agua debido a vertidos industriales y domésticos, la disposición de residuos sólidos en las grandes ciudades, los accidentes de las plantas nucleares, la depredación de recursos forestales en los bosques tropicales, el avance de la desertificación, el volcamiento de barcos petroleros en el océano, las emanaciones de gases venenosos debido a accidentes en la industria química, las explosiones ocurridas durante el transporte de combustibles, etc.

Existen otros efectos ambientales, sin embargo, que se manifiestan acumulativamente y con mayor lentitud, por lo que son más difíciles de cuantificar y controlar. La destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global de la atmósfera son fenómenos recientes que caen dentro de esa categoría y que han alarmado a la comunidad científica y política.

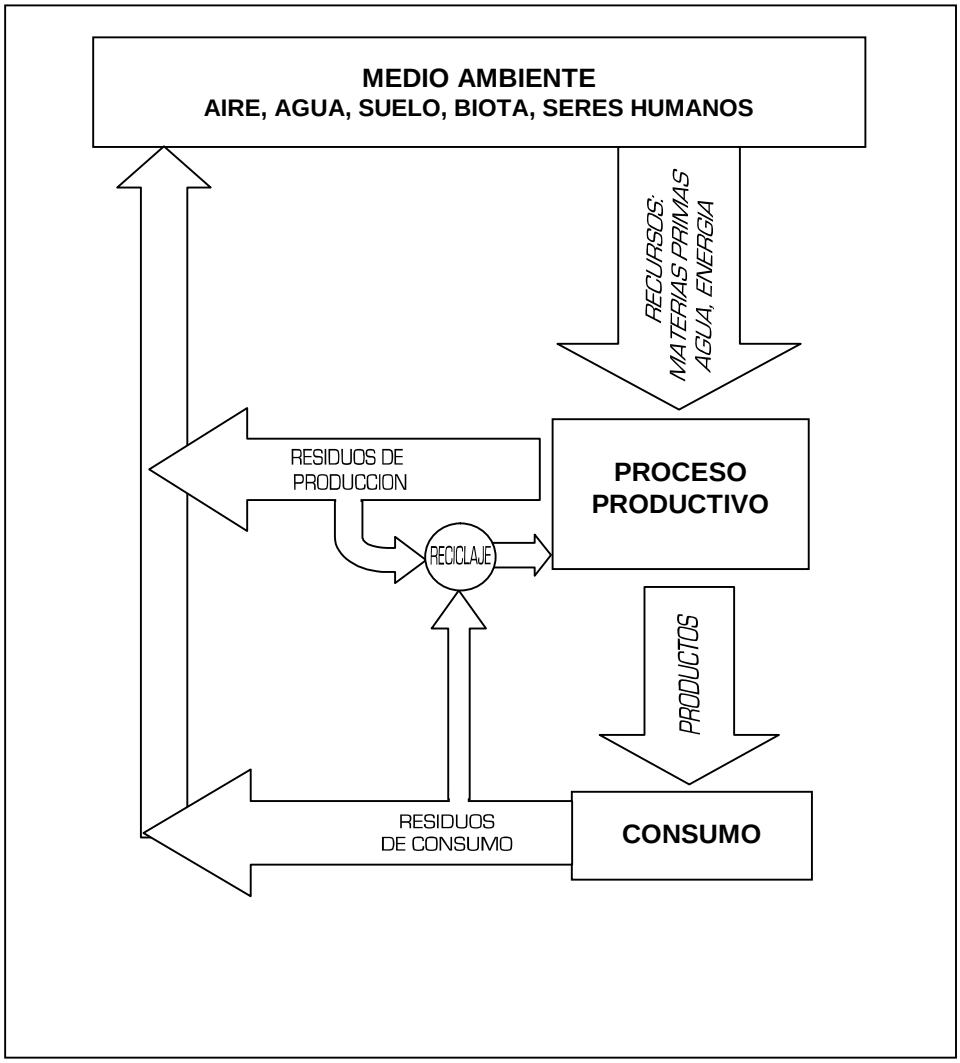



**FIGURA 1.1: CICLO PRODUCTIVO**

## 1.3) DESARROLLO SUSTENTABLE

***Desarrollo Sustentable***[3]: *El proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida de las personas, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras.*

Desde hace varias décadas ha existido una creciente preocupación por el impacto de la actividad humana sobre el medio ambiente, en su calidad de receptor de los residuos de las actividades humanas y de proveedor de los recursos materiales y energéticos requeridos. En Junio de 1992, se celebró en Rio de Janeiro (Brasil) la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, con el fin de acordar los principios básicos de conducta para lograr un adecuado complemento entre el desarrollo socioeconómico y la sustentabilidad ambiental, garantizando la viabilidad e integridad de la Tierra como hogar del hombre y de todos los seres vivos. Entre los acuerdos, destaca un vasto programa de acción destinado a minimizar el daño ambiental y garantizar la sustentabilidad de los procesos de desarrollo. Dicho programa, conocido como la Agenda 21, consta de 40 capítulos que se ilustran en la Tabla 1.1.

Estos principios, que incluyen objetivos y acciones específicas, han constituido la base para el desarrollo de la institucionalidad ambiental en muchos país. Tal es el caso de la Política Ambiental chilena, oficializada a fines del siglo XX, donde se formaliza *el compromiso de promover la sustentabilidad ambiental del proceso de desarrollo económico, poniendo énfasis en el mejoramiento de la calidad de vida de la población, en la equidad social y en la protección del patrimonio ambiental*.

[3] Definición según la Ley 19.300, artículo 2º.

**TABLA 1.1 : CONTENIDO DE LA AGENDA 21**

***I) Dimensiones sociales y económicas***

1. Preámbulo
2. Cooperación internacional para acelerar el desarrollo sustentable
3. Lucha contra la pobreza
4. Evolución de las modalidades de consumo
5. Dinámica demográfica y sustentabilidad
6. Protección y fomento de la salud humana
7. Fomento del desarrollo sustentable de los recursos humanos
8. Integración del medio ambiente y el desarrollo en la toma de decisiones

***II) Conservación y gestión de recursos para el desarrollo***

9. Protección de la atmósfera
10. Enfoque integrado de la ordenación de los recursos de la tierra
11. Lucha contra la deforestación
12. Lucha contra la desertificación y la sequía
13. Protección de zonas de montaña
14. Fomento de la agricultura y del desarrollo rural
15. Conservación de la diversidad biológica
16. Gestión ecológica de la biotecnología
17. Protección de los recursos marinos
18. Protección de la calidad de vida y el suministro de los recursos de agua dulce
19. Gestión ecológicamente racional de los productos químicos tóxicos
20. Gestión ecológicamente racional de los desechos peligrosos
21. Gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos y aguas servidas
22. Gestión segura y ecológicamente racional de los desechos radiactivos

***III) Fortalecimiento del papel de las partes interesadas***

23. Preámbulo
24. Medidas mundiales en favor de la mujer para lograr un desarrollo sustentable
25. Los niños y jóvenes en el desarrollo sustentable
26. Reconocimiento y fortalecimiento del papel de las poblaciones indígenas
27. Fortalecimiento del papel de las organizaciones no gubernamentales (ONG)
28. Incentivos de las autoridades locales en apoyo de la Agenda 21
29. Fortalecimiento del papel de los trabajadores y sus sindicatos
30. Fortalecimiento del papel de la industria y comercio
31. La comunidad científica y tecnológica
32. Fortalecimiento del papel de los agricultores

***IV) Medios de ejecución***

33. Financiamiento
34. Transferencia tecnológica
35. Ciencias
36. Educación
37. Cooperación internacional
38. Acuerdos internacionales institucionales
39. Instrumentos jurídicos internacionales
40. Información

## 1.4) LOS NUEVOS CONCEPTOS EN CONTROL AMBIENTAL Y EL DESAFIO PARA LOS INGENIEROS DEL SIGLO XXI

Tradicionalmente, el control ambiental en la industria de procesos, se ha focalizado en el tratamiento de los residuos directos de producción, para cumplir con las normas que regulan su disposición final. Tales residuos industriales han sido considerados como productos (indeseados) de la actividad productiva, los cuales son tratados usando técnicas convencionales para reducir su carga contaminante. Dicho enfoque ha cambiado aceleradamente debido a las crecientes presiones legales y económicas a que la industria de procesos ha estado sometida en los últimos años. Las nuevas estrategias de control ambiental en la industria moderna se basan en una combinación de medidas tendientes, principalmente, a:

- Reducir el consumo de recursos naturales materiales y energéticos.
- Prevenir la generación de residuos.
- Reducir los riesgos operacionales.

La reducción del consumo de materias primas, de energía, de agua y otros recursos, sumada a la recuperación de los residuos, deberían conducir a un importante aumento de la productividad. En muchos casos, ello permite justificar las inversiones adicionales requeridas para modificar los procesos con vistas a un manejo efectivo de los recursos.

En forma creciente, los esfuerzos de prevención y/o minimización de impactos ambientales se realizan tomando en consideración aspectos tecnológicos y de gestión. Ellos son incorporados en todas las fases del ejercicio de diseño, desarrollo del proyecto e implementación industrial, en las diferentes actividades que tienen lugar a través del ciclo de vida de los productos o procesos bajo estudio, desde la extracción de los recursos básicos hasta la disposición final de los residuos finales.

Dentro de este contexto, quienes estamos involucrados profesionalmente en la actividad productiva, debemos contar con las herramientas conceptuales para contribuir a minimizar el impacto ambiental de los procesos productivos. Dicha tarea no es fácil, ya que involucra conceptos de diversas disciplinas, requiriendo de un esfuerzo colectivo de profesionales, provenientes de distintas áreas del saber, quienes deben estar en condiciones de comunicarse coherentemente entre sí, con un vocabulario científico y técnico común.

En los próximos capítulos de este texto, se abordan a nivel introductorio, las principales áreas temáticas asociadas a la ingeniería ambiental, en el contexto de la industria de procesos. El autor espera contribuir así, al esfuerzo formativo de los nuevos ingenieros y de aquellos que abandonaron las aulas universitarias hace algún tiempo, pero que no han abandonado su inquietud por el saber.

## BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Existen centenares de textos que cubren en detalle los diferentes tópicos revisados en este libro. Al final de cada capítulo se incluye una lista muy reducida de textos recomendados, de acuerdo a su disponibilidad en las principales bibliotecas universitarias y librerías chilenas. Aquellos lectores que deseen profundizar los temas cubiertos en cada capítulo pueden consultar dichas referencias.

Entre las referencias de cobertura general, se recomienda los siguientes textos:

## TEXTOS GENERALES


Davis M., Cornwell D., "Introduction to Environmental Engineering". 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)

Henry J.G., Heinke G.W., "Ingeniería Ambiental". 2ª ed. Prentice Hall. México 1996)

Itsemap Ambiental, "Manual de Contaminación Ambiental". Fundación MAPFRE, Madrid (1994)

Kelly G., "Environmental Engineering". McGraw Hill International Editions., Singapore (1998)

Masters G.M., "Introduction to Environmental Engineering and Science", 2ª ed. Prentice-Hall International (UK) Limited, London (1998)

Ortega R., Rodríguez I., "Manual de Gestión del Medio Ambiente", Fundación MAPFRE, Madrid (1994)

Seoanez M. "Ecología Industrial". Ed. Mundi-Prensa. Madrid (1995)


Además, se recomienda consultar la páginas *web* de instituciones ambientales u otras, que han puesto a libre disposición del público general valiosos datos sobre diferentes tópicos ambientales, casos de estudio, etc. Al respecto, existe una gran actividad y cada día aparecen nuevos sitios.

Se recomienda consultar los sitios de las agencias ambientales nacionales e internacionales, y centros de investigación ambiental donde existe innumerable información acerca de aspectos legales, problemas ambientales, metodologías de evaluación de impacto ambiental, iniciativas de producción limpia, información ambiental, etc. Muchas de estas direcciones poseen funciones de búsqueda en base a palabras clave, lo que facilita su utilización. En general, en los sitios internacionales las palabras clave deben ser utilizadas en inglés (ej.: environment, cleaner production, waste treatment, pollution prevention, environmental management, environmental auditing, environmental performance, environmental impact assessment, risk assessment, life cycle analysis, environmental sciences, etc.).

A continuación, se entregan algunas direcciones web de instituciones nacionales e internacionales que abordan diferentes aspectos de la problemática ambiental. Muchas de ellas permiten acceso a nuevos sitios más específicos.

**Instituciones Chilenas:**

| | |
|---|---|
| CONAMA-CHILE: | www.conama.cl |
| CENTRO EULA – U. de CONCEPCION | www.eula.cl |
| CIPMA | www.cipma. |
| IMA-USACH | www.lauca.usach.cl/ima |
| INTEC | www.intec.cl |
| CONAF | www.conaf.cl |
| INE | www.ine.cl |
| SINIA-CHILE | www.sinia.cl |
| CIREN | www.ciren.cl |
| INFOR | www.infor.cl |
| CONADI | www.conadi.cl |
| SERNAPESCA | www.sernapesca.cl |
| CIMM | www.cimm.cl |
| SERNAGEOMIN | www.sernageomin.cl |
| MOP | www.mop.cl/utma/ |
| MOP-DGA | www.mop.cl/direcciones/dga/ |

**Instituciones Extranjeras**

| | |
|---|---|
| EPA-EEUU: | www.epa.gov |
| P.N.U.M.A. | www.unep.org |
| O.M.S. | www.who.org |
| AGENCIA EUROPEA MEDIOAMBIENTAL | www.eea.dk |
| AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA | www.iea.org |
| DEP. ENERGÍA-EEUU | www.em.doe.gov |
| BID | www.jadb.org |
| FAO | www.fao.org |
| DEP. ENVIRONMENT-AUSTRALIA | www.environment.sa.gov.au |
| ASTM | www.astm.org |
| CEPIS | www.cepis.ops-oms.org |
| WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI) | www.wri.org |
| SOLID WASTE SYSTEM | www.solidwaste.org |
| INDUSTRIAL ECOLOGY | www.industrialecology.com |
| RECYCLER'S WORLD | www.recycle.net |
| WATER WORLD | www.wwinternational.com |
| ECOWASTE INDUSTRIES LTD. | www.ecowaste.com/index.htm |
| POLLUTION ON LINE | www.pollutiononline.com |
| UNIV. DE NAVARRA | www1.ceit.es/Asignaturas/ecologia/Enlaces/EnlAmb1.htm |
| ENVIRONMENT CANADA | www.ec.gc.ca |
| FRESH WATER ECOLOGY AND POLLUTION | www.stemnet.nf.ca |
| BIODIVERSIDAD BIOLÓGICA | www.biodiv.org |
| CONSERVATION INTERNATIONAL | www.conservation.org |
| THE WORLD CONSERVATION UNION | www.iucn.org |
| INT. INST.SUSTAINABLE DEVELOPMENT | www.iisd.ca |
| ISO 14000 – CANADA | www.scc.ca/iso14000 |
| AICHE-CCPS | www.aiche.org/ccps |

# CAPÍTULO 2

# EL ENTORNO NATURAL

Para comprender el impacto ambiental de nuestra actividad sobre el medio ambiente, requerimos un conocimiento básico de los diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, que caracterizan el funcionamiento de la Tierra, además de sus interacciones. En rigor, esta área temática cae dentro del dominio de la ecología[1], integrando conceptos provenientes de la geología, la biología, la bioquímica, la química, la termodinámica y otras ciencias fundamentales, cuya revisión completa es imposible en unas pocas páginas.

En este capítulo, se presentan los principales tópicos y definiciones básicas que permitirán entregar una base introductoria. El lector encontrará varios textos generales en la sección de Referencias Recomendadas, que cubren los diferentes aspectos de las ciencias ambientales con mayor profundidad: Arms (1990), Botkin y Keller (1995), Goudie (1989, 1990), Margalef (1992), Meyer (1996), Miller (1996), Nebel y Wright (1996), Raven (1993), entre otros.

## 2.1) LA TIERRA

Cuando se estudia la Tierra, es importante tener presente las dimensiones temporales y espaciales que ello implica. Existe consenso dentro de la comunidad científica que Nuestro Hogar, la Tierra, ya contaba con una sólida superficie de rocas hace aproximadamente 4500 millones de años. Por su parte, los fósiles microscópicos más antiguos datan de unos 3500 millones de años, mientras que se ha descubierto fósiles macroscópicos marinos de hace 500 millones de años. Desde ese entonces, la vida se ha propagado hacia la superficie terrestre, donde han aparecido plantas, peces, reptiles, aves y mamíferos, etc. Cuando pensamos que la existencia del *Homo sapiens* sólo data de 40 mil años atrás, nos damos cuenta de nuestro insignificante peso dentro de la historia, a escala geológica. Ello es aún más impactante si se compara con la "edad" del Universo, la que de acuerdo a la teoría de la Gran Explosión (*Big Bang*), sería de 15-20 mil millones de años.

La Tierra es un planeta elipsoidal de 6730 km de radio medio, que gira alrededor del Sol en un ciclo anual. El eje de la Tierra está inclinado 23,5º respecto de su plano de rotación alrededor del Sol.

[1] Ecología es el estudio de las relaciones entre los organismos y su ambiente.

El término proviene del griego: *oikos* (casa) y *logos* (estudio), y fue propuesto por el biólogo alemán Ernst Haeckel en el siglo XIX. Fue considerada durante mucho tiempo como una subdivisión de la biología; sin embargo, su acelerado desarrollo en las últimas décadas, ha llevado a su consolidación como una disciplina integradora que relaciona procesos físicos y biológicos, y que tiende un puente natural entre las ciencias naturales y las ciencias sociales (E.P. Odum, "Fundamentos de ecología". Nueva Editorial Interamericana, México. 1986).

Está cubierta por una delgada corteza exterior (litosfera), de 30-40 km de espesor en la zona continental y 6 km en la zona oceánica, que contribuye con menos del 1% de la masa total de la Tierra. La corteza eswtá compuesta por placas tectónicas que se mueven a una velocidad entr 2 y 15 cm/año. Los límites entre estas placas son áreas geológicamente activas, con gran actividad volcánica y sísmica.

La superficie del planeta es irregular, con un 70% de ella cubierta por agua, con una profundidad de hasta 11 km (promedio, 4 km). La superficie restante corresponde a las masas de tierra, cuya altura máxima sobre el nivel del mar alcanza los 8,8 km. Dos tercios de esta masa están situadas sobre el Hemisferio Norte.

La composición de la corteza es muy heterogénea, con un alto contenido de $SiO_2$ y $Al_2O_3$, aún cuando en las zonas más superficiales (capa sedimentaria) hay importantes cantidades de CaO y carbonatos. Bajo la corteza existe una zona de casi 2900 km. de espesor, llamada Manto, que representa el 69% de la masa total del planeta. El manto tiene un alto contenido metálico en estado fluido (magma), con una predominancia de óxidos de Si, Mg, Fe y Al. La zona central de la Tierra, es decir entre 2900 y 6370 km. de profundidad, se denomina el Núcleo y representa alrededor del 30% de la masa del planeta. El Núcleo tiene una temperatura estimada de $2000^oC$ y está compuesto en un 80% por Fe y Ni; el resto por Si y S.

Cuando el magma aflora a la superficie, o cerca de ella, se enfría y cristaliza formando las rocas ígneas. La acción erosiva del viento y el agua, y las variaciones de temperatura destruyen las rocas ígneas y generan sedimentos. Estos sedimentos se acumulan en las profundidades de los océanos y lagos, transformándose en rocas sedimentarias. Cuando las rocas sedimentarias quedan sepultadas a varios kilómetros de profundidad, las altas temperaturas y presiones las transforman en rocas metamórficas. Estas últimas pueden derretirse y, eventualmente, transformándose en rocas ígneas. Los procesos vivientes afectan la composición química de las rocas aportando carbono (ej.: carbonatos, carbón, hidrocarburos).

La vida en la Tierra está confinada a una región relativamente pequeña, llamada Biósfera, que se encuentra en torno a la interfase entre la atmósfera y la superficie (tierra y océano), donde existen condiciones de presión, temperatura y composición química favorables para el desarrollo de la vida.

**La Atmósfera**

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa, llamada atmósfera, cuyo espesor alcanza aproximadamente 200 km. En la atmósfera se distinguen 4 capas, con diferentes perfiles de concentración:

- la tropósfera (0-10 km desde la superficie terrestre): La temperatura desciende con la altura, llegando a alrededor de $-60^oC$ a 10 km de altura.
- la estratósfera (10-50 km): El perfil de temperatura experimenta una fuerte

inversión, aumentando hasta cerca de los 0ºC. En esta capa el ozono experimenta un nivel máximo de concentración.

- la mesósfera (50-90 km): La temperatura vuelve a descender hasta llegar a valores inferiores a –100ºC en su parte superior.
- la termósfera (90-200 km): Aquí la temperatura asciende hasta alcanzar niveles sobre 1.000ºC.

La atmósfera contiene, en promedio, 78,1% (en volumen) de $N_2$, 20,9% de $O_2$, 0,93% de Argón, 0,033% de $CO_2$, excluyendo el vapor de agua presente. Este último puede constituir hasta un 7% del volumen total. El resto, menos de 0,02 % del volumen total de la atmósfera, está constituido por una mezcla de gases nobles (Ne, He, Kr, Xe), $CH_4$, $H_2$, $N_2O$, CO, $O_3$, $NH_3$, $NO_2$, NO y $SO_2$.

Las capas superiores de la atmósfera reciben la radiación solar ultravioleta, dando origen a complejas reacciones químicas en las que participan el $O_2$, el $N_2$ y el $O_3$. Dichas reacciones permiten absorber una gran fracción de la radiación ultravioleta, impidiendo su llegada a la superficie terrestre.

La temperatura global del planeta (del orden de $15^oC$), está determinada por un delicado balance entre la radiación solar que llega a la Tierra y la energía neta que ella irradia al espacio, tal como se ilustra en la Figura 2.1. Un factor esencial de este balance térmico es la cantidad de energía absorbida por los diferentes componentes de la atmósfera. Dichos compuestos químicos absorben radiación en rangos de longitud de onda característicos para cada uno de ellos. Por esta razón, la composición química de la atmósfera juega un papel determinante en este balance, ya que ésta absorbe parte de la radiación solar y de la energía radiada por la Tierra.

A su vez, la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, es absorbida por aquellos gases atmosféricos que absorben ondas largas ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$, $H_2O$, $O_3$), y re-emitida hacia la superficie, produciendo un "efecto de invernadero". Estos "gases invernadero" son los que mantienen la temperatura de la Tierra a los niveles que conocemos. Si dichos gases no existieran, la temperatura global de la Tierra sería del orden de $-18^oC$.

La atmósfera es un sistema dinámico que cambia continuamente. A escala global, las masas de aire circulan como resultado de la rotación terrestre y de la radiación solar, dando origen a padrones de vientos, y cinturones de altas y bajas presiones en diferentes latitudes.

El **clima** se refiere a las condiciones atmosféricas (principalmente, temperatura y precipitación) características o representativas en un lugar determinado. En general, se habla de clima cuando nos referimos a períodos largos (varios años), mientras que se habla de condiciones climáticas ("estado del tiempo", "condiciones meteorológicas") para describir las condiciones de la atmósfera en períodos cortos (días, o semanas).

El clima y las condiciones climáticas en diferentes partes de la Tierra depende de las propiedades físicas y la composición química de la atmósfera, y del flujo de energía solar que llega a la superficie terrestre.

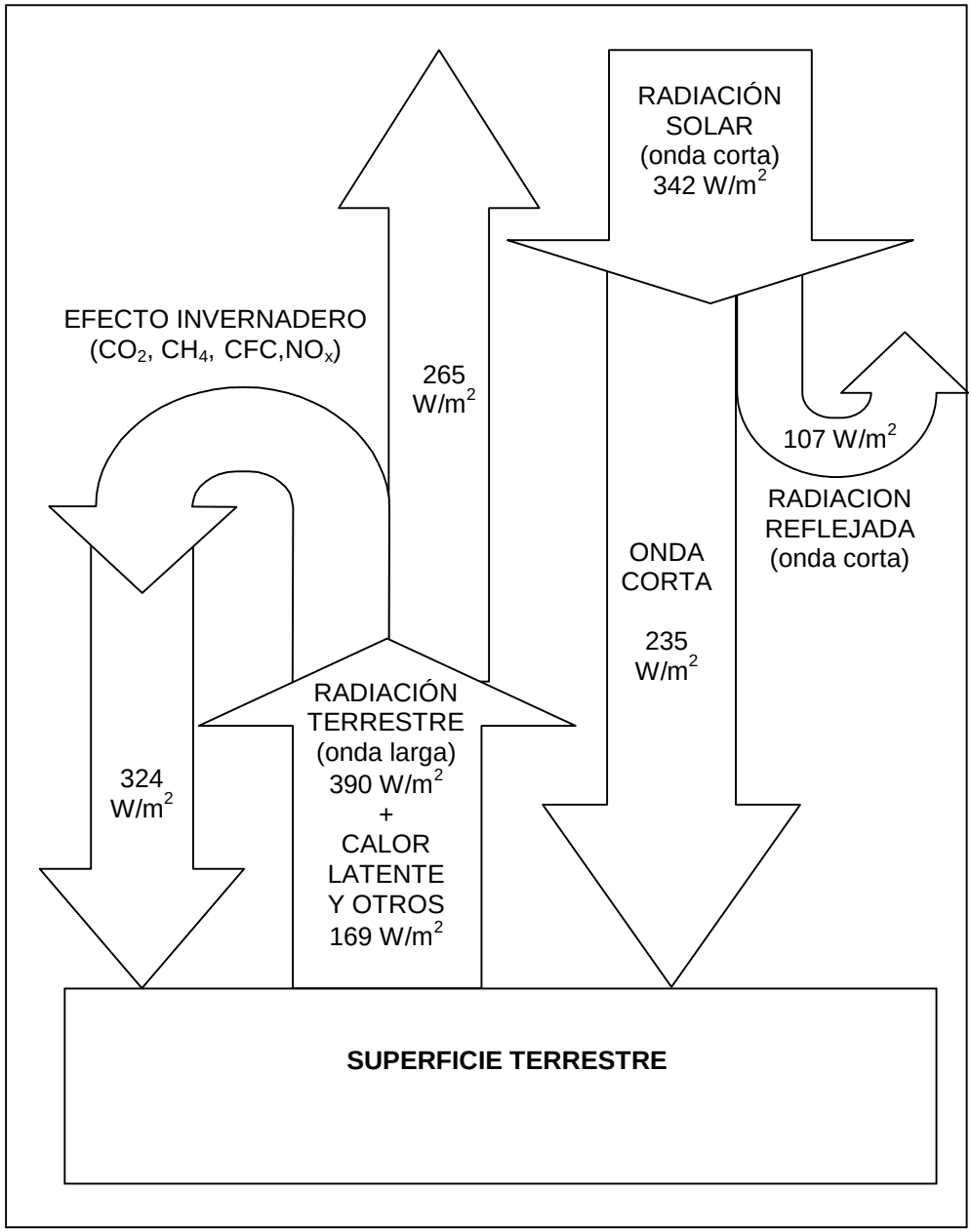



**FIGURA 2.1: BALANCE TÉRMICO TERRESTRE**

La cantidad de energía solar que alcanza la superficie terrestre varía con la latitud (distancia desde el ecuador), siendo mayor en la zona ecuatorial. Por lo tanto, el aire de la tropósfera está más caliente en el ecuador y más frío en los polos. Sobre el ecuador, el aire caliente posee una baja densidad y se eleva hasta alcanzar suficiente altura, desde donde se mueve en dirección hacia los polos. Al llegar a los polos, las masas de aire se enfrían y fluyen hacia la superficie debido a su mayor densidad. Al alcanzar la superficie de las zonas polares, estas masas de aire frío circulan a baja altura en dirección al ecuador.

En general, existen cinturones de baja presión a lo largo del Ecuador y entre las latitudes 50º y 60º Norte y Sur, como resultado de las columnas de aire ascendentes. Por su parte, existen cinturones de alta presión entre las latitudes 25º y 30º Norte y Sur, donde prevalecen masas de aire descendente. Los principales desiertos de la Tierra están ubicados en aquellas zonas donde existen altas presiones "atrapadas" entre las bajas presiones del cinturón ecuatorial y de los dos cinturones de baja presión.

A medida que avanzan hacia y desde los polos, las masas de aire sufren la acción desviadora de Coriolis, generando patrones de circulación característicos en diferentes regiones[2]. Más aún, existen variaciones (diarias y estacionales) en la distribución de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre.

Estos padrones de circulación de las masas de aire en la troposfera tienen un gran efecto sobre la distribución de las precipitaciones sobre la superficie. Los grandes flujos de energía solar en la zona ecuatorial resultan en la evaporación de enormes cantidades de agua desde la superficie, llegando a niveles cercanos a saturación. Cuando estas masas de aire húmedo se elevan y se enfrían, se produce la condensación del vapor de agua, precipitando en las cercanías del ecuador (clima tropical). Una vez que dichas masas de aire se han movido 30º (latitud Norte y Sur en dirección hacia los polos) se ha perdido gran parte de su humedad, lo que explica las bajas precipitaciones que se constatan en esas regiones (clima seco, desértico, semiárido). Al seguir su viaje en dirección a los polos, estas masas de aire cálido comienzan a incrementar sus niveles de humedad, generando precipitaciones a medida que se acercan a las zonas polares (latitudes 60º Norte y Sur). Al llegar a los polos, las masas de aire presentan bajos contenidos de humedad.

Existen diferentes tipos de clima, en base a diferentes criterios de clasificación, entre los cuales figuran: clima tropical, subtropical, subártico, ártico, continental húmedo, desértico, etc. A escala regional, las masas de aire que cruzan los océanos y continentes pueden tener un significativo efecto sobre los padrones estacionales de precipitaciones y temperaturas. A nivel local, las condiciones climáticas (microclimáticas) pueden variar drásticamente de un lugar a otro.

[2] Para una descripción sencilla y amena acerca del clima y la meteorología se recomienda el texto de M. Medina "Iniciación a la Meteorología" 8ª edición. Editorial Paraninfo. Madrid. (1994).

La temperatura y las precipitaciones juegan un importante papel en determinar las condiciones de vida existentes en una región, por lo que existe una estrecha relación entre el clima y los tipos de especies vivientes. Esto sugiere que si se conoce el clima de una región, se podría predecir que tipo de especies se encuentran allí, y en que cantidad. Para estos efectos, la biosfera se puede dividir en tipos de ecosistemas (llamados biomas) caracterizados por el tipo de clima prevaleciente (ej.: desértico, bosque tropical, praderas)[3].

## 2.2) LA VIDA

La teoría más establecida acerca del desarrollo de la vida en la Tierra supone que existió una evolución gradual a partir de moléculas inorgánicas simples. Todos los seres vivientes de este planeta están compuestos de moléculas orgánicas, es decir, donde la estructura básica está dada por cadenas de carbono. Muchos de estos compuestos orgánicos pueden ser sintetizados a partir de reacciones entre $H_2O$, $NH_3$, $CO_2$, CO, $CH_4$, $H_2S$ y $H_2$. Se cree que todas estas moléculas simples estaban presentes en la atmósfera y en los océanos de la Tierra primitiva, en épocas remotas, donde los rayos ultravioleta provenientes del Sol llegaban a la superficie terrestre sin mayor protección, permitiendo el curso de interminables reacciones químicas que derivaron en la formación de compuestos orgánicos estables, de complejidad creciente. El paso crucial desde tales moléculas orgánicas, hasta los sistemas capaces de autoreplicarse, es decir, desde lo inerte a lo vivo, es aún materia de especulación y su discusión cae fuera de los marcos de este texto.

Hace unos 2.000 millones de años atrás, la atmósfera primaria contenía altas concentraciones de compuestos reductores, con sólo trazas de $O_2$. Predominaba la actividad de microorganismos procariotes (bacterias) anaeróbicos, que generaban $CH_4$, $CO_2$ , $H_2S$ y $H_2$. Por otra parte, la actividad de microorganismos fotosintéticos, permitía sintetizar compuestos orgánicos a partir de $CO_2$ y luz, generando, además, $O_2$. Hace 600-1000 millones de años atrás, una fracción importante de la materia orgánica, quedó parcialmente descompuesta en sedimentos anóxicos o sepultada completamente y fosilizada sin sufrir oxidación. Ello habría producido un desbalance entre la actividad fotosintética y la oxidación, permitiendo la acumulación de oxígeno en la atmósfera y la evolución hacia formas superiores de vida. Hace aproximadamente 300 millones de años, se generó un gran exceso de materia orgánica viviente, que condujo a la formación de los combustibles fósiles que hoy sostienen el desarrollo industrial.

Actualmente, cada año se producen más de 100 mil millones de toneladas de materia orgánica como resultado de la actividad de los organismos fotosintetizadores, generando $O_2$ como subproducto. Paralelamente, se oxida una cantidad equivalente de materia orgánica, formando $CO_2$ y $H_2O$, como resultado de la actividad respiratoria de los seres vivos y de los procesos de combustión. La proporción entre el $O_2$ y el $CO_2$ en la atmósfera depende del balance biótico, de la actividad volcánica, de los

[3] Para mayores detalles se recomiendan los textos de Botkin y Keller (1995), y Miller (1990)

procesos de sedimentación, de la radiación solar, entre otros. Estos aspectos se abordan en mayor detalle más adelante en este capítulo, en las secciones sobre los ciclos del carbono y del oxígeno.

En la actualidad, se estima que existen más de 30 millones de especies en la Tierra, de las cuales han sido catalogadas aproximadamente un millón y medio de especies animales, y medio millón de especias de plantas, cada una de las cuales posee su propio nicho ecológico (es decir, realiza funciones y ocupa un hábitat específico).

Los organismos fotosintetizadores tienen la propiedad de capturar la energía solar y convertirla en energía química, para formar estructuras moleculares de diversa complejidad, como los azúcares, almidones, proteínas, grasas y vitaminas. Esta capacidad de alimentarse por si mismos es la razón por la que se denominan ***organismos autótrofos***.

Todos los demás organismos obtienen su energía de otras fuentes, llamándose ***organismos heterótrofos***. Existe, por lo tanto, una ***cadena alimenticia*** o ***cadena trófica***, en la que los organismos autótrofos constituyen el ***nivel primario*** o primer nivel trófico (ej.: plantas, fitoplancton). Todos los heterótrofos que obtienen su energía directamente de los autótrofos se llaman ***consumidores primarios***, ocupando el segundo lugar en la cadena trófica; aquí se incluyen todos los herbívoros (ej.: la vaca, el saltamontes, zooplancton). Todos los depredadores que se alimentan de los consumidores primarios corresponden al tercer nivel de la cadena trófica y se denominan ***consumidores secundarios*** (ej.: la lechuza, el lobo, la ballena). El cuarto nivel trófico corresponde a aquellos ***consumidores terciarios***, capaces de alimentarse de los consumidores secundarios. Los **omnívoros** son aquellas especies capaces de alimentarse tanto de vegetales como de animales (ej.: el hombre, el oso, la rata). Otro grupo que juega un papel importante en el reciclaje de materia y energía, lo constituyen los organismos ***saprótrofos*** que obtienen su energía por degradación de tejidos muertos o por absorción de detritos (es decir, materia orgánica resultante de la descomposición de organismos muertos). Los saprótrofos (ej.: bacterias, hongos, nemátodos, caracoles, ostrácodos, etc) desintegran las estructuras biológicas liberando nutrientes orgánicos que pueden utilizar los productores, a la vez que en si mismos, constituyen alimento para los consumidores. Si tal descomposición no ocurriera, todos los nutrientes quedarían atrapados en los organismos muertos, limitando la generación de nuevos seres vivos. La acción de descomposición de las bacterias y hongos se basa en enzimas líticas, especializadas en la desintegración de macromoléculas y otros compuestos orgánicos bióticos. Dichas enzimas son secretadas sobre los cadáveres y su acción degradativa genera compuestos de menor peso molecular que son absorbidos por los saprófagos que permanecen en el medio. Ninguna especie de saprótrofos es capaz de descomponer por si sola un organismo muerto; sin embargo, las poblaciones de desintegradores presentes en la biósfera, pueden descomponer colectivamente un cuerpo por completo. La velocidad de descomposición de los diferentes componentes de los cadáveres de plantas y animales, varía de acuerdo a su estructura química: los azúcares, las grasas y las proteínas se descomponen con mayor rapidez, mientras que la celulosa, la lignina y la quitina, se degradan más

lentamente. Los productos más resistentes terminan como *sustancias húmicas* [4], que son mineralizadas lentamente por la acción de organismos anaeróbicos en los sedimentos marinos o en el suelo terrestre. Esto último constituye un factor de retardo en la descomposición de la materia orgánica y tiene una gran importancia en el ciclo global del oxígeno.

Los detritos, las sustancias húmicas y otros tipos de materia orgánica en descomposición, son importantes para la fertilidad del suelo, ya que generan una estructura favorable para el desarrollo vegetal. Además, algunos de estos compuestos orgánicos forman complejos quelantes con iones metálicos, manteniéndolos en forma soluble y con menor acción tóxica permitiendo así una mayor disponibilidad biológica de tales metales.

Las cadenas tróficas no constituyen secuencias aisladas, sino que se interconectan formando ***redes tróficas***. Estas redes son expresión de la complejidad de las relaciones entre las especies dentro de un ecosistema. Basta imaginar la cadena trófica asociada a la descomposición de los organismos muertos, donde miles de especies y millones de individuos se alimentan a partir de los organismos muertos y de los detritos, generando alimento y nutrientes para otros heterótrofos y autótrofos.

Los seres vivos y su entorno "inerte", se relacionan de manera inseparable, a través de complejas interacciones. Estas son a menudo tan delicadas, que una perturbación relativamente pequeña en una característica ambiental puede provocar serias alteraciones en otros componentes del sistema natural.

## 2.3) LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

Un ecosistema[5] está constituido por los seres vivientes que habitan en un área determinada, formando una comunidad biótica[6], donde interactúan con el medio físico (abiótico). Cada componente del ecosistema influye sobre las propiedades del otro. Dentro del ecosistema existe un flujo de energía que conduce a la formación de estructuras bióticas definidas y al reciclaje de materia entre las partes que lo constituyen. Como se mencionó en párrafos anteriores, los nutrientes que forman parte de individuos de una especie, provienen de la muerte y de la desintegración de individuos de otras especies, y los materiales circulan y se transforman en forma eficiente. Aún cuando cada individuo de una especie tiene una actividad independiente, ellos están entrelazados en forma cooperativa. Las excretas u otros subproductos del metabolismo de los seres vivos son vertidas al entorno físico (agua, suelo y aire), donde pasan a formar parte de nuevos procesos biológicos y/o físico-

[4] Las sustancias húmicas poseen estructuras químicas complejas, de tipo amorfo y coloidal. Son condensaciones de anillos aromáticos combinados con productos de la descomposición de proteínas y polisacáridos. Los ácidos húmicos poseen anillos fenólicos, estructuras cíclicas y cadenas laterales nitrogenadas, y unidades de carbohidratos.

[5] Un "sistema" se define como un conjunto de componentes que se interrelacionan o actúan juntos, formando un todo unificado.

[6] El término "comunidad biótica" se emplea para designar todos los grupos de individuos de cualquier especie que ocupan una cierta área.

químicos.

Generalmente, cuando el hombre interviene en un ecosistema lo simplifica, reduciendo el número de componentes. En tales intervenciones reemplazamos miles de especies de plantas y animales presentes en los ecosistemas por monocultivos, o por infraestructura antrópica (carreteras, edificios). Al reducir la biodiversidad, las especies remanentes son vulnerables al ataque de especies invasoras no deseadas (ej.: malezas, plagas).

En rigor, el ecosistema es un sistema abierto que permite la entrada y la salida de materia y energía, aún cuando en algunos casos estos flujos son relativamente pequeños en comparación con las cantidades que se reciclan al interior de éstos. Los flujos de energía y materiales de entrada y salida son mayores a medida que la actividad metabólica, dentro del ecosistema, aumenta, o cuando el desequilibrio entre organismos autótrofos y heterótrofos es muy grande.

En la Naturaleza, siempre que un objeto se mueve, se calienta o se enfría, o sufre alteraciones químicas, hay intercambio de energía. La energía se define como la capacidad para hacer trabajo y su comportamiento está descrito por las leyes de la termodinámica. En forma muy simplificada:

- La primera ley establece que la energía puede ser transformada de un tipo a otro, pero no se crea ni se destruye.
- La segunda ley plantea que ningún proceso de transformación de energía ocurre espontáneamente, a menos que, haya una degradación de la energía de una forma concentrada a una forma dispersa.

Así, el calor presente en un cuerpo se dispersará espontáneamente hacia sus entornos más fríos. Una fracción de la energía se convierte en energía calórica no utilizable, por lo que ninguna transformación espontánea de energía tiene una eficiencia 100%. La entropía es una medida de la energía no disponible resultante de las transformaciones, y es un índice del desorden asociado con la degradación de la energía*. Los organismos, los ecosistemas y la biosfera entera, poseen la característica esencial de que pueden crear y mantener un alto grado de orden interno (es decir, una baja entropía).* La baja entropía se logra a través de una efectiva disipación de la energía de gran calidad (luz, enlaces químicos) hacia energía de baja calidad (ej.: calor).

En el ecosistema, el "orden" dentro de una compleja estructura viviente, se mantiene gracias a la respiración de la comunidad que "bombea" continuamente el desorden hacia fuera. En otras palabras, los ecosistemas y organismos son sistemas termodinámicamente abiertos, que intercambian continuamente materia y energía con el medio para reducir su propia entropía interna e incrementar la externa:

Es evidente que la cadena trófica constituye la vía por la que circula la energía y los materiales, desde su fuente primaria (es decir, energía solar y $CO_2$ atmosférico) hacia los diferentes compartimentos biológicos que conforman un ecosistema. En cada nivel trófico, una parte importante de la energía recibida se disipa en diferentes procesos físicos y químicos que forman parte del metabolismo de las especies,

quedando sólo una pequeña fracción incorporada en los nuevos materiales almacenados.

A modo de ejemplo ilustrativo del flujo energético, consideremos una planta que recibe 1000 calorías de energía lumínica, la mayor parte de la cual se refleja o transmite a través del tejido sin ser absorbida. Una gran fracción de la energía absorbida es almacenada en forma de calor y utilizada en la evaporación del agua de las hojas y otros procesos físicos, tales como el transporte hídrico dentro de la planta. El resto se utiliza en los procesos vitales, quedando un equivalente a 5 calorías almacenadas en el tejido como material rico en energía. Este constituye un potencial energético adecuado para la alimentación de otros animales. Aquel herbívoro, por ejemplo un venado, que coma dicha planta que contiene 5 calorías de energía alimenticia, gastará el 90% de la energía recibida para mantener su metabolismo y sólo convertirá 0,5 calorías en nuevo material corporal. A su vez, el carnívoro que se alimente de aquel herbívoro ocupará sólo una pequeña fracción de la energía obtenida, en un nuevo peso corporal (en este caso menos de 0,05 calorías). De este modo, la energía química aprovechable en los procesos vitales, va disminuyendo a medida que se asciende en la cadena trófica.

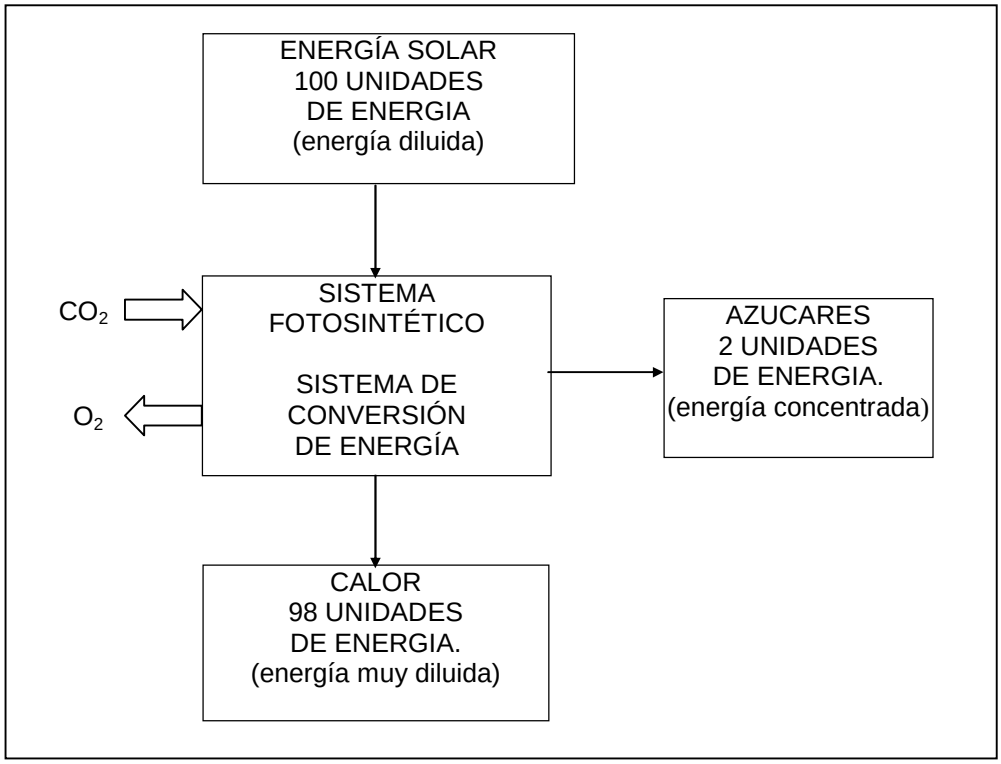



**FIGURA 2.2: LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS**

En los ecosistemas terrestres y acuáticos, se requiere de gran producción primaria para mantener una proporción pequeña de depredadores, resultando una distribución piramidal de la tasa de producción. El hombre tiene la ventaja de que puede ocupar posiciones como consumidor primario, secundario o terciario en la cadena alimenticia, lo que le confiere una mayor capacidad para obtener los recursos energéticos y materiales para su funcionamiento fisiológico.

El origen y la calidad de la energía disponible, determinan, en mayor o menor medida, los tipos y cantidad de organismos vivos, las funciones y el estilo de vida de los seres humanos. Los ecosistemas son impulsados por dos fuentes básicas de energía: energía solar y energía química (es decir, oxidación de compuestos orgánicos, reacciones nucleares, reacciones exotérmicas). De acuerdo a la fuente de energía que los impulsa, los ecosistemas pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ***Ecosistemas naturales impulsados por el Sol***

  Constituyen el módulo básico de sostén de vida en la Tierra. El flujo energético medio anual es del orden de 0,3 $W/m^2$. Este flujo energético, representa la magnitud de trabajo potencial o real que hay en una unidad de área del ecosistema y, también, la cantidad de entropía que debe ser disipada para que el sistema mantenga su funcionamiento. Corresponden a esta categoría de ecosistema: los océanos abiertos, las grandes extensiones de bosques y praderas, los amplios y profundos lagos, en donde la energía solar directa constituye la principal fuente de energía, existiendo otros factores que limitan el desarrollo de la vida como, por ejemplo, escasez de nutrientes o agua. En general disponen de poca energía y su productividad es reducida.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por otras fuentes naturales de energía***

  Estos son sistemas naturalmente productivos, que no sólo tienen una alta capacidad para sostener la vida, sino que, producen un exceso de materia orgánica que se exporta a otros sistemas o se almacena. El flujo energético anual medio es del orden de 3 $W/m^2$. Un estuario es un buen ejemplo de este tipo de ecosistemas, en donde, además de la energía solar directa, se cuenta con la energía de las olas, mareas y corrientes, que permiten reciclar parcialmente los nutrientes minerales, transportan alimentos y desechos, permitiendo a los organismos llevar a cabo una conversión de energía solar más eficiente. Estos subsidios energéticos pueden tener muchas otras formas, tales como la lluvia y el viento en un bosque tropical, o la materia orgánica y los nutrientes provenientes de las hojas muertas recibidos en un pequeño lago desde una vertiente.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por el Hombre***

  La agricultura, la acuicultura y la silvicultura son claros ejemplos de esta categoría. La fuente primaria de energía para el desarrollo de la vida en tales

ecosistemas sigue siendo el Sol, pero con un considerable aporte de energía entregada por el hombre. Los flujos energéticos son del orden de 5 W/$m^2$ . Se obtienen grandes rendimientos en los cultivos alimenticios mediante los aportes de combustibles, energía mecánica animal, riego, fertilización, selección genética y control de plagas, todos los cuales representan energía adicional aplicada directa o indirectamente. Tomando las palabras del ecólogo H.T. Odum *los alimentos y fibras obtenidos de la producción agrícola y forestal se hacen en parte, de petróleo*.

- ***Ecosistemas urbano-industriales impulsados por combustibles***

  La "obra maestra de la Humanidad". La energía potencial altamente concentrada de los combustibles reemplaza en gran medida a la energía solar, con flujos energéticos en el rango 10-400 W/$m^2$. Una ciudad como Tokio, tiene una densidad de consumo energético del orden de 400 W/$m^2$ (cifra comparable con la energía solar que llega a la superficie terrestre: 130-300 W/$m^2$), y el promedio para la Cuenca Industrial del Río Rin de 10 W/$m^2$. En su extremo más drástico, ello representa una seria anomalía del desarrollo social moderno, ya que el complejo urbano-industrial se transforma en un verdadero parásito de los otros ecosistemas, tomando de ellos los materiales y combustibles, lo que genera nuevas riquezas y nuevos residuos. Si se lograra utilizar en forma concentrada la energía solar directa en los centros urbanos, para suplir sus diferentes requerimientos energéticos y materiales primarios, y reemplazar parcialmente los combustibles fósiles y la importación de alimentos desde las zonas rurales, ello tendría un efecto global beneficioso para la Humanidad y su entorno natural.

Aparte de la distribución de energía en la cadena trófica, es interesante revisar el flujo de materia, particularmente de aquellos compuestos que por sus características químicas tienden a concentrarse en cada eslabón de la cadena alimenticia. Un ejemplo ilustrativo es el caso del DDT utilizado para controlar las poblaciones de mosquitos en los humedales del Sur de EEUU, durante varios años. El DDT, además de ser altamente tóxico, es liposoluble, por lo que tiende a acumularse en los tejidos grasos. A pesar de que el DDT se aplicó en dosis inferiores a los niveles de toxicidad aguda para plantas, peces y otros animales, los residuos venenosos de DDT persistieron en el ecosistema por largos períodos, lo que permitió su acumulación en los distintos niveles tróficos. El DDT se adsorbió en los detritos y se acumuló en los detritívoros, peces pequeños y depredadores de mayor tamaño. Como resultado, la concentración de DDT mostró un significativo aumento a mayores niveles de la cadena trófica, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

La amplificación biológica es característica de muchos plaguicidas, particularmente de aquellos basados en compuestos organoclorados. El DDT fue prohibido a fines de la década de los 70, cuando se comprobó su efecto negativo sobre las aves (alteraciones al metabolismo del calcio) y el peligro potencial sobre la salud humana.

**TABLA 2.1: CONCENTRACIÓN DE DDT EN DISTINTOS NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA**[7]

| NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA | CONCENTRACIÓN DE DDT (MG DDT / KG PESO SECO DE ORGANISMOS) |
|---|---|
| Agua (mg/litro agua) | 0,00005 |
| Plancton | 0,04 |
| Carpita plateada | 0,23 |
| Lucio pequeño (depredador) | 1,33 |
| Pez aguja (depredador) | 1,33 |
| Gaviotín (depredador de animales pequeños) | 3,91 |
| Gaviota (carroñera) | 6,00 |
| Cuervo marino | 22,8 |
| Cormorán (depredador de peces mayores) | 26,4 |

## 2.4) EQUILIBRIOS EN UN ECOSISTEMA

Los ecosistemas están sujetos a constantes estímulos "perturbadores", tales como: cambios climáticos, variaciones en la humedad, temperatura, radiación solar; además los organismos crecen y a su vez son devorados por otros, varían los índices de fertilidad, existen migraciones, el suelo pierde o recibe nutrientes, etc.. A pesar de estos cambios constantes, los ecosistemas presentan un cierto nivel de estabilidad, ya sea resisten las tensiones del medio, o se recuperan con rapidez de una perturbación. En todos los ecosistemas intervienen un conjunto de factores opuestos que se conjugan para mantener un equilibrio dinámico, donde los organismos vivos juegan un papel fundamental. A nivel del ecosistema existen, entre otros, subsistemas microbianos que regulan el almacenamiento y la liberación de nutrientes; y subsistemas del tipo depredador-presa que controlan las poblaciones. Se ha observado que mientras mayor sea la biomasa presente y su diversidad, mayor es su nivel de estabilidad frente a diferentes perturbaciones.

Los flujos de materia y energía en los ecosistemas constituyen también flujos de información química y física entre las partes constituyentes, análogos a los mensajeros nerviosos y hormonales de los organismos superiores. Estos flujos están organizados de modo que regulan el sistema como un todo, otorgándole un cierto grado de estabilidad. El mecanismo de regulación dominante que se observa en los sistemas naturales, corresponde a un control con retroalimentación negativa, tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.3.

[7] Datos citados por E.P Odum *op.cit.*

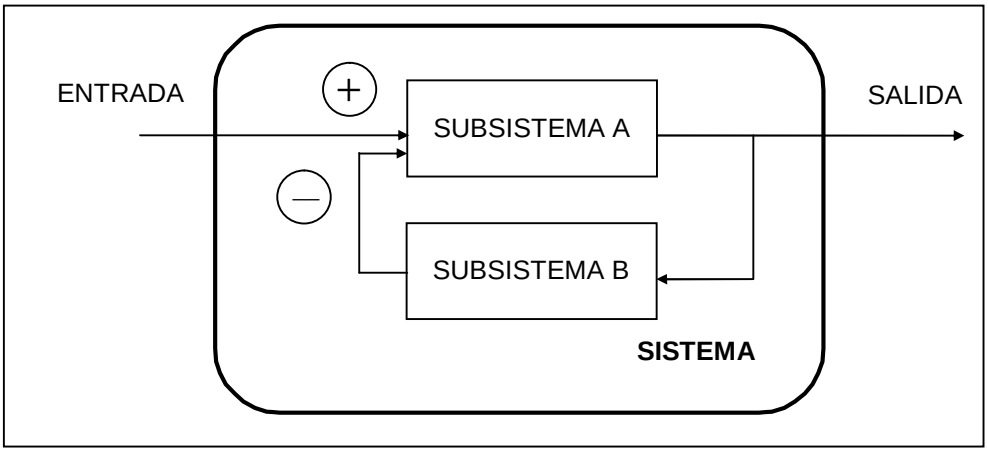



**FIGURA 2.3: CONTROL RETROALIMENTADO EN ECOSISTEMAS**

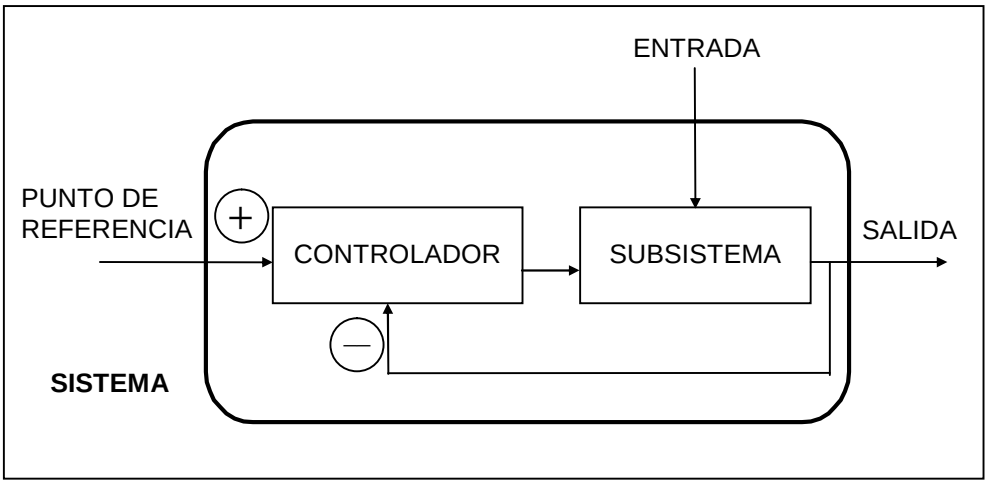



**FIGURA 2.4: CONTROL HOMEOSTÁSICO EN LOS ORGANISMOS**

En este caso, los mecanismos de control son internos y difusos, con interacciones entre los subsistemas primarios y secundarios. Además de este mecanismo, la estabilidad de los ecosistemas se mantiene gracias a una redundancia en los componentes funcionales; es decir, más de una especie o componente es capaz de ejecutar una función determinada. Por ejemplo, si existen varias especies autotróficas, con diferentes temperaturas óptimas, la tasa de fotosíntesis en la comunidad puede mantenerse relativamente estable frente a cambios en la temperatura.

En los seres vivos, el mecanismo de regulación retroalimentado, presenta un controlador externo, que tiene un punto de referencia previamente especificado [8].

En los ecosistemas, el tamaño de las poblaciones y las proporciones entre ellas muestran oscilaciones aún en aquellos sistemas con mayores niveles de estabilidad. Si en un ecosistema hay suficiente alimento y no existe depredación, una bacteria que se duplique cada 20 minutos, daría origen a $10^{43}$ bacterias en menos de dos días. En general, todas las especies tienen un gran potencial biótico, es decir, pueden desarrollarse rápidamente si las condiciones en el ecosistema favorecen su crecimiento. Sin embargo, existen presiones ambientales que inhiben el potencial de crecimiento de las especies.

El nivel poblacional de una especie en cualquier ecosistema está controlado por los elementos esenciales para la vida (es decir, nutrientes y factores físicos). Aquellos elementos que se encuentren muy cercanos a los límites de tolerancia, se constituyen en factores limitantes. Los límites de tolerancia incluyen un nivel mínimo y máximo para cada factor relevante.

Entre los factores físicos ambientalmente importantes en tierra, se incluyen: la luz, la temperatura, la humedad, el pH, los nutrientes, el espacio disponible y el viento. En el ambiente marino, se deben considerar: la luz, la temperatura, el oxígeno, el pH, los nutrientes, la salinidad y las corrientes marinas.

La temperatura es un factor ambiental de máxima importancia. Existen especies de bacterias y algas capaces de sobrevivir a niveles de hasta 80-88ºC, mientras que los peces e insectos más resistentes, pueden soportar hasta 50ºC. Algunos microorganismos pueden soportar niveles muy bajos de temperatura (decenas de grados bajo cero). Las especies acuáticas presentan rangos de tolerancia a la temperatura más estrechos que las especies terrestres. La temperatura suele ser causa de zonificación y estratificación en los medios acuáticos y terrestres. Un fenómeno interesante es el aletargamiento o inhibición presentado por organismos sometidos a un nivel constante de temperatura. Parece existir un efecto estimulante en los cambios de temperatura dentro de los rangos de tolerancia.

La luz es un factor ambiental vital, que juega un papel fundamental en la fotosíntesis y en la vida de los animales. Desde el punto de vista ecológico, interesan la longitud de onda, así como la intensidad y duración de la luz, existiendo niveles de tolerancia máximos y mínimos en distintas especies.

[8] En biología los mecanismos de control retroalimentado se denominan mecanismos homeostásicos.

El factor biológico de resistencia ambiental más importante lo constituyen las presiones de depredación y competencia, aún cuando ellas no son las únicas formas de interacción entre dos especies. La ***competición*** es una interacción en que dos o más organismos tratan de ganar control sobre un recurso limitado.

La ***depredación*** constituye una parte integral del funcionamiento de todo ecosistema, ya que los heterótrofos están obligados a comer para sobrevivir. En ecosistemas estables, el crecimiento y la depredación están equilibrados de tal modo que todas las especies tienen poblaciones viables. La población de un herbívoro está regulada tanto por la disponibilidad de alimento (hierbas), como por el tamaño y vitalidad de la población depredadora. La abundancia de hierbas depende de los factores que afectan la fotosíntesis (luz, agua, nutrientes), y de voracidad de la población de herbívoros. A su vez, la población de depredadores está regulada por el tamaño y vitalidad de la población de herbívoros.

La depredación también constituye una presión favorable en la selección natural de la especie presa, ya que los más aptos tienen mayores posibilidades de ejercer acciones defensivas más efectivas y sobrevivir.

Otras interacciones de interés entre especies incluyen:

***Amensalismo***: Una especie inhibe el crecimiento de otra, sin que ésta le afecte.

***Parasitismo***: Es un caso particular de depredación, en que el depredador es mucho más pequeño que la presa, y obtiene su alimento al consumir el tejido o el suministro de alimento de un huésped.

***Comensalismo***: Una especie saca provecho de un huésped sin que este último sea afectado.

***Protocooperación***: Ésta es una relación favorable entre dos especies, pero no es obligatoria. Por ejemplo, una especie puede servir de vehículo de transporte, mientras que la otra aporta capacidad defensiva frente a depredadores.

***Mutualismo***: Es otro tipo de interacción benéfica y necesaria para ambas partes. En muchos casos, existe una dependencia directa, donde ambos organismos deben crecer juntos para sobrevivir.

## 2.5) LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Tanto la estructura física como la composición química de la Tierra están en constante cambio. Las diferentes placas de la corteza terrestre se mueven en procesos a gran escala, extremadamente lentos, con tiempos característicos del orden de cientos de miles de años o más, cuyas manifestaciones actuales se traducen en erupciones volcánicas, formación de nuevos volcanes y terremotos. Por otra parte, los diferentes compuestos químicos que forman el planeta sufren reacciones químicas, cambios de fase y transporte de una región a otra. El flujo de materiales, entre los que se incluyen los componentes del protoplasma, tiene lugar a través de los diferentes comportamientos del ambiente físico y biológico, en rutas más o menos circulares denominados **ciclos biogeoquímicos**. La atmósfera, los océanos (parte de la hidrósfera) y la corteza terrestre son los principales compartimentos que sirven de reserva para los materiales esenciales para la vida en la Tierra. En dichos compartimentos, los diferentes elementos se encuentran en grandes cantidades (del orden de miles de millones de toneladas) y sus tiempos de residencia pueden ser de unos pocos días (ej. el agua en la atmósfera) hasta miles o millones de años (ej. los carbonatos en el fondo de los océanos).

El agua participa como vehículo de materia y energía, ya que sus propiedades químicas y termodinámicas le confieren un papel fundamental en los procesos naturales. Este compuesto está en continuo movimiento entre la atmósfera, los océanos y los continentes, permitiendo el transporte rápido de energía calórica y de compuestos químicos. El transporte de materiales entre la atmósfera y los océanos se basa en procesos de evaporación, precipitación, arrastre y depositación de polvos y aerosoles. Mecanismos físicos similares permiten el intercambio de materia entre la atmósfera y el suelo. Por su parte, los ríos transportan sólidos en suspensión y compuestos disueltos hacia el mar, donde se integran a los sedimentos aquellos compuestos insolubles. Los compuestos de la corteza se exponen al suelo en los levantamientos producidos por los terremotos u otros movimientos de tierra, mientras que las erupciones volcánicas aportan materiales que se encuentran en el manto terrestre.

Es importante recalcar aquí que la actividad biológica juega un papel fundamental en la dinamización de los ciclos biogeoquímicos. Como se verá en los párrafos siguientes, los microorganismos, las plantas y los seres heterótrofos participan activamente en los ciclos asociados al oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre y fósforo.

Dichos procesos naturales han ocurrido desde mucho antes de la aparición del hombre. La actividad humana puede causar cambios en la velocidad de algunos de estos procesos, dinamizando cambios desfavorables para su propia existencia. Por ejemplo, el incremento de las emisiones de $CO_2$ debido a la combustión de petróleo, gas, leña, carbón y otros combustibles, sumado a la disminución de la biomasa fotosintética, parece ser responsable del significativo aumento de la concentración de $CO_2$ en la atmósfera. Dentro del contexto de este trabajo, es importante conocer los ciclos biogeoquímicos más relevantes. A continuación se

presenta una breve descripción de los ciclos del agua, el oxígeno, el carbono, el nitrógeno y el azufre, ya que estas se encuentran mayoritariamente presentes en los seres vivos.

### 2.5.1) Ciclo Hidrológico

El agua tiene una importancia fundamental en el desarrollo de la vida en el planeta. Cubre el 70% de la superficie, y sus propiedades controlan las condiciones climáticas que hacen factible la vida. Es uno de los solventes más poderosos que existen, y es uno de los vehículos de transporte de materiales más importante, tanto dentro de los seres vivientes, como en el entorno físico. Además, el agua posee un alto calor de vaporización (del orden de 2260 (kJ $kg^{-1}$)) y calor específico (4,2 (kJ $kg^{-1}$ $K^{-1}$)), que la transforman en un vehículo de transporte de energía de importancia fundamental en el control climático terrestre.

Las fuerzas gravitacionales y la energía solar constituyen las principales fuerzas motrices del ciclo hidrológico. La gravedad afecta la circulación de los ríos y aguas subterráneas, mientras que el resto del ciclo hídrico, es determinado por la energía solar. La absorción de dicha energía genera evaporación de las aguas superficiales, tanto continentales como oceánicas. Además, una pequeña fracción de la energía solar incidente, genera los vientos y las corrientes, que ayudan a la circulación de la atmósfera y las masas de agua.

La energía absorbida a la forma de calor latente durante la evaporación, es liberada durante la condensación, por lo que estos flujos hídricos son también vehículos de transporte de energía desde una región a otra. El efecto neto de esta transferencia de energía es una reducción de las diferencias de temperatura entre las diferentes zonas de la Tierra.

Otro efecto adicional del ciclo hidrológico, deriva de la gran capacidad solvente del agua. La lluvia absorbe aquellos compuestos solubles presentes en la atmósfera, tales como: $O_2$, $N_2$, $CO_2$ y óxidos de S y N. Esto último puede incrementar significativamente la acidez de las lluvias. A su vez, la escorrentía debida a las precipitaciones, disuelve los compuestos solubles del suelo y las rocas, proceso que es facilitado a bajo pH. Como resultado de esto, la escorrentía que llega a los ríos, lagos y mares, es rica en compuestos disueltos, que luego pueden formar compuestos insolubles, y precipitar o sufrir nuevas transformaciones químicas.

Los aerosoles de agua de mar generados por acción del viento y las olas, son arrastrados por los vientos tierra adentro, donde son depositados por acción de las lluvias o la nieve o como depositación seca, representando una importante fuente de sodio y cloro.

Las tablas siguientes muestran las reservas de agua en la Tierra, así como los flujos anuales más importantes. Se observa que existe un flujo de agua neto desde los océanos a la tierra (equivalente a 46 $10^{12}$ $m^3$/año), el que retorna al mar vía los ríos y acuíferos subterráneos. El tiempo de residencia medio del agua en la atmósfera es del orden de 8 a 9 días, mientras que en el mar es del orden de 4000 años. Es importante considerar que el agua fresca, incluyendo aquella

existente en los polos, glaciares, acuíferos subterráneos, humedales, ríos, lagos y otras fuentes superficiales de agua dulce, corresponde al 2,69% del total existente en la Tierra.

**TABLA 2.2: RESERVAS DE AGUA**

| **LUGAR** | **$10^{15}$ $m^3$** | **%** |
|---|---|---|
| Océanos | 1350 | 97,31 |
| Polos y glaciares | 30 | 2,16 |
| Acuíferos subterráneos | 7 | 0,50 |
| Lagos, ríos, humedales y otros | 0,4 | 0,029 |
| Atmósfera | 0,01 | 0,001 |

**TABLA 2.3: FLUJOS HÍDRICOS**

| **FLUJOS** | **$10^{12}$ $m^3$ / año** | **%** |
|---|---|---|
| Precipitaciones sobre los océanos | 410 | 79,15 |
| Precipitaciones sobre los continentes | 108 | 20,85 |
| | | |
| **Total Precipitaciones** | **518** | **100,00** |
| | | |
| Evaporación en los océanos | 456 | 88,03 |
| Evapotranspiración (desde los continentes) | 62 | 11,97 |
| | | |
| **Total Evaporación** | **518** | **100,00** |

### 2.5.2) Ciclo del Oxígeno

El oxígeno se encuentra presente en todo el ámbito terrestre. Es un importante componente de la corteza terrrestre, donde representa un 28,5% en peso, formando silicatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos y óxidos metálicos, químicamente estables. En el sistema hidrológico forma parte de la molécula de agua y también está como $O_2$ disuelto. Finalmente, la atmósfera contiene un 23,2% en peso de oxígeno, principalmente a la forma de $O_2$.

El $O_2$, tanto atmosférico como disuelto en agua, es altamente reactivo, participando en los procesos de oxidación asociados a los ciclos geoquímicos del carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre y fierro.

La mayor parte del $O_2$ es producido por acción de la **fotosíntesis** que ocurre en presencia de luz:

$$n\,CO_2 + n\,H_2O \xrightarrow{\text{LUZ, CLOROFILA}} n\,O_2 + (CH_2O)_n$$

A través de este proceso, las plantas verdes y las algas absorben energía lumínica y la convierten en energía química, almacenada en los enlaces de los compuestos orgánicos que se forman. Por ejemplo, para generar un mol de glucosa mediante fotosíntesis, se requieren 2880 kJ a 25$^{o}$C y 1 atm. Las plantas verdes contienen moléculas de clorofila que son capaces de absorber luz visible, principalmente en el espectro del rojo y el azul.

Adicionalmente, una pequeña cantidad de oxígeno se forma por fotodisociación del agua en las regiones superiores de la atmósfera, debido a la acción de los rayos ultravioleta (UV). La radiación UV también está involucrada en la conversión del $O_2$ a ozono ($O_3$), en la estratósfera. El ozono tiene una gran capacidad para absorber la letal radiación UV, impidiendo que ésta alcance la superficie terrestre.

El $O_2$ participa en todas las reacciones de **oxidación**, tanto aquellas que ocurren por procesos químicos espontáneos, como debido a la acción respiratoria de los organismos vivientes, por ejemplo:

$$(CH_2O)_n + n\,O_2 \longrightarrow n\,CO_2 + n\,H_2O$$

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

$$S^{=} + O_2 \longrightarrow SO_2$$

$$SO_2 + O_2 \longrightarrow SO_4^{=}$$

Existe suficiente evidencia que demuestra que la concentración de $O_2$ en la atmósfera se ha mantenido constante por millones de años, lo que refleja un estricto equilibrio entre las tasas de consumo y de formación de $O_2$. Al parecer existen mecanismos de regulación de acción rápida, que permiten mantener el nivel de oxígeno a los niveles actuales. Dicho mecanismo de control retroalimentado, está ligado, probablemente, al ciclo del carbono y a la cantidad de materia orgánica que es incorporada a los sedimentos oceánicos. Este fascinante aspecto se discute más extensamente en la sección sobre la Teoría de Gaia.

### 2.5.3) Ciclo del Carbono

El 99% del carbono del planeta se encuentra presente en las rocas a la forma de carbonato (normalmente, como $CaCO_3$) o como carbono orgánico disperso. El 1% restante se encuentra presente en: la atmósfera, los seres vivos, los combustibles fósiles y compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos en agua. Los organismos vivientes están compuestos principalmente de agua y de una amplia gama de compuestos orgánicos.

El carbono acompaña estrechamente al ciclo del oxígeno en los procesos fotosintéticos y en los procesos de oxidación de materia orgánica, ya sea por la combustión o por actividad biológica.

El $CO_2$ generado por la oxidación de compuestos orgánicos se disuelve fácilmente

en agua. Más del 98% del $CO_2$ se encuentra disuelto en los océanos (como $HCO_3^-$ y $CO_3^=$), mientras que el 2% restante se mantiene en la atmósfera, donde a fines del siglo XX alcanzaba una concentración del orden de 350 ppm (mostrando un significativo incremento en los dos últimos siglos):

$$CO_{2\ (disuelto)} + HO^- \longleftrightarrow HCO_3^- \longleftrightarrow H^+ + CO_3^=$$

La proporción en que se encuentran estos compuestos depende fundamentalmente del pH de la solución. La mayoría de los océanos tiene un pH entre 8 y 8,3, y en promedio, cerca de 13% de la mezcla está como $CO_3^=$. En las capas oceánicas superficiales, existe una gran actividad fotosintética, con un alto consumo de $CO_2$, por lo que la reacción tiende a desplazarse hacia la izquierda para restaurar el equilibrio químico. Por otra parte, en las profundidades marinas, existe una producción neta de $CO_2$ debido a la actividad respiratoria y a los procesos de oxidación de la materia orgánica muerta. Bajo estas condiciones, la reacción se mueve hacia la derecha, incrementando la concentración de $CO_3^=$. Si el incremento de concentración del ion carbonato es significativo, y se excede el producto de solubilidad del $CaCO_3$ ($K_{PS}$= 4,47 $10^{-8}$ $M^{-1}$), se producirá una mayor precipitación de $CaCO_3$, principal constituyente de las conchas marinas.

La actividad fotosintética mantiene un fino balance en el ciclo del carbono y del oxígeno. A través de la fotosíntesis se forman los compuestos orgánicos, utilizando $CO_2$ como fuente de carbono. Los productores primarios en el océano son las algas unicelulares a la deriva (llamadas fitoplancton), las que sirven de alimento al zooplancton. A su vez, ambos son el alimento de los organismos acuáticos superiores (necton y bentos). Así, el carbono se mueve continuamente desde la atmósfera hacia la cadena alimenticia, a través de la fotosíntesis, retornando a la atmósfera durante la respiración y oxidación de la materia orgánica muerta. Una pequeña parte de la materia orgánica se deposita en los sedimentos, junto con los carbonatos insolubles.

Las principales reservas de carbono y los flujos del ciclo se presentan en la Tabla siguiente:

**TABLA 2.4: RESERVAS DE CARBONO**

| **LUGAR** | **$10^{12}$ ton C** | **%** |
|---|---|---|
| Rocas, inorgánico | 26.000 | 76,37 |
| Rocas, orgánico disperso | 8.000 | 23,50 |
| Agua, inorgánico y orgánico | 38 | 0,11 |
| Fósiles | 4 | 0,01 |
| Biomasa, total | 2 | - |
| Atmósfera, CO, $CO_2$, $CH_4$ | 0,8 | - |

**TABLA 2.5: FLUJOS DE CARBONO**

| FLUJO | $10^9$ ton C / año |
|---|---|
| $CO_2$ generado por respiración de organismos marinos | 97 |
| $CO_2$ generado por oxidación de organismos muertos | 25 |
| $CO_2$ generado por respiración de organismos terrestres | 10 |
| $CO_2$ generado por combustión | 6 |
| $CH_4$ generado anaeróbicamente | 0,5 |
| C fijado por fotosíntesis marina | 100 |
| C fijado por fotosíntesis terrestre | 35 |
| C fijado a sedimentos marinos, como carbonato | 0,2 |

Cabe destacar que la acción microbial anaeróbica sobre diversos substratos orgánicos constituye otro vehículo de destrucción de material orgánico y transformación en carbono inorgánico. Dicha actividad biológica anaeróbica ocurre en los intestinos de los mamíferos, en los humedales, profundidades marinas y otras zonas anóxicas, contribuyendo a la generación de 500-1000 millones de toneladas de $CH_4$ anualmente, el que se oxida a $CO_2$ en la atmósfera. Se ha sugerido que este proceso juega un papel importante en los mecanismos biológicos que existen para la regulación del nivel de oxígeno en la atmósfera. Más aún, tanto el $CO_2$ como el $CH_4$ contribuyen en un 57% y 12% al efecto invernadero, respectivamente.

### 2.5.4) Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno a la forma de $N_2$ representa el 76% en peso de la atmósfera terrestre y constituye la principal reserva de nitrógeno en el planeta. Al contrario de otros elementos, el nitrógeno presente en el suelo proviene principalmente de la atmósfera. El $N_2$ tiene una baja reactividad química y sólo se oxida a altas temperaturas. El nitrógeno es un componente importante de los organismos vivientes, principalmente como $N^{-3}$, a la forma de grupo amino ($R\text{-}NH_2$) en los aminoácidos y proteínas. Desde el punto de vista bioquímico, pocos organismos pueden utilizar directamente el $N_2$ atmosférico. Sin embargo, existen varios puentes entre la comunidad biológica y el nitrógeno atmosférico. Las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, las bacterias y algas fijadoras de nitrógeno del suelo y el mar, y las fábricas de fertilizantes químicos construidas por el hombre en el presente siglo, transforman el $N_2$ en formas utilizables para los seres vivos. Entre estos agentes, los microorganismos juegan un importante papel en las complejas transformaciones químicas que caracterizan el ciclo geoquímico del nitrógeno, particularmente, en los procesos de asimilación, fijación, desnitrificación, nitrificación y amonificación, tal como se describe a continuación.

El $N_2$ atmosférico es transformado en $N^{-3}$ a través de la acción de microorganismos existentes tanto en el agua como en el suelo, en un proceso denominado **fijación del nitrógeno**. Existe una abundante comunidad de microorganismos capaces de fijar el $N_2$, entre ellas: bacterias aeróbicas (ej.

*Azotobacter sp., Thiobacillus sp.,* algas verde-azules), bacterias anaeróbicas (ej. *Clostridium sp., Desulfovibrio sp.,* bacterias fototróficas), bacterias en asociación simbiótica con: nódulos de leguminosas (ej. *Rhizobium sp.*), líquenes (ej. cianobacterias), etc. Los avances recientes en las técnicas de detección de presencia de organismos fijadores de $N_2$ han permitido revelar que hay fijación biológica de nitrógeno en los estratos autótrofos y heterótrofos de los ecosistemas, y en las zonas aeróbicas y anaeróbicas de los suelos y sedimentos acuáticos. Sólo los microorganismos anucleados más primitivos (procariotas), tienen la capacidad de fijación de nitrógeno (algunos de los cuales aparecieron sobre la Tierra hace 1500 millones de años). Resulta interesante constatar la alta eficiencia de fijación de $N_2$ que caracteriza a aquellos sistemas con asociación simbiótica, en comparación con los organismos no fototróficos de existencia libre. Por ejemplo, la capacidad fijadora de las bacterias en asociación con los nódulos de las raíces de leguminosas está en el rango 50-900 (kg N fijado/hectárea/año), mientras que las especies libres (ej. *Clostridium sp., Azotobacter sp.* ) fijan menos de 1 (kg N/hectárea/año). Al parecer, el nódulo radicular de tales plantas protege a los microorganismos del exceso de oxígeno, el cual es inhibidor de la fijación, y les proporciona la energía química necesaria; y en retorno la planta obtiene una cantidad de nitrógeno fácilmente asimilable. Esta actividad simbiótica ilustra un fenómeno de cooperación mutua, muy común en los sistemas naturales.

La fijación de $N_2$ en los océanos es relativamente baja, siendo las algas verde-azules las responsables de la casi totalidad de la actividad fijadora. Se estima que una gran parte de la fijación marina, ocurre en los arrecifes de coral y en las áreas litorales, en asociación simbiótica con algunas plantas acuáticas.

Las formas más comunes del nitrógeno del suelo que las plantas pueden utilizar directamente son el ion nitrito ($NO_2^-$), el ion nitrato ($NO_3^-$) y el ion amonio ($NH_4^+$). Estos compuestos del nitrógeno son asimilados por las plantas y entran en la cadena alimenticia heterotrófica, incorporándose en los procesos biológicos, tranformándose en aminoácidos y proteínas. Cuando los compuestos orgánicos nitrogenados son degradados bioquímicamente, se forman compuestos inorgánicos (principalmente $NH_3$ / $NH4^+$), los cuales son fácilmente asimilables por las plantas y por la mayoría de los microorganismos.

En presencia de oxígeno, un amplio grupo de procariotas que habitan en el suelo y las aguas dulces y marinas (ej. *Nitrosomonas sp., Nitrobacter sp, Nitrosococcus sp.*), obtienen su energía oxidando el $NH_4^+$ a través del proceso de **nitrificación,** produciendo nitrito y nitrato. El nitrato también es asimilado fácilmente por las plantas que lo vuelven a reducir a $N^{-3}$.

Muchos microorganismos poseen la capacidad de reducir los óxidos de N en condiciones anóxicas, donde dichos compuestos sustituyen al $O_2$ como aceptor terminal de electrones en la cadena respiratoria. Si la reducción continúa hasta la generación de gases de $N_2$ y $N_2O$, el proceso se denomina **desnitrificación**. Esta capacidad está difundida entre varios microorganismos que habitan en el suelo y el agua. Este proceso representa una vía a través de la cual el nitrógeno disponible en las aguas y el suelo, se pierde a la atmósfera. Estas pérdidas de N se suman a los óxidos de nitrógeno generados por la combustión de combustibles

fósiles, los que debido a su origen biológico, contienen N. Cabe destacar que más del 80% del nitrógeno que participa en las reacciones en la superficie terrestre y en los océanos, permanece reciclado y sólo el 20% se pierde a la atmósfera por denitrificación y evaporación. Es éste 20% el que se repone anualmente por fijación del $N_2$ atmosférico.

Además de estos procesos biológicos, el nitrógeno participa en reacciones químicas espontáneas que tienen lugar, principalmente, en la atmósfera. Aparte del $N_2O$ suministrado a la atmósfera por las reacciones de desnitrificación y la combustión de materia orgánica nitrogenada, otros óxidos se generan por oxidación directa del $N_2$ a altas temperaturas (por ejemplo, debido a los relámpagos o durante la combustión de combustibles fósiles):

$$N_2 + O_2 \longleftrightarrow 2\,NO$$

$$N_2 + 2\,O_2 \longleftrightarrow 2\,NO_2$$

El $N_2O$ es el más estable de los óxidos de nitrógeno y logra llegar a la estratósfera. Allí, la alta radiación UV es capaz de fotolizar dicha molécula y alrededor del 95% se transforma en $N_2$, mientras que el 5% pasa a NO. Este proceso ocurre a alturas superiores a 20 km. y las principales reacciones se pueden sintetizar:

$$N_2O \xleftrightarrow{h\nu} NO + N$$

$$N_2O \xleftrightarrow{h\nu} N_2 + O$$

$$N_2O + O \longleftrightarrow 2\,NO$$

El NO estratosférico es importante, ya que cataliza la descomposición del ozono en la alta estratósfera.

Finalmente, los óxidos gaseosos de nitrógeno, llamados comúnmente $NO_x$, sufren oxidación a nitrato, el cual es absorbido por el agua y cae a la superficie con la lluvia, reduciendo su pH.

Las principales reservas y flujos del ciclo de nitrógeno se muestran en las Tablas siguientes:

**TABLA 2.6: RESERVAS DE NITRÓGENO**

| **LUGAR** | **$10^9$ ton N** |
|---|---|
| Atmósfera, $N_2$ | 3.800.000 |
| Atmósfera, $NO_x$ | 1,30 |
| Océano, en biomasa | 0,50 |
| Océano, en compuestos disueltos | 300 |
| Terrestre, en biomasa | 3,50 |
| Terrestre, total en sedimentos, orgánicos e inorgánicos | 1.000.000 |

**TABLA 2.7: FLUJOS DE NITRÓGENO**

| FLUJOS | $10^6$ ton/año |
|---|---|
| $NO_x$ a la atmósfera, desnitrificación | 90 |
| $NO_x$ a la atmósfera, fuentes antrópicas | 50 |
| $N_2$ a la atmósfera, desnitrificación | 240 |
| Depositación de $NO_3^-$ en tierra | 70 |
| Depositación de $NO_3^-$ en océanos | 50 |
| Fijación antrópica de $N_2$ (fertilizantes sintéticos) | 80 |
| Fijación biológica de $N_2$ en tierra | 140 |
| Fijación biológica de $N_2$ en océanos | 30 |
| N fijado en sedimentos | 10 |

### 2.5.5) Ciclo del Fósforo

Los compuestos de fósforo presentan, en general, baja solubilidad y volatilidad. La mayor reserva de fósforo se encuentra en las rocas y otros depósitos formados durante millones de años de evolución geológica. Dichos depósitos se han ido erosionando en forma gradual, liberando compuestos de fósforo, principalmente ortofosfatos ($PO_4^{-3}$), hacia los ecosistemas. Una gran fracción de estos flujos de fosfato es lixiviada al mar, donde eventualmente se deposita en los sedimentos. Entre los compuestos inorgánicos típicos se encuentran: $Ca_3(PO_4)_2$ , $Al\ PO_4$ , $Fe\ PO_4$ . Las reservas y flujos de fósforo en la naturaleza se presentan en las Tablas siguientes:

**TABLA 2.8: RESERVAS DE FÓSFORO**

| LUGAR | $10^9$ ton P |
|---|---|
| Fósforo en Suelos | 200 |
| Rocas de Fosfato | 10-100 |
| Fosfato en Océanos | 120 |

**TABLA 2.9: FLUJOS DE FÓSFORO**

| FLUJOS | $10^6$ ton P / año |
|---|---|
| Fosfatos insolubles de ríos a océanos | 20 |
| Fosfatos solubles de ríos a océanos | 1 |
| Fósforo en partículas a la atmósfera | 3,3 |
| Fósforo en sedimentos marinos | 22 |
| Deposición de partículas sobre suelos | 3,2 |
| Deposición de partículas sobre océanos | 1,4 |
| Fósforo en aerosoles marinos | 0,3 |

Como se puede ver, los flujos geoquímicos de este elemento, dependen de la transferencia de material suspendido desde los ríos al mar. No existen compuestos de fósforo en la composición de la atmósfera, por lo que ésta sólo participa como medio de transporte de partículas con contenido de fósforo, arrastradas por el viento.

El fósforo es un componente clave del protoplasma de los seres vivos. Tal como se menciona más adelante, el fósforo forma parte de las moléculas de ATP, ADP y AMP, que son fundamentales en la transferencia de energía celular, y de las moléculas de ADN y ARN, constituyentes del material genético de las células. Normalmente, el fósforo es el factor limitante en la fertilidad de los suelos y de los ecosistemas acuáticos. Su baja solubilidad limita su disponibilidad como nutriente.

En los lagos, los niveles de nitrato y de fosfato son bajos, constituyéndose en los nutrientes limitantes para el crecimiento de las algas fotosintéticas. Se requiere 1 átomo de fósforo por cada 12-20 átomos de nitrógeno, para sostener una actividad biológica balanceada. Las fuentes antrópicas de P provienen de los vertidos de efluentes domésticos e industriales. En particular, los altos consumos de detergentes fosfatados pueden generar eutrofización en aquellos cuerpos de agua donde el fósforo es el reactivo limitante.

### 2.5.6) Ciclo del Azufre

A diferencia del nitrógeno, el azufre tiene su principal reserva en la corteza terrestre, con una pequeña pero importante fracción en la atmósfera. Sin embargo, existe una fuerte analogía entre el ciclo del azufre y aquél del nitrógeno, con respecto al papel jugado por los microorganismos. Ambos elementos están presentes en los seres vivos en su forma química más reducida (es decir, $N^{-3}$ y $S^{-2}$, formando grupos amino e hidrosulfuro, respectivamente). El azufre es un importante constituyente secundario de las proteínas, debido a su habilidad para formar enlaces S-S, lo que permite formar estructuras proteicas en gran escala y de formas tridimensionales especiales. Cuando la materia orgánica se descompone, el azufre proteico se transforma en $H_2S$:

$$R\text{-}SH \longrightarrow H_2S + RH$$

El $H_2S$ se genera principalmente en ambientes terrestres y en marismas, donde prevalecen condiciones anóxicas. Además, muchas especies de fitoplancton marino son capaces de producir dimetil sulfuro ($(CH_3)_2S$) y $H_2S$ a partir de la reducción de sulfatos presentes.

Ambos compuestos son volátiles y sufren una rápida oxidación espontánea en la atmósfera, donde se transforman en $SO_2$ y, eventualmente, en sulfato ($SO_4^{=}$):

$$H_2S \longrightarrow SO_2 \longrightarrow SO_3 \longrightarrow SO_4^{=}$$

La oxidación de los sulfuros también puede ocurrir en el suelo, los sedimentos y en medio acuático, a partir de procesos biológicos (ej.: bacterias tiobacilares).

La utilización del sulfato en las reacciones biológicas involucra un acoplamiento con el ciclo del carbono, donde el sulfato actúa como aceptor de electrones. El sulfato, al igual que el nitrato y el fosfato, son la principal forma química que es reducida por los organismos autótrofos e incorporada a las proteínas.

El principal compuesto de azufre en la atmósfera es el $SO_2$ , proveniente de fuentes naturales y antrópicas. El dióxido de azufre es generado naturalmente durante las erupciones volcánicas y durante la combustión espontánea de biomasa forestal. Las principales fuentes antrópicas son los procesos de combustión de combustibles fósiles y la refinación de minerales sulfurados. Ello constituye un flujo que permite reciclar el azufre desde las profundidades de la tierra a la atmósfera y su eventual depositación como sulfato.

**TABLA 2.10: RESERVAS DE AZUFRE**

| **LUGAR** | **$10^9$ ton S** |
|---|---|
| Rocas Sedimentarias | 8.000.000 |
| Atmósfera | 0,004 |

**TABLA 2.11: FLUJO DE AZUFRE**

| **FLUJO** | **$10^6$ ton S/año** |
|---|---|
| $SO_2$ a la atmósfera, origen antrópico | 78 |
| $SO_2$ a la atmósfera, origen natural | 10 |
| Sulfuros volátiles a la atmósfera | 16 |
| Sulfato a la atmósfera, fuente oceánica | 140 |
| Precipitación de sulfato atmosférico sobre los océanos | 160 |
| Precipitación de sulfato atmosférico sobre tierra | 84 |

## 2.6) NUEVOS CONCEPTOS SOBRE LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS: LA HIPÓTESIS DE GAIA

En las secciones anteriores ha quedado de manifiesto que los seres vivos participan activamente de los ciclos geoquímicos. La naturaleza física y química de la materia inerte está en constante cambio gracias a la acción de organismos que devuelven al medio nuevos compuestos y fuentes de energía. Un buen ejemplo de como los seres vivos modifican el medio físico, son los atolones de Coral del Pacífico, donde la actividad de animales y vegetales resulta en la formación de islas enormes, a partir de los materiales disueltos en el mar.

En las últimas décadas, se ha planteado que las condiciones en la Tierra son apropiadas para la vida, debido a que los mismos seres vivos han tenido la capacidad de regular tales condiciones a los niveles óptimos para asegurar el desarrollo de la vida sobre el planeta. A comienzos de los años 70, el científico

británico James Lovelock y otros colaboradores, entre los que destaca la microbióloga Lynn Margulis, desarrolló tal hipótesis motivado por la intrigante constancia de la composición de la atmósfera terrestre, a pesar de las diferentes perturbaciones en los flujos energéticos y materiales que han ocurrido en los millones de años transcurridos. El hecho de que la composición atmosférica y el medio físico de la Tierra sean bastante diferentes de las condiciones de los otros planetas del sistema solar, condujo al planteamiento que sostiene que los seres vivos han evolucionado con el medio físico para lograr un complejo sistema de control que mantiene las condiciones sobre la tierra favorables para la vida. Tal hipótesis se denomina **Hipótesis de Gaia** (diosa griega de la Tierra).

Lovelock estudió la composición química de la atmósfera en sus aspectos químicos y termodinámicos. Concluyó que, para mantener constante el metano atmosférico (cuya concentración es del orden de 1,7 ppm) ante la presencia de 21% de $O_2$, se requiere un flujo de $10^9$ ton $CH_4$/año y un flujo de $O_2$ de $4\times10^9$ ton $O_2$/año para oxidar el metano. Tales flujos son sólo posibles gracias a la actividad de los microorganismos. De acuerdo a estos científicos, casi todos los ciclos biogeoquímicos tienen un componente biológico fundamental. La participación de los microorganismos es parte integral de los mecanismos que regulan las condiciones de temperatura y pH que hay en la superficie terrestre. Según Lovelock, la continua actividad coordinada de las plantas y microorganismos permite reducir las fluctuaciones en composición, pH y temperatura que se producirían en ausencia de sistemas vivos altamente organizados.

Resulta interesante comparar las condiciones atmosféricas y de temperatura de Marte, Venus, la Tierra y una Tierra hipotética sin vida:

**TABLA 2.12: COMPOSICIÓN ATMÓSFERICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES**

| **COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA** | **MARTE** | **VENUS** | **TIERRA SIN VIDA (Hipotética)** | **TIERRA (Actual)** |
|---|---|---|---|---|
| $O_2$ en atmósfera | 0,13% | trazas | trazas | 21% |
| $N_2$ en atmósfera | 2,7% | 1,9% | 1,9% | 79% |
| $CO_2$ en atmósfera | 95% | 98% | 98% | 0,03% |
| Temperatura superficial °C | – 53 | 477 | 240-340 | 13 |

Se observa que la atmósfera de la Tierra inerte sería similar a la de Marte y Venus, con trazas de oxígeno. Más aún, las simulaciones demuestran que en esa Tierra inerte, el nitrógeno habría desaparecido de los mares, mientras que el metano, el hidrógeno y el amoníaco desaparecerían rápidamente. Las condiciones de la Tierra sin vida fueron estimadas de acuerdo al estado de equilibrio termodinámico que se lograría sin la intervención de los procesos biológicos.

En la Tierra viviente, tanto la atmósfera, como el suelo y los océanos, tienen composiciones químicas muy lejanas a las condiciones de equilibrio. En la

atmósfera coexisten compuestos altamente oxidantes como el $O_2$ y el CO, con compuestos altamente reductores como el $CH_4$, el $H_2$ y el $NH_3$, y compuestos de baja reactividad como el $CO_2$ y el $N_2$. Los gases oxidantes y los reductores tienden a reaccionar rápidamente entre sí, de forma muy enérgica. La presencia de los procesos biológicos permite mantener una situación de estado estacionario, lejano de las condiciones de equilibrio termodinámico. En otras palabras, la biósfera gasta la energía necesaria para mantener el sistema Tierra en una situación altamente inestable, lejos de los valores esperados del equilibrio químico. Quienes sostienen la Hipótesis de Gaia concluyen que la atmósfera de la Tierra no llegó a su composición actual gracias a la interacción de procesos físicos y químicos. Muy por el contrario, desde un principio los organismos desempeñaron un papel determinante en el desarrollo y regulación de un ambiente geoquímico favorable.

Del estudio de los diferentes procesos biogeoquímicos y del rol de la vida en mantener las condiciones estacionarias, se concluye que:

*El entorno de la superficie de la Tierra se puede considerar como un sistema dinámico, protegido contra las perturbaciones por eficaces mecanismos de retroalimentación*.

Frente a esta hipótesis, surge entonces la pregunta:

*¿Cuál es la función de cada gas en la atmósfera o de cada componente en el mar?*

Las respuestas fluyen en la misma dirección de aquella que se obtendría de la pregunta: ¿Cuál es la función de la hemoglobina o de la insulina en la sangre?.

Lovelock plantea que el $O_2$ es el gas dominante, aunque no sea el más abundante, y establece el potencial químico del planeta. Hace posible la combustión y las reacciones de oxidación fundamentales para sostener los procesos vivientes. ¿Porqué este gas tan importante se ha mantenido a un nivel de 21% de la atmósfera, prácticamente constante por millones de años? ¿Está regulado por algún sistema cibernético? ¿Qué factores han determinado que el punto de referencia al cual se debe mantener es 21%?

Durante varios cientos de millones de años, el nivel de $O_2$ debe haber sido bastante cercano al nivel actual; de otra manera, los animales e insectos voladores más grandes, no habrían podido existir. Andrew Watson de la U. de Reading, Inglaterra, demostró empíricamente que una concentración de $O_2$ sobre 25% en la atmósfera habría significado la combustión espontánea de toda la biomasa forestal del planeta, ante la mínima chispa volcánica. Según Watson, la probabilidad de incendios forestales depende críticamente de la concentración de $O_2$, y un simple aumento de 1% en su concentración atmosférica incrementa la probabilidad de incendios espontáneos al 60%. A un nivel de 25% de $O_2$, hasta el detritus húmedo de un suelo tropical se incendiaría completamente con un relámpago. Bajo esas condiciones, una vez en llamas, las selvas se quemarían totalmente, tal como se quemaría toda la vegetación y material orgánico sobre la

superficie terrestre. El nivel actual de 21%, parece representar un saludable equilibrio entre el riesgo y el beneficio. Los incendios ocurren con una frecuencia aceptable frente a las ventajas que ofrece una energía de alto potencial. El metano parece jugar un papel importante en el proceso de regulación del nivel de $O_2$ en el aire, y su generación y oxidación proceden con suficiente rápidez, como para ser parte de un circuito de retroalimentación en el sistema de regulación del oxígeno. Tanto la generación de $O_2$ como de $CH_4$ son debidas, principalmente, a la acción de organismos vivientes.

Otro aspecto interesante que la Hipótesis de Gaia ha enfrentado se refiere al control del clima en la Tierra. Se sabe que, desde los orígenes de nuestro planeta, el Sol se está calentando exponencialmente y lo seguirá haciendo por millones de años más. Sin embargo, la velocidad de aumento de la producción de energía solar es tal que ésta ha aumentado entre 30 y 50% desde que aparecieron las primeras formas de vida sobre la Tierra. Las estrellas tienen la propiedad de incrementar su producción de calor y luz, a medida que envejecen. Obviamente, el clima al inicio de la vida tenía que haber sido apropiado para el desarrollo de ésta, ni glacial, ni ardiente. Más aún, todo parece indicar que la temperatura de la superficie de la Tierra ha permanecido increíblemente constante desde tiempos remotos, cuando aparecieron las primeras formas de vida. Un aumento del 30% de la radiación solar habría resultado en una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Si la velocidad actual de aumento de la producción solar ha tenido lugar desde el comienzo de la vida ¿Porqué no estamos hirviendo ahora? Se ha propuesto que en tiempos remotos, la joven Tierra tenía suficiente amoníaco capaz de absorber la radiación solar infrarroja, actuando como una manta que mantenía caliente el planeta a pesar de que el Sol estaba más frío que hoy. Otros plantean que el alto contenido de $CO_2$ atmosférico en aquellos tiempos remotos tendría un efecto de calentamiento similar. El clima de la Tierra se encuentra en un estado estacionario, entre dos regímenes extremos: uno glaciar, el otro hirviendo, y sin embargo, la temperatura permanece casi constante. ¿No es aquello una prueba de que los microorganismos juegan un papel regulatorio al actuar sobre la composición de los gases trazas de la atmósfera (es decir, $CO_2$, $NH_3$, $N_2O$, $CH_4$) para mantener el balance térmico, a pesar de los cambios experimentados en la producción de energía solar?.

La Hipótesis de Gaia, considera el entorno físico y la biósfera como sistemas altamente integrados.

El ser humano tiene una reciente aparición en este escenario, pero su impacto sobre el entorno físico ha sido significativo. Somos actualmente más de 5 mil millones de individuos, junto a una plétora de especies subordinadas, que conforman los ganados y cultivos que requerimos para sobrevivir. Ello implica un creciente consumo de los recursos materiales y energéticos de la Tierra. Estamos incidiendo directamente en los ciclos biogeoquímicos, tal vez con impactos a nivel global, como lo sería la degradación de la capa de ozono y el incremento de la concentración de los gases invernadero. Si el impacto de la actividad humana sigue creciendo en intensidad y profundidad, se pueden generar nuevos fenómenos que minimicen el cambio, y se logre un nuevo nivel estacionario, cuyas condiciones ambientales podrían ser inapropiadas para la supervivencia del ser

humano.

La capacidad de autorregulación de la Tierra se demuestra al considerar que, aproximadamente cada 100 millones de años, ella recibe el impacto de enormes cuerpos celestes viajando a 70.000 km/h. La energía cinética de esos cuerpos es equivalente a la detonación de una veintena de bombas atómicas (similares a aquella lanzada en Hiroshima) por cada kilómetro cuadrado, si ella se distribuyera uniformemente por toda la Tierra. Se cree que hace 65 millones de años, uno de estos impactos causó la extinción de más del 60% de las especies que habitaban el planeta. Y sin embargo, el desarrollo de la vida continuó, amparado en las simples bacterias que siguen ordenando exitosamente la atmósfera terrestre, como lo han hecho por casi 2 mil millones de años. La Hipótesis de Gaia implica que la Tierra es un sistema cibernético natural, y debemos preservar los controles que permiten a la biósfera mantener condiciones ambientales estacionarias.

Por lo tanto, además de esforzarnos por reducir nuestro impacto sobre los ciclos biogeoquímicos, minimizando las emisiones de $SO_2$, $NO_x$ , $CO_2$ , CFC y otros contaminantes, debemos preservar la integridad del sistema de control regulatorio que hace posible la vida sobre la Tierra. Para ello, debemos descubrir cuales son los componentes que constituyen tal sistema de regulación planetaria. Un mamífero puede seguir viviendo si se le extirpa una mano, un brazo o unos cuantos dientes, pero morirá instantáneamente si se le extirpa el corazón, el cerebro, u otro órgano vital.

Tendremos que esperar que los avances en las ciencias fundamentales y aplicadas permitirán en un plazo no muy lejano, responder a las preguntas que nacen naturalmente de la hipótesis Gaia:

1.- ¿Cuáles son los órganos vitales de nuestra Tierra?
2.- ¿Cuáles son los sensores que permiten detectar las variaciones de temperatura y composición química en la atmósfera, las aguas y el suelo?
3.- ¿Cuáles son los mecanismos de transmisión de esta información a nivel planetario?, etc.

Para quienes deseen profundizar este tema, recomiendo el excelente texto de L.E. Joseph "GAIA: La Tierra Viviente", donde se presentan en forma sencilla, pero rigurosa, las recientes contribuciones en torno a esta interesante hipótesis. Obviamente, la publicación original de J. Lovelock es una lectura obligada.

En las secciones anteriores, ha quedado claramente demostrada la importancia del mundo microbiológico en el funcionamiento de la biósfera. Es el momento de hacer una pausa y revisar algunos conceptos de microbiología. En la próxima sección se resumirán aquellos fundamentos que nos permitan entender los procesos biológicos, dentro del contexto de la ingeniería ambiental.

## 2.7) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROBIOLOGÍA

La importancia de los microorganismos en el funcionamiento de los procesos naturales, ha sido señalada en párrafos anteriores. Desde que en 1675 Leeuwenhoek descubrió el mundo de los microorganismos, hasta la actualidad, se ha logrado comprender el funcionamiento de estos seres microscópicos, y utilizarlos para el beneficio del Hombre, tanto en el control de enfermedades, como en los procesos productivos. El mundo microscópico está compuesto de varios grupos distintos de organismos, que habitan en el suelo, el agua y el aire. Por ejemplo, el suelo fértil contiene una gran variedad de bacterias, así como de hongos, algas, protozoos y virus, que pueden alcanzar un total de mil millones de microorganismos por gramo de suelo.

La mayoría de los microorganismos son unicelulares, es decir, están compuestos de una sola célula. Algunos tienen características de células vegetales, otros de células animales, y otros con características mixtas. Una importante característica que diferencia a unos microorganismos de otros, es la organización de su material celular. A continuación se presenta una clasificación de los diferentes tipos de microorganismos, su estructura celular, y algunos conceptos de la química celular.

### 2.7.1) Tipos de Microorganismos

En términos generales, los organismos vivientes se pueden dividir en:

- Animales (heterótrofos).
- Vegetales (autótrofos).

Entre las formas evolutivamente superiores de vida, es posible distinguir claramente estos dos grandes Reinos. Pero muchas especies y variedades de los organismos inferiores, tales como bacterias, hongos, algas y protozoos más primitivos, no son tan especializadas. Existe una enorme y compleja interfase de seres con propiedades vegetales (ej.: algas verdes), con propiedades animales (ej.: protozoos) y mixtos (ej.: hongos). En la actualidad, algunos biólogos reconocen 5 reinos: Monera, Protista, Fungi, Animales y Plantas. El Reino Protista contiene a los organismos microscópicos: las bacterias, los protozoos y las algas.

Todos los organismos vivos poseen las siguientes características comunes:

- Capacidad de reproducción.
- Capacidad para consumir o asimilar nutrientes y transformarlos químicamente (metabolizarlos) para obtener energía y crecer.
- Capacidad para excretar los productos de desecho y disipar la energía residual.
- Capacidad para reaccionar frente a cambios en el entorno (irritabilidad).
- Susceptibilidad a la mutación.

La unidad estructural básica de los seres vivos es la ***célula***. En los seres unicelulares, la célula es el organismo propiamente tal, mientras que en los seres pluricelulares las células están integradas en un sistema o conjunto de sistemas que

forman el organismo vivo.

En el mundo microbiológico se encuentran organismos que están en la frontera entre lo inerte y lo vivo, como es el caso de los virus. Los virus son parásitos obligados que no pueden multiplicarse fuera de una célula anfitriona apropiada. Sin embargo, cuando un virus penetra en una célula viva, es capaz de crear cientos de partículas de virus idénticas, utilizando la energía y la maquinaria bioquímica de la célula anfitriona. Un virus es una entidad mucho más sencilla que una célula, formado por material genético (ácidos núcleicos) y proteínas, con tamaños que varían entre 10 y 300 nm de longitud.

La microscopía electrónica, en los años 50, permitió descubrir las enormes diferencias entre las células bacterianas y la estructura interna de otras células. Las células bacterianas contienen solamente citoplasma, rodeado de una membrana citoplasmática semipermeable. El citoplasma contiene material nuclear, el cual no está rodeado de ninguna membrana. Los organismos que tienen estas propiedades se denominan **Procariotas.**

Con la excepción de las bacterias, todas las otras células contienen estructuras internas complejas y bien diferenciadas (orgánulos), rodeadas por membranas. Dichas membranas se parecen a las membranas que rodean a la célula misma. Los orgánulos típicos incluyen el núcleo, la mitocondria, los ribosomas y el aparato de Golgi. Dentro del núcleo, el material genético celular está organizado en estructuras reconocibles llamadas cromosomas. Estas células se llaman **Eucariotas**.

**Células Procariotas**

Las células procariotas son las células más sencillas, en cuanto a estructura, y se cree que ellas fueron las primeras formas de vida en la Tierra. Las principales características de estas células son:

- No poseen membranas internas que separen el núcleo del citoplasma, ni hay estructuras o corpúsculos rodeados de membranas al interior de la célula.
- La división celular es asexuada, normalmente por simple fisión.
- La pared celular contiene moléculas mucopéptidas que le dan rígidez estructural.

El citoplasma y su contenido están rodeados por una membrana citoplasmática que controla el paso de los materiales hacia y desde el interior. La membrana citoplasmática está rodeada por la pared celular rígida, que le otorga una cubierta protectora. Dentro del área citoplasmática se distinguen las siguientes substancias:

- **Ribosomas**: Pequeñas partículas compuestas de proteínas y ARN (ácidos ribonucleicos) que participan en la síntesis de nuevas proteínas.
- **Gránulos**: Son depósitos de varios compuestos químicos que pueden servir de materia prima en los procesos metabólicos.
- **Material nuclear**: Son filamentos de ADN (ácido desoxirribonucleico), portador de la información genética.
- **Mesosomas**: Son repliegues de la membrana citoplasmática.

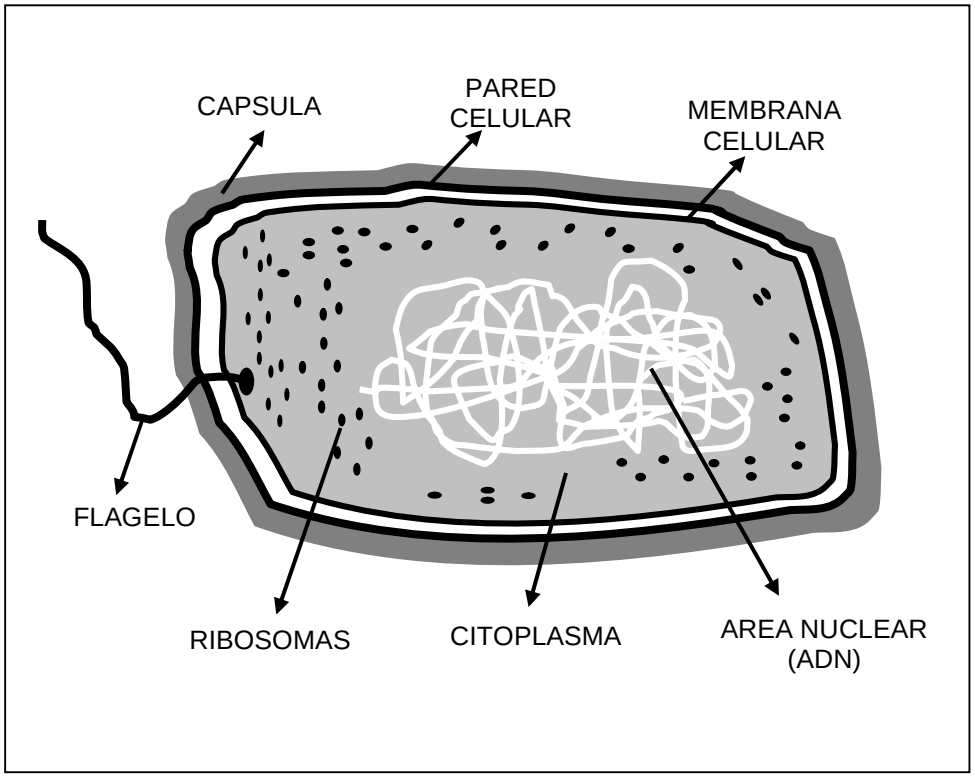



**FIGURA 2.5: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA BACTERIA**

Las bacterias y las cianobacterias son los principales miembros de los protistas procarióticos. Existen miles de diferentes tipos y sus características más generales se presentan a continuación:

- **Bacterias:** Son las células procariotas típicas. Son unicelulares, carentes de estructuras internas rodeadas de membranas dentro del citoplasma (Figura 2.5). Se reproducen asexuadamente con tiempos de duplicación que pueden ser tan cortos como 15-20 minutos o algunas horas, dependiendo del tipo de bacteria, de la disponibilidad de nutrientes, del pH y la temperatura. Un cultivo de laboratorio típico puede mostrar una población del orden de 10 mil millones de bacterias por milílitro, en menos de 24 horas de crecimiento. Tienen pequeño tamaño (0,2-1,5 μm de diámetro 1,5-2,5 μm de longitud). Las bacterias aisladas pueden presentar una morfología esférica (ej.: *Coccus sp.*), tubular recto (*Pseudomonas sp*, *Escherichia sp, Salmonella sp*), tubular curvo (ej.: *Vibrio cholera*), o espiral (ej.: diarrea)). Algunas bacterias poseen colitas (i.e., flagelos), para otorgarle movilidad (normalmente, bacterias tubulares capaces de desplazarse a una velocidad de 1-10 cm/h). Otras, presentan vellosidades o *pili*, cuya función es permitir la adherencia a otras bacterias similares (ej.: durante la floculación) o participar en la transferencia de ADN entre dos bacterias. También existen otras

que están rodeadas de una cápsula extracelular o capa de material polisacárido, que les permite formar grandes agregados celulares. Debido a su menor complejidad, algunas bacterias pueden crecer a temperaturas extremas, incluso cercanas a 0°C o a 90°C. Juegan un importante papel en los ciclos biogeoquímicos, ya que son capaces de descomponer los compuestos orgánicos depositados en la tierra y el mar. Muchas de ellas participan en la fijación de $N_2$ y en la generación de $CH_4$ y $H_2S$. Tienen una gran importancia para el hombre, ya que forman parte de muchos procesos industriales, y son el principal componente de la comunidad microbiana en el tratamiento biológico de efluentes. Sin embargo, muchas bacterias son causa de enfermedad y muerte para los animales y las plantas.

- **Cianobacterias:** Son células procarióticas fotosintéticas, que contienen clorofila y otros pigmentos. Son ligeramente más grandes que las bacterias, aunque comparten las mismas características en cuanto a morfología. Se pueden reproducir por fisión binaria simple, por fisión múltiple o mediante la liberación de células especializadas llamadas *esporas*.

**Células Eucariotas**

Son estructuralmente más complejas que las procariotas. Los principales componentes de una célula eucariota son:

- **Retículo endoplasmático:** Éste es un complejo sistema de membranas que se extiende por todo el citoplasma, dividiéndolo en estructuras o sitios de actividad bioquímica. Sirve de barrera entre los diferentes orgánulos y proporciona canales que dirigen el flujo de materiales dentro de la célula. Además, proporciona una superficie firme para la alineación de los ribosomas durante la síntesis de proteínas.
- **Núcleo**: Es la principal localización del material genético y funciona como centro de control de la célula. Consta de ADN en forma de cromosomas, de ARN y de proteínas, y está rodeado por una envoltura nuclear.
- **Aparato de Golgi**: Es una estructura localizada en la región del retículo endoplasmático. Es el sitio de síntesis de nuevo material para la pared celular, y empaqueta y transporta proteínas y polisacáridos al exterior de la célula.
- **Miticondrias**: Funcionan como los sitios principales de producción de energía en procesos celulares.

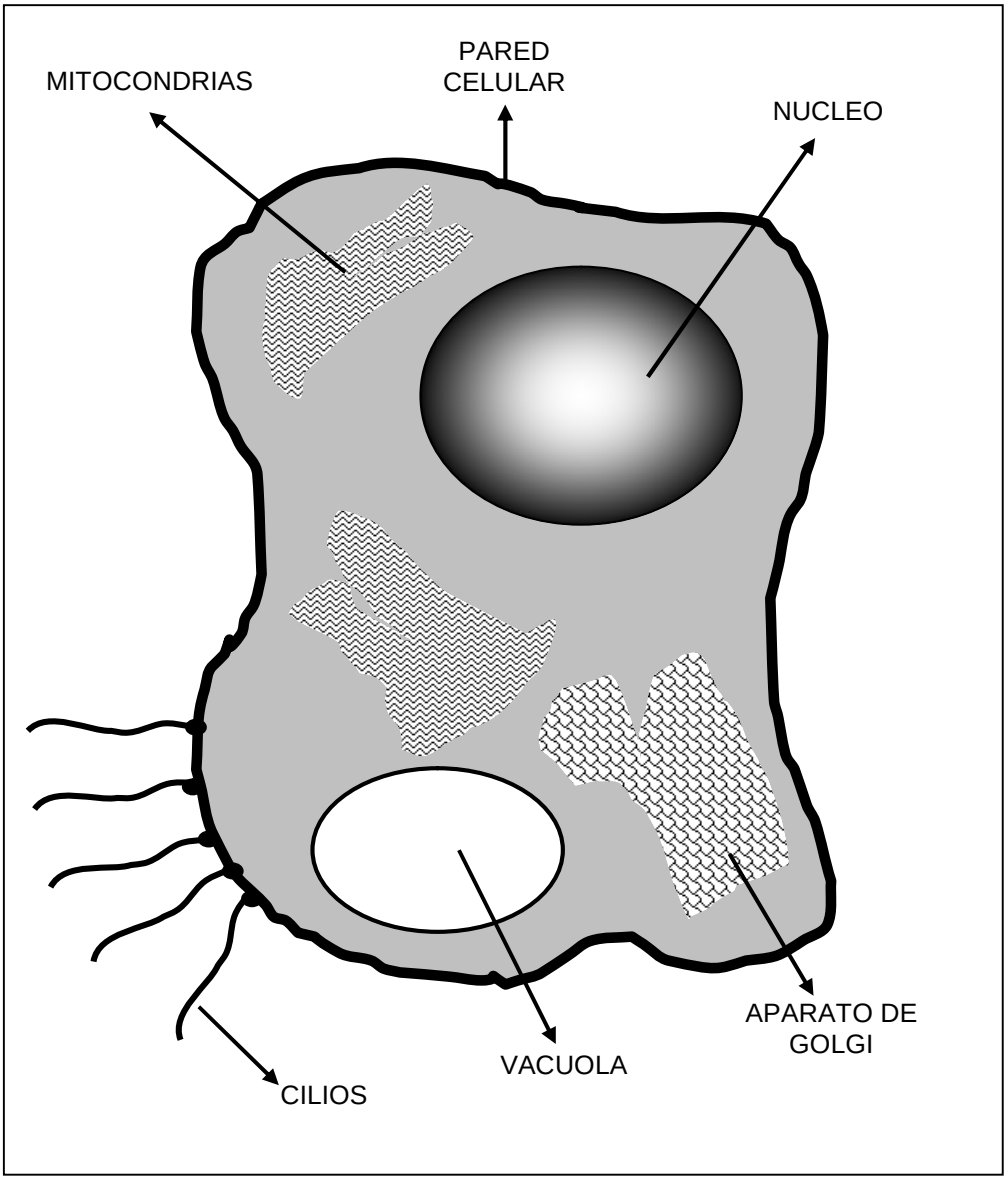



**FIGURA 2.6: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA CÉLULA EUCARIOTICA**

- **Cloroplastos**: Son los orgánulos de las células vegetales que contienen clorofila y en los que tiene lugar la fotosíntesis.
- **Vacuola**: Es un espacio limitado por una membrana dentro del citoplasma que contiene soluciones diluidas de varios compuestos.
- **Microtúbulos y microfilamentos**: Son estructuras muy finas que mantienen la forma de la célula y promueven el movimiento ordenado de los componentes dentro de los orgánulos.
- **Paredes celulares**: Algunas células poseen un recubrimiento externo de la membrana citoplasmática, compuesto por microfibrilas que le dan rígidez a la pared celular.

Los hongos, los protozoos y las algas son organismos eucariotas. Cada uno de estos grupos de organismos representa en sí mismo, todo mundo complejo y variado. Las principales características de estos eucariotas son las siguientes:

- **Hongos**: Son organismos que carecen de clorofila y poseen paredes celulares rígidas. Algunos son unicelulares, mientras que otros son policelulares, con cierta diferenciación en su estructura. Varían de tamaño y forma, desde las levaduras microscópicas unicelulares (1-5 μm de ancho, 5-30 μm de longitud), hasta los hongos macroscópicos filamentosos (mohos). Pueden llegar a formar estructuras macroscópicas como los hongos policelulares (setas). Se reproducen mediante una variedad de métodos, tanto asexuales como sexuales. En la reproducción asexual por fisión, una célula se divide para formar dos células hijas iguales. En la reproducción sexual, se funden los núcleos de dos células.

  Los hongos filamentosos constan de micelios y esporas. El micelio es un complejo de varios filamentos (llamados hifas) en cuyo interior hay un citoplasma común. Algunos micelios penetran en el medio con el fin de obtener nutrientes para su metabolismo, mientras que otros son productores de esporas y se proyectan hacia el exterior. La mayoría de las partes de un hongo filamentoso, son potencialmente capaces de crecer y multiplicarse. Los hongos pueden soportar un medio ambiente desfavorable mejor que la mayoría de los otros organismos, sobreviviendo en condiciones extremas de pH. Las levaduras pueden desarrollarse tanto en ausencia como en presencia de oxígeno, mientras que los filamentosos son estrictamente aeróbicos. Los hongos se encuentran presentes en medios acuáticos y suelos. Existe una gran variedad de hongos saprófitos (se alimentan de materia orgánica muerta), los que descomponen las estructuras químicas complejas, reciclando así los nutrientes en el ambiente.

- **Protozoos:** Son organismos eucariotas que tienen una mayor diversidad en formas y modos de vida. Se conocen más de 64.000 especies de protozoos. En general, son unicelulares, carentes de clorofila y con capacidad móvil (lo que sirve como base para su clasificación). Su tamaño va desde 1 μm hasta unas décimas de milímetro. Tienen una variedad de maneras de alimentarse: a partir de material orgánico disuelto (compitiendo con las bacterias), o no disuelto (digerido enzimáticamente dentro de una vacuola); por ejemplo: las amebas. Algunos son carnívoros, depredadores, y se alimentan de otros organismos de menor tamaño como, por ejemplo, de bacterias y algas. Estas características le confieren a los

protozoos un importante papel en la cadena trófica de las comunidades acuáticas, ya que son tanto consumidores primarios como secundarios.

Los protozoos se pueden reproducir asexual y sexualmente. Los protozoos ciliados se reproducen sexualmente a través de la conjugación donde se produce la unión física de dos individuos durante la que se intercambia material nuclear. Existen protozoos de vida libre que se encuentran en ambientes acuáticos, suelos y materia orgánica en descomposición, mientras otros llevan una existencia parasitaria.

- **Algas:** Son células eucariotas fotosintéticas y forman un gran grupo heterogéneo que habita en las aguas. La principal diferencia entre las algas y los otros Protistas, es su habilidad de producir energía a partir de la fotosíntesis, usando la clorofila como su aparato recolector de luz, utilizando el $CO_2$ y generando $O_2$ como subproducto. Por otra parte, sus resultados nutricionales permiten acumular el material orgánico, a diferencia de los otros Protistas que lo degradan. Su tamaño oscila desde 5 μm hasta 30 m de longitud. Las algas microscópicas son en su mayoría unicelulares y la reproducción es principalmente por fisión asexual. Las algas crecen abundantemente en agua dulce y marina, así como en el suelo.

**Los Virus**

Son las entidades biológicas más pequeñas, que tienen la propiedad de autoreplicarse, utilizando los mecanismos reproductores de un microorganismo anfitrión. Las partículas de virus fuera de la célula anfitriona, no poseen ninguna actividad metabólica y son incapaces de reproducirse. Los virus están ampliamente distribuidos en la naturaleza, hospedándose tanto en bacterias como en células animales y vegetales.

Los virus que infectan a las bacterias, o *fagos*, se conocen desde principios de este siglo. Los virus bacterianos poseen una cola, a través de la cual, inoculan el ácido nucleico vírico en el interior de la célula hospedadora, tal como se aprecia en la Figura 2.7. Hay dos tipos de virus bacterianos: *líticos (o virulentos)* y *moderados (o avirulentos).* Cuando los fagos líticos infectan las células, éstas responden produciendo un gran número de virus nuevos y, al final del período de incubación, la célula hospedadora estalla liberando nuevos fagos para infectar otras células receptoras. En el caso de los virus moderados, no se produce lisis de la célula, sino que el virus se reproduce de una generación a otra, pudiendo transformarse en virulento, en forma espontánea. La reproducción de un bacteriofago, comienza con la adsorción de éste sobre la pared de la bacteria hospedadora, utilizando el extremo de la cola, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.8. La fijación suele ser específica, en cuanto a que ciertos virus y bacterias poseen configuraciones moleculares complementarias en sitios receptores apropiados. Luego de la fijación, el ácido nucleico penetra en la bacteria, gracias a la acción mecánica de la vaina contractil, en combinación con la acción lítica de una enzima (es decir, lisozima) que se encuentra en la cola del fago y que digiere la pared celular. Tanto la cubierta de proteína que constituye la cabeza del fago, como la estructura de la cola del virus, permanecen fuera de la célula. Así, el virus inyecta su ADN como una jeringa inyecta

una vacuna.

Los virus animales y vegetales, o *viriones*, tienen una composición y forma de acción similares a los bacteriofagos. Están compuestos de una masa central de ácido nucleico rodeada por una cápsula, y su forma varía de tipo en tipo, encontrándose formas icosaédricas, helicoidales u otras. El virión se fija a una célula anfitriona susceptible, en sitios específicos, a la que luego penetra liberando su material genético, y permitiendo la biosíntesis de nuevos viriones. Las células hospedadoras que están infectadas con virus pueden no presentar ningún síntoma, o formar cuerpos de inclusión, o ser afectadas por cambios genéticos, o ser totalmente destruidas después de reproducir al virus. Los virus son una de las principales causas de enfermedades fatales provocadas por microorganismos en los mamíferos. Algunas enfermadades virales que afectan el sistema neurológico pueden presentar períodos de incubación muy lentos, de meses o incluso años. En la actualidad, la virología es una de las áreas de investigación más dinámicas y se constatan permanentes avances al respecto.

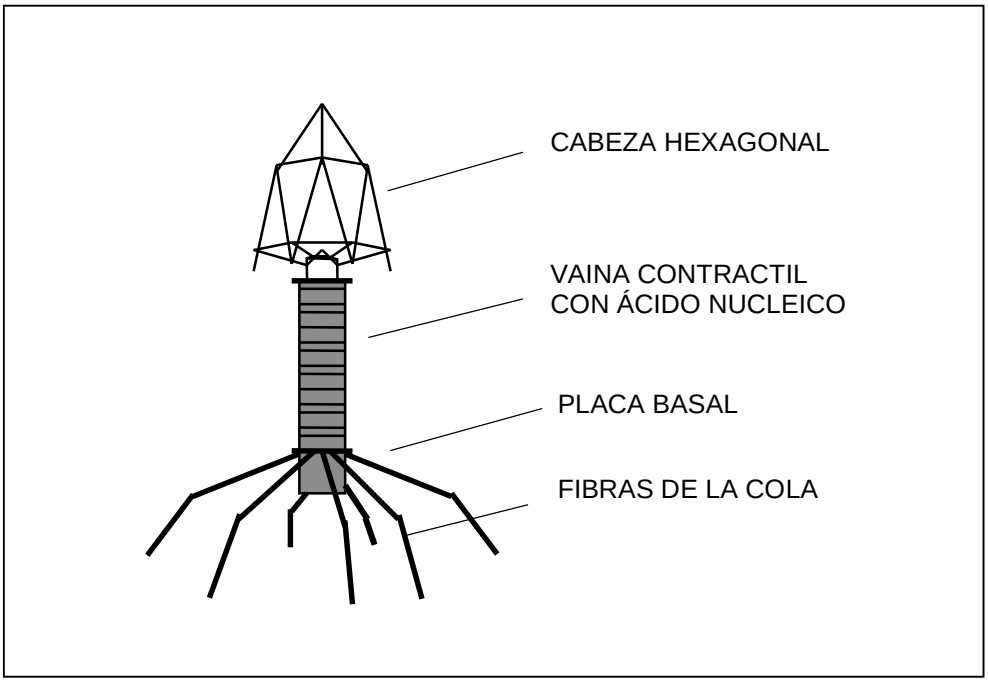



**FIGURA 2.7: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN VIRUS BACTERIANO**

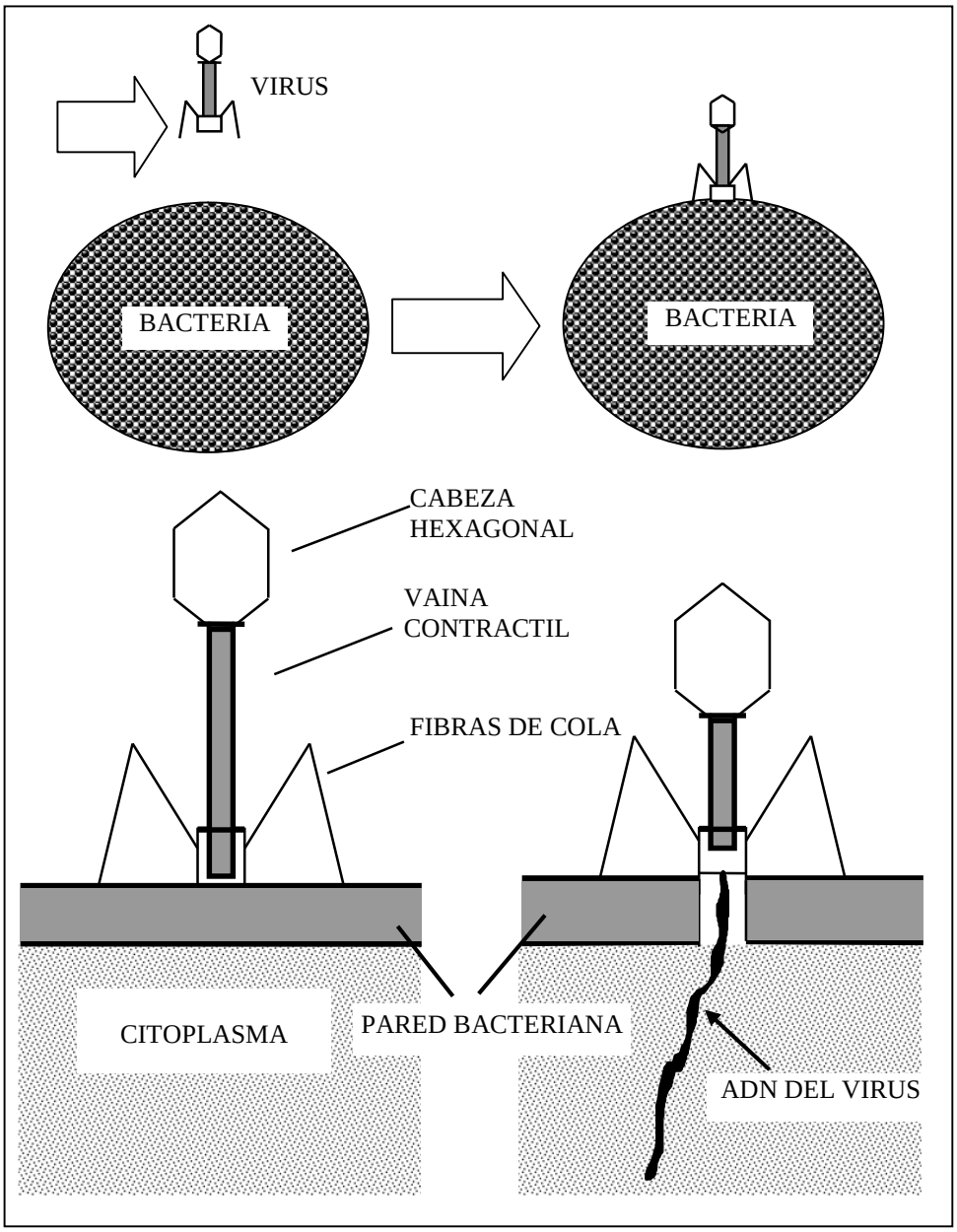



**FIGURA 2.8: INFECCIÓN VIRAL DE UNA BACTERIA**

Los microorganismos descritos en los párrafos anteriores conforman una amplia variedad de especies, cada una con sus respectivas particularidades para adaptarse y explotar las condiciones del entorno, en una clara ilustración del complejo enigma de la vida. Resulta aún más enigmático constatar en la Naturaleza ejemplos de relación simbiótica entre algunas especies. Tal es el caso de los líquenes que crecen sobre las rocas y las cortezas de los árboles, u otros soportes no aptos para el crecimiento de las plantas. Los líquenes son conjuntos que constan de un organismo fotosintético y de un hongo que crecen juntos, en una vida en común de beneficio mutuo. Están formados por una capa de un micelio fungal fuertemente entretejido, bajo la cual hay una capa de células fotosintéticas, y debajo de ésta hay otra capa fungal. La capa inferior puede fijarse directamente al soporte, o bien, mediante estructuras de anclaje especiales. Aparentemente, el alga o cianobacteria proporciona al hongo los carbohidratos producidos por fotosíntesis. A su vez, el hongo absorbe, almacena y suministra el agua y los nutrientes requeridos por el socio fotosintético, además de proporcionarle apoyo y protección. El hongo es capaz de nutrirse a partir de su socio, por medio de delicadas proyecciones radiculares que penetran la célula fotosintética. Un bello ejemplo de que la cooperación entre especies puede hacer viable la existencia de ellas en un medio adverso....

Cabe preguntarse cuales son los fenómenos que permiten el funcionamiento de estas pequeñas estructuras vivientes. ¿Cómo se reproducen y se alimentan? ¿De donde obtienen la energía? ¿Cuáles son las reacciones químicas fundamentales de la vida? La próxima estación en nuestro fugaz viaje por los dominios de la célula, nos entregará algunos conceptos básicos para intentar responder a tales preguntas.

### 2.7.2) La Química de la Vida

Los procesos bioquímicos que tienen lugar al interior de las células son extremadamente complejos. En esta sección revisaremos algunos conceptos básicos sobre la naturaleza de las principales reacciones químicas que tienen lugar al interior de la célula, poniendo énfasis en las necesidades nutricionales y energéticas. Resulta obvio comenzar con los compuestos más importantes en los seres vivientes: las enzimas.

#### a) Enzimas microbiales

La química celular es muy compleja e involucra aspectos de química, bioquímica, enzimología y genética, entre otros. En su aspecto más fundamental, las actividades celulares se realizan gracias a la acción coordinada de las enzimas. Estas substancias están presentes en pequeñas cantidades y actúan como catalizadores biológicos altamente específicos en las diversas reacciones que tienen lugar en la célula viva. Sin las enzimas, la vida no puede existir.

En cada célula hay miles de enzimas diferentes, con pesos moleculares que van de 10.000 a 1.000.000 Daltons. Todas las enzimas son producidas al interior de la célula y la mayoría de ellas actúan intracelularmente. Por otra parte, algunas enzimas son excretadas al ambiente extracelular, para modificar los nutrientes potenciales y permitir su transporte al interior. Por ejemplo, las amilasas permiten degradar los almidones a moléculas de azúcar más pequeñas y de fácil absorción.

Las enzimas intracelulares sintetizan material celular, y también degradan compuestos para suministrar los requerimientos energéticos de la célula. Las características de las enzimas y su mecanismo de acción es el mismo, independientemente de si ellas se encuentran en una célula microbiana, humana u otro ser vivo.

Las enzimas están formadas por proteínas. En algunos casos, requieren unirse a otra molécula orgánica de menor tamaño, llamada coenzima, para lograr actividad catalítica. A veces, el grupo no proteico de una enzima es un ion metálico, denominado cofactor; por ejemplo, $Mg^{+2}$, $Mn^{+2}$, $Fe^{+2}$, $Zn^{+2}$, etc. Cada enzima tiene un rango estrecho de pH y T en el cual puede operar. Algunas son activas en medio ácido, y otras en medio alcalino o neutro.

La alta especificidad de las enzimas implica que para cada substrato se requiere un tipo específico de enzima. Algunas de las reacciones enzimáticas de interés son las siguientes:

- **Reacciones de Síntesis:** La síntesis de material celular, tanto para mantención como para la formación de celulas nuevas, es catalizada por enzimas intracelulares. Se requiere una gran variedad de enzimas para sintetizar los diferentes compuestos orgánicos presentes en las células. A su vez, dichas enzimas deben ser producidas por la célula, en un complejo proceso de síntesis de proteínas. Las reacciones de síntesis utilizan gran parte de la energía disponible.

- **Reacciones Oxidativas:** Las reacciones que proveen energía para mantención y crecimiento son catalizadas por enzimas intracelulares. Ellas involucran reacciones de oxidación y reducción, donde la adición o eliminación de oxígeno e hidrógeno son de primordial importancia. La mayoría de los organismos oxida los nutrientes a partir de la eliminación enzimática del hidrógeno. Las enzimas dehidrogenazas remueven el hidrógeno de los compuestos y lo transfieren a otro sistema enzimático, hasta que finalmente es usado para reducir un aceptor de hidrógeno. Éste está determinado por la naturaleza aeróbica o anaeróbica del medio y el tipo de célula. En el sistema aeróbico, el oxígeno es el aceptor de hidrógeno y se forma agua. En el caso anaeróbico, el hidrógeno reacciona con un compuesto oxidado produciendo un compuesto reducido. Durante la oxidación se libera energía, mientras que en las reacciones de reducción se consume energía. Ya que se produce más energía que la que se consume, queda disponible un remanente energético que es usado por la célula.

- **Reacciones Hidrolíticas:** Hidrolizan substancias insolubles complejas y las transforman en componentes solubles simples, que pueden pasar a través de la membrana celular por difusión. Son generalmente excretadas por el organismo al medio extracelular (enzimas extracelulares). Otras enzimas líticas, como por ejemplo las enzimas proteolíticas altamente específicas, pueden existir intracelularmente cuando se requiera destruir enzimas que ya no son necesarias.

La célula viva sintetiza y degrada distintos materiales según sus requerimientos metabólicos. Ello hace necesario un control preciso de las múltiples reacciones enzimáticas. La actividad enzimática se puede regular, ya sea a través de un control directo de la acción catalítica, o de un control genético. En el primer caso, el control se ejerce por alteración de las concentraciones de substrato o de sustancias que reaccionan. En el caso de control genético, se requiere una substancia inductora de bajo peso molecular, ya sea el substrato u otro compuesto asociado, para que tenga lugar la síntesis de la enzima. La detención de éste proceso de síntesis se logra cuando otras substancias de bajo peso molecular, ya sean los productos de la reacción enzimática o substancias relacionadas, actúan reprimiendo la formación de más enzima. Esto implica complejos mecanismos de transmisión de información a nivel genético, algunos de cuyos conceptos se revisan a continuación.

**b) Genética Celular**

El ADN es la substancia química responsable de la transmisión de la información genética y constituye el *cromosoma* de las células. En su estructura está codificada la información para la síntesis de todas las proteínas celulares, en segmentos discretos de ADN llamados *genes*. Esta información se transmite de célula a célula por *replicación* del ADN. Otro tipo de ácido nucleico, el ARN, actúa ejecutando la información codificada en el ADN para la síntesis de proteínas, a través de la *transcripción* y la *traducción*.

El ADN es una macromolécula compuesta de dos cadenas, cada una enroscada en torno a la otra en forma de una doble helicoidal. Cada cadena está compuesta de *nucleótidos* unidos entre sí, formando un polinucleótido. Cada nucleótido consta de un anillo nitrogenado (purina o pirimidina), una pentosa (desoxirribosa) y una molécula de fosfato, los que se encuentran unidos entre sí, formando una secuencia de base nitrogenada-desoxirribosa-fosfato. En el ADN se encuentran dos clases de purinas: adenina y guanina, y dos clases de pirimidas: citosina y timina. Las diferentes combinaciones de estas bases dan origen a cuatro clases de nucleótidos, según sea la base nitrogenada presente. La forma como estas unidades se ordenan en la molécula de ADN determina su estructura y la naturaleza de la información genética codificada. Se ha calculado que el cromosoma bacteriano tiene capacidad para codificar aproximadamente 300 proteínas diferentes. El ARN difiere del ADN en que usualmente tiene una sola cadena y el componente azucarado es la ribosa en vez de la desoxirribosa; además, en vez de timina posee otra base nitrogenada llamada uracilo.

El cromosoma de una bacteria típica es una molécula circular de ADN que tiene un peso molecular del orden de 2500 millones de Daltons. Si el cromosoma se extendiese en forma lineal, mediría aproximadamente 1,25 mm, lo que es cientos de veces más largo que la célula que lo contiene. Para replicar estas macromoléculas, se requiere contar con los correspondientes nucleótidos al interior de la célula. En algunos casos, tales nucleótidos deben ser aportados a la célula ya formados, por ejemplo, a partir de la descomposición de organismos muertos. En otros casos, deben ser sintetizados a partir de nutrientes simples, tales como glucosa, sulfato de amonio y sales minerales. La conversión de nutrientes simples a nucleótidos, para la síntesis de ADN, implica una serie de reacciones muy complejas, varias de las cuales

utilizan energía en forma de ATP, tal como se menciona más adelante. La replicación del ADN comienza en un sitio específico del cromosoma bacteriano y el proceso es catalizado por varias enzimas polimerasas y ligasas.

Para sintetizar las proteínas, se debe contar con sus correspondientes aminoácidos. Los aminoácidos son moléculas orgánicas que contienen grupos ácidos (-R-COOH) y grupos básicos (-R-$NH_2$). Existen 20 clases de aminoácidos, que se combinan generando una amplísima gama de estructuras proteícas. Cada tipo de proteína celular, tiene una secuencia específica de aminoácidos unidos por enlaces péptidos, formando una estructura tridimensional definida. La síntesis de proteínas tiene lugar en los ribosomas, que son grandes partículas de ARN-proteína que se encuentran en el citoplasma de la célula bacteriana. En las células eucarióticas, los ribosomas están unidos al retículo endoplasmático. Antes de llevar a cabo la síntesis de la proteína, la información codificada del ADN debe ser transferida hacia los ribosomas, mediante una substancia conocida como mARN (ácido ribonucleico mensajero), en un proceso que implica "transcribir" la información genética en dicha substancia. Este proceso de transcripción es catalizado por la enzima ARN polimerasa. Posteriormente, dicha información genética se "traduce" en el proceso de síntesis de la proteína, donde se indica la secuencia exacta de aminoácidos que la componen. Cada aminoácido de esa secuencia se específica de acuerdo al ordenamiento y tipo de bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos de mARN.

Una vez que los aminoácidos han sido fabricados, estos son activados utilizando una enzima activadora específica, que se liga al aminoácido correspondiente. En seguida, éste conjunto se une a una molécula llamada ARN de transferencia (tARN), resultando en el transporte del aminoácido hacia el mARN que está unido en la superficie del ribosoma, dando comienzo al ensamblaje de los diferentes aminoácidos, hasta formar la proteína requerida.

Todas las células están expuestas a sufrir cambios en la secuencia de nucleótidos de un gen, dando origen a una nueva característica genética. Estas mutaciones son acontecimientos que ocurren al azar, espontáneamente, a un ritmo de una mutación por cada millón de células o más. Así, en un cultivo celular las células que han incorporado una mutación existirán en conjunto con las que poseen las características genéticas originales. Tales mutaciones suelen ocurrir durante la replicación del ADN, en el proceso de reproducción celular. Las mutaciones pueden ocurrir debido a daños producidos por radiación UV de la luz solar u otra radiación ionizante, o a la presencia de productos químicos mutagénicos. Algunos de estos compuestos mutagénicos reaccionan directamente con los grupos amino o hidroxilo del ADN, mientras que otros compuestos pueden incluso llegar a substituir las bases del ADN durante la etapa de replicación, introduciendo errores que dan como resultado mutaciones. Afortunadamente, las células tienen enzimas específicas que pueden intentar reparar el ADN dañado, protegiendo las características genéticas originales.

Las mutaciones pueden dar origen a cambios importantes en las características de la célula afectada. Por ejemplo, las mutaciones pueden:

- Incrementar la tolerancia a agentes inhibidores, tales como antibióticos.

- Incrementar la resistencia a condiciones ambientales desfavorables (pH, temperatura).
- Cambiar los requerimientos nutricionales para su crecimiento.
- Cambiar los tipos de productos finales del metabolismo y su velocidad de producción.
- Cambiar las características de la membrana celular.
- Cambiar la composición intracelular.
- Cambiar las características morfológicas.
- Incrementar la resistencia a la acción de depredadores.

Es necesario tener presente que gran parte de las mutaciones resulta en la muerte de la célula. Si un cultivo de microorganismos contiene un pequeño grupo de mutantes que presentó una mayor resistencia a un antibiótico específico, éstos se transformarán en la población dominante, si tal antibiótico es incorporado al medio de cultivo. Las mutaciones son la base de la diversidad genética de las especies y de la constante adaptación de ellas a las condiciones del entorno. La gran población y alta tasa de reproducción que caracterizan el mundo microscópico, posibilitan la ocurrencia de un significativo número de mutaciones. Aquellas mutaciones que confieren un rasgo positivo a un individuo, dadas las condiciones ambientales prevalente, serán transmitidas a las generaciones siguientes.

**c) Requerimientos Materiales y Energéticos**

El metabolismo comprende un conjunto de reacciones químicas, que se llevan a cabo a nivel celular, para producir energía (catabolismo) o utilizar energía en la síntesis de componentes celulares (anabolismo) u otras actividades (ver Figura 2.9). Los compuestos químicos que las células requieren como materia prima para su actividad biológica (es decir, nutrientes) sirven como:

- Material requerido para la síntesis de material citoplasmático.
- Fuente de energía para el crecimiento celular y las reacciones biosintéticas.
- Receptores de los electrones generados durante las reacciones de oxidación.

La Tabla siguiente presenta una clasificación de acuerdo a los requerimientos de nutrientes:

**TABLA 2.13: CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LOS REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES**

| FUNCIÓN | FUENTE |
|---|---|
| Fuente de Energía | Compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos, luz |
| Receptor de Electrones | Oxígeno ($O_2$), compuestos orgánicos, oxígeno inorgánico combinado ($NO_3^-$, $NO_2^-$, $SO_4^=$) |
| Fuente de Carbono | $CO_2$, $HCO_3^-$ compuestos orgánicos |
| Otros Nutrientes | Elementos traza y factores de crecimiento (ej. N, P, vitaminas, metales) |

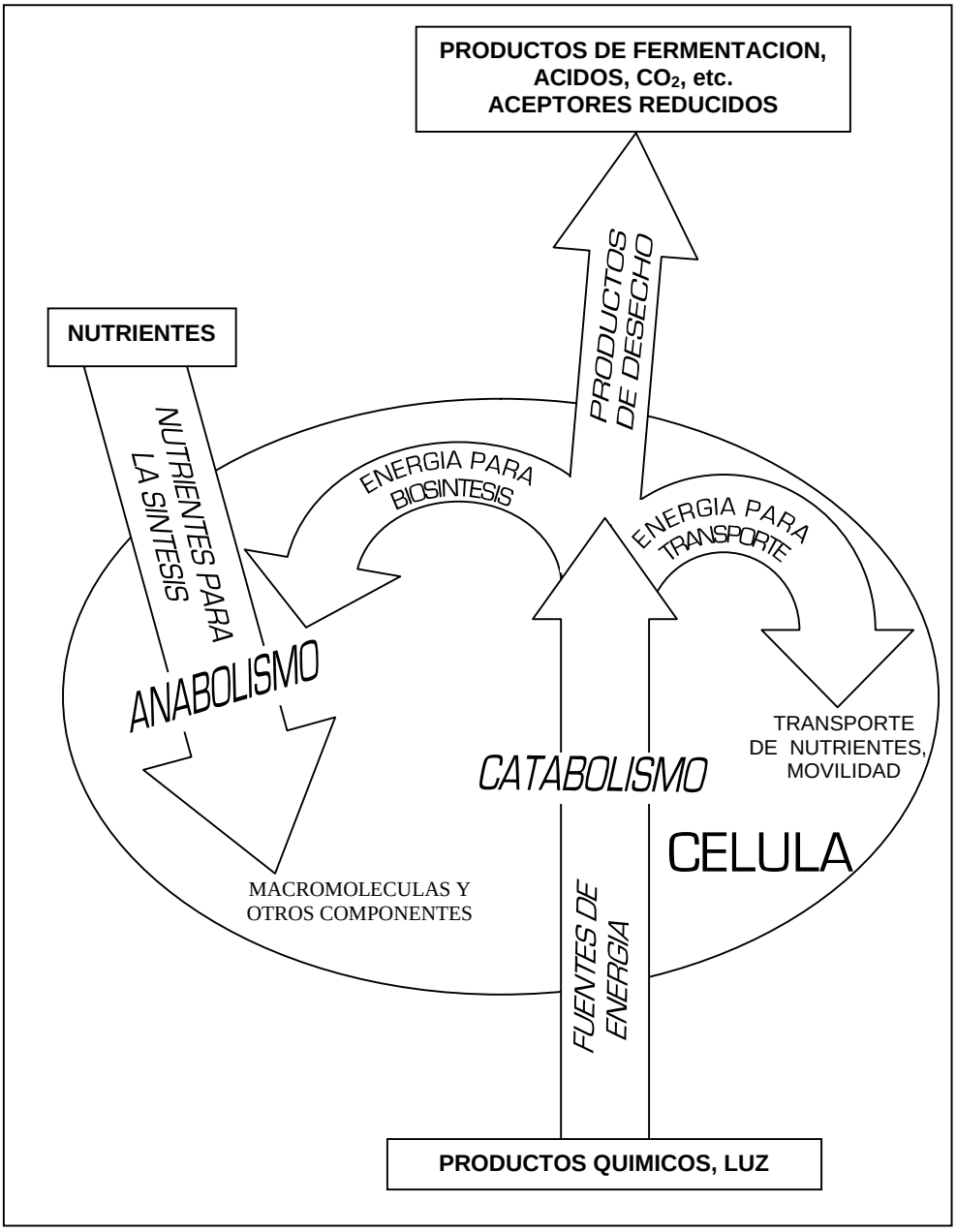



**FIGURA 2.9 METABOLISMO CELULAR**

En base a la fuente de energía requerida, los microorganismos se pueden clasificar en:

- **Fotótrofos:** Usan la luz como fuente de energía

- **Quimiótrofos:** Emplean reacciones de óxido-reducción para obtener su energía. Los quimiotrofos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de compuesto químico oxidado:

1) Quimioorganotrofos (usan moléculas orgánicas complejas como donadores de electrones)
2) Quimiolitotrofos (usan moléculas inorgánicas simples tales como $H_2S$, $NH_3$).

Desde el punto de vista de la forma química del carbono requerido, se pueden clasificar en:

- **Autótrofos**: Usan el $CO_2$ o $HCO_3^-$, como la única fuente de carbono C, a partir de los cuales construyen las biomoléculas. Es decir, producen materia orgánica a partir fuentes inorgánicas.

- **Heterótrofos**: Requieren carbono en forma orgánica (ej.: glucosa).

Aún cuando los quimioorganotrofos son capaces de oxidar una amplia gama de substratos de carbono y fuentes de energía, la mayoría de los organismos tiene una cantidad limitada de substancias preferidas. Otros organismos tienen una gran flexibilidad y pueden oxidar no solamente los productos de desecho del metabolismo de los mamíferos, sino que también pueden oxidar productos sintéticos orgánicos producidos industrialmente.

A pesar de las diferencias entre las especies, la forma a través de las cuales se logra la oxidación es similar en todos los organismos vivientes. El objetivo final de las reacciones que generan energía, es entregar energía para la síntesis de ATP (que es la forma química como se almacena la energía en los procesos bioquímicos). Sin embargo, los compuestos orgánicos poseen mucho más energía de la que se requiere. Por ejemplo, la oxidación completa de glucosa produce 2872 kJ/mol; si ella fuera utilizada con un 100% de eficiencia podría producir energía suficiente para la síntesis de 80 moléculas de ATP. Si toda esta energía fuera liberada al mismo tiempo, el efecto para la célula sería desastroso. La oxidación procede por lo tanto en una serie de reacciones catalizadas por enzimas, las cuales se organizan para liberar la energía en forma discreta y en cantidades controladas, de modo que se puedan acoplar con la síntesis de ATP. Tales series de reacciones se conocen como **pasos metabólicos** y los mismos ciclos metabólicos principales son explotados por todos los organismos (lo que indicaría el origen común de todos los seres vivos). Tales mecanismos de degradación generan un gran número de estructuras de carbono que son usadas como componentes para la síntesis de nuevo material celular en los procesos anabólicos. No entraremos a revisar aquí los ciclos metabólicos, aún cuando representan un fascinante proceso en la química de la vida.

**Efecto de los Factores ambientales**

- **Temperatura**: En general, los microorganismos pueden sobrevivir en un rango muy limitado de temperatura. De acuerdo al límite de temperatura que pueden tolerar, las bacterias se clasifican en psicrofílicas (hasta 30°C), mesofílicas (hasta 45°C), o termofílicas (hasta 80°C). La temperatura tiene un gran efecto sobre la cinética de las reacciones bioquímicas, ya que la actividad catalítica de las enzimas es extremadamente dependiente de la temperatura, con rangos muy estrechos dentro de los que pueden operar efectivamente.

- **pH**: Rango: 4-9 (óptimo 6.5-7.5). Se ha sugerido que las bacterias de tratamiento de efluentes crecen mejor a pH ligeramente alcalino y, en sistemas aireados, se ha podido operar mejor a niveles 9-10. La concentración de iones de H es unos de los factores que más efecto tiene sobre la actividad enzimática.

- **Oxígeno**: La ausencia o presencia de oxígeno divide a los organismos en 3 clases:

  1. **Aeróbicos:** Usan el $O_2$ como receptor de electrones.

  2. **Anaeróbicos:** Usan otros compuestos como aceptores de electrones.

  3. **Facultativos:** Pueden usar tanto el $O_2$ como otros componentes.

Los organismos aeróbicos normalmente oxidan completamente los nutrientes orgánicos, generando una gran cantidad de energía:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + 2872\ kJ/mol$$

En el caso de los anaeróbicos, la oxidación es incompleta, liberando poca energía. Por ejemplo:

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\,C_2H_6O + 2CO_2 + 130\ kJ/mol$$

Algunas bacterias aeróbicas autotróficas pueden también oxidar completamente ciertos compuestos inorgánicos para sus requerimientos energéticos, por ejemplo:

*Thiobacillus thioxidans*:

$$2\,S + 2\,H_2O + 6\,O_2 \longrightarrow 2\,H_2SO_4 + 1000\ kJ/mol$$

*Nitrosomonas*:

$$2\,NH_3 + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,HNO_3 + 2\,H_2O + 272\ kJ/mol$$

**d) Metabolismo Celular**

Los nutrientes absorbidos por los organismos sufren numerosas reacciones

bioquímicas:

- **Reacciones Catabólicas:** Son reacciones de degradación, oxidativas y exotérmicas. La energía generada por las reacciones catabólicas es almacenada en forma química como enlaces de fosfato (adenosin-trifosfato: ATP). Además de su función metabólica, los procesos catabólicos sirven para liberar nutrientes al entorno, una vez que el organismo muere.

- **Reacciones Exergónicas:** Son las reacciones que liberan la energía almacenada, a partir de la hidrólisis del enlace fosfato.

- **Reacciones Anabólicas:** Son aquellas que sintetizan compuestos de mayor tamaño y con estructuras más compleja.

La energía requerida en las reacciones de síntesis es obtenida a partir de la hidrólisis enzimática del ATP (adenosintrifosfato):

$$ATP + H_2O \longrightarrow ADP + H_3PO_4 + 30\ kJ/mol$$

La cual es catalizada por la enzima **adenosintrifosfatasa**. El ATP es una molécula de adenosina unida a tres fosfatos inorgánicos por enlaces fosforilos; la formación de cada uno de estos enlaces requiere gran cantidad de energía (30 kJ/mol). La hidrólisis de estos enlaces liberará dicha energía, para ser usada en las reacciones anabólicas.

- **Energía Fototrófica:** Los organismos fotosintéticos pueden atrapar la energía de la luz, para sintetizar el ATP. Existen dos tipos de fotosíntesis que dependen de la fuente de poder reductor explotado por el organismo: oxigénica y anoxigénica.

  **1) Fotosíntesis Oxigénica**: Las plantas verdes, algas y cianobacterias catalizan la oxidación del agua para producir hidrógeno, oxígeno y dos electrones:

$$2\ H_2O \xrightarrow{LUZ} O_2 + 4H^+ + 4e^-,$$

  Esta reacción se acopla con la reducción del $CO_2$ para producir carbohidratos:

$$CO_2 + 4H^+ + 4e^- \xrightarrow{LUZ} CH_2O + H_2O$$

$$2\ H_2O + CO_2 \xrightarrow{LUZ} (CH_2O) + H_2O + O_2$$

  **2) Fotosíntesis Anoxigénica**: Por su parte las bacterias fotosintéticas no oxidan el agua, sino que la reemplaza con algún otro agente reductor ($S^=$,

$S_2O_3^{=}$ o $H_2$). Por ejemplo,

$$2\ H_2S + CO_2 \xrightarrow{\text{LUZ}} (CH_2O) + 2\ S + 2\ H_20$$

Estas reacciones no resultan en la formación de oxígeno y por ello se les llama fotosíntesis anoxigénica. Las bacterias fotosintéticas son anaeróbicas y el oxígeno es un inhibidor para ellas.

Los substratos potenciales para el crecimiento microbiano se encuentran tanto en forma soluble como insoluble. Aquellas que se encuentran en forma coloidal o insoluble son partículas entre 0,1-100 μm, que contienen proteínas, grasas y carbohidratos, y pueden ser consumidas por los protozoos fagocíticos. Ya que las bacterias están rodeadas de una pared celular rígida, no les es posible el consumo de este tipo de moléculas grandes. Sin embargo, algunas bacterias son capaces de secretar enzimas extracelulares, que catalizan la hidrólisis de dichos compuestos a formas más simples, que puedan cruzar con facilidad la pared celular (transporte activo o difusión molecular). Como resultado de su capa de lípidos, la pared celular presenta una barrera extremadamente hidrofóbica al ambiente externo. Sólo aquellos compuestos que son solubles en lípidos pueden cruzar la barrera sin ayuda, mediante difusión molecular. La mayoría de los substratos cruzan la barrera a través de un mecanismo de transporte activo, que requiere de energía para generar un gradiente electroquímico que transfiera el substrato a través de la membrana. La variedad de substratos que deben ser transportados al interior es amplia e incluye compuestos con carga positiva, negativa o neutros (ej.: $Ca^{+2}$, $Mg^{+2}$, $SO_4^{=}$, $PO_3^{=}$, glucosa, fructosa, etc.). Existen muchos mecanismos de transporte activo, que dependen del tipo de compuesto y su carga.

Otro ejemplo interesante de la acción biológica en los procesos naturales lo constituyen algunas reacciones asociadas al ciclo del Nitrógeno. Las reacciones de **fijación** del $N_2$ requieren de una fuente de electrones para llevar a cabo la reducción del $N^0$ a $N^{-3}$.

$$N_2 + 8\ H^+ + 6\ e^- \longrightarrow 2\ NH_4^+ \qquad \Delta G = +\ 27\ kJ\ mol^{-1}\ e^{-1}$$

Esta reacción no será posible a menos que se combine con una reacción que posea un cambio altamente negativo de energía libre. Afortunadamente para la vida, tal reacción es la oxidación de carbohidratos para formar $CO_2$:

$$CH_2O + H_2O \longrightarrow CO_2 + 4\ H^+ + 4\ e^- \qquad \Delta G = -47\ kJ\ mol^{-1}\ e^{-1}$$

La combinación de ambas reacciones resulta termodinámicamente favorable y suministra energía a los microorganismos:

$$3\ CH_2O + 3\ H_2O + 2\ N_2 + H^+ \longrightarrow 3\ CO_2 + 4\ NH_4^+ \quad \Delta G = -120\ kJ\ mol^{-1}\ e^{-1}$$

La enzima **nitrogenasa** es responsable de la fijación del $N_2$ y posee la propiedad de reducir una variedad de compuestos de triple enlace.

La conversión de iones amonio a nitrato es esencial para el crecimiento de la mayoría de las plantas, ya que ellas, pueden asimilar el nitrato con mayor facilidad. Tal proceso de **nitrificación** se lleva a cabo a través de microorganismos aeróbicos:

$$4\ NH_3^+ + 6\ O_2 \longrightarrow 4\ NO_2^- + 8\ H^+ + 4\ H_2O$$

$$4\ NO_2^- + 2\ O_2 \longrightarrow 4\ NO_3^-$$

Cuando las plantas y los animales mueren, las moléculas más complejas sufren degradación por acción de varios tipos de microorganismos, por ejemplo la reacción de amonificación de la urea:

$$(NH_2)_2CO + H_2O \longrightarrow 2\ NH_3 + CO_2$$

La regeneración del $N_2$ a partir del nitrato (desnitrificación) ocurre en condiciones anaeróbicas en el suelo y en el océano:

$$5\ CH_2O + 4\ NO_3^- + 4\ H^+ \longleftrightarrow 2\ N_2 + 5\ CO_2 + 7\ H_2O$$

La reducción del nitrato puede seguir hasta la formación de $N_2O$, el cual es un gas relativamente inerte en la tropósfera, donde alcanza una concentración de 0,3 ($mg/m^3$).

Y la historia de la vida microscópica, de las reacciones enzimáticas y los procesos metabólicos, podría continuar llenando páginas y páginas. El objetivo ha sido entregar una visión muy resumida de los principales términos que conforman el lenguaje cotidiano de la microbiología. Con ellos esperamos poder comprender los fenómenos que ocurren tanto en los sistemas naturales como en aquellos procesos industriales que hacen uso de agentes biológicos.

En este capítulo, hemos visto que la Vida en la Tierra se sustenta en la existencia abundante de compuestos químicos, cuya presencia es fundamental para construir la amplia diversidad de moléculas, que constituyen los cuerpos vivientes. El oxígeno, el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el azufre, el fósforo y otros elementos, son piezas fundamentales en la arquitectura de la Vida. Dichos elementos se encuentran en diferentes estados de valencia, ya sea puros o formando compuestos estables en los distintos compartimentos de nuestro planeta. Están experimentando permanentes transformaciones químicas y físicas, muchas de ellas dinamizadas por la actividad viviente, dentro de la cual está inserta el ser humano.

**BIBLIOGRAFÍA**


Agueda J.A., Anguita F., Araña V., López J., Sánchez L., "Geología", 2a. edición, Editorial Rueda, Madrid (1983)

Arms K. "Environmental Science". Saunders College Publishing, Philadelphia (1990)

Botkin D., Keller E. "Environmental Science: Earth as a Living Planet". Wiley. New York (1995)

De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Goudie A. "The Nature of the Environment", 2ª ed. Blackwell, Oxford (1989)

Goudie A. "The Human Impact on the Natural Environment". Blackwell, Oxford (1990)

Grant W.D. Long P.E., "Microbiología Ambiental". Editorial Acribia S.A., Zaragoza (1989)

Joseph L. "GAIA, La Tierra Viviente", Editorial Cuatro Vientos, Santiago-Chile (1992)

Lovelock J. Bateson G., Margulis L., Atlan H., Varela F., Maturana H., "GAIA, Implicaciones de la Nueva Biología". Editorial Kairós, Barcelona (1989)

Lovelock J. "GAIA: La Ciencia para Curar el Planeta". Editorial Integral. Barcelona, España (1992)

Margalef R. "Planeta Azul, Planeta Verde", Prensa Científica S.A., Barcelona (1992)

Medina M. "Iniciación a la Meteorología" 8ª edición. Editorial Paraninfo. Madrid. (1994).

Meyer W.B. "Human Impact on the Earth. Cambridge University Press (1996)

Miller G.T. "Living in the Environment". 9ª ed. Wadsworth, California (1996)

Nebel B.J., Wright R.T. "Environmental Science: the Way the World Works". 5ª ed. Prentice-Hall, Upper-Saddle river, New Jersey (1996)

Odum E.P., "Fundamentos de Ecología", Nueva Editorial Interamericana, México (1986)

O'Neill P., "Environmental Chemistry", 2ªed., Chapman & Hall, London (1993)

Raven P.H., Berg L.R., Johnson G.B. "Environment". Saunders College Publishing. (1993)

Sandoval L. "Geomorfología". Ed. Ministerio de Defensa Español, Madrid (1991)

Schlesinger W.H. "Biogeochemistry: An Analysis of Global Change". Academic Press, San Diego (1991)

Turk A., Turk J., Wittes J., Wittes R. "Tratado de Ecología". Nueva Editorial Latinoamericana, México ((1981)

Wallace J.M., Hobbs P.V., "Atmospheric Science, An Introductory Survey", Academic Press, Orlando FL (1977)

## CAPÍTULO 3

## LOS CONTAMINANTES Y EL AMBIENTE

***Contaminante:*** *Todo elemento, compuesto, substancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental* [1].

***Contaminación:*** *Presencia en el ambiente de substancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente o que pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.*

El aire, el agua y el suelo, constituyen los medios donde se vierten los residuos generados por el hombre. Dichos residuos participan en los complejos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el medio natural, sufriendo transformaciones y, en muchos casos, alterando el funcionamiento de los ecosistemas. A su vez, los contaminantes pueden afectar la salud humana ingresando al organismo, a través de las vías respiratorias y del sistema digestivo, o de la piel.

Uno de los objetivos básicos de la ingeniería ambiental es reducir las emisiones de residuos y minimizar su impacto ambiental. Para ello, se requiere conocer las características de los contaminantes, sus interacciones con los procesos naturales que ocurren en los medios receptores y sus efectos sobre el funcionamiento de los ecosistemas y sobre la salud de las personas. Nuestro interés en el control de los residuos radica en el hecho de que éstos representan uno de los problemas ambientales de mayor gravedad de la sociedad industrial moderna.

En este capítulo se revisan las características de los principales contaminantes emitidos a la atmósfera, a los cuerpos hídricos y al suelo, sus efectos y mecanismos de transformación. Además, se introducen los modelos utilizados para describir su transporte y destino en el medio receptor. Finalmente, se incluye una revisión general de los principales conceptos sobre toxicología, relevantes a la ingeniería ambiental.

[1] Ambas definiciones corresponden a las presentadas en el Artículo 2º de la Ley 19.300

## 3.1) CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica se define como la presencia de ciertas substancias y/o formas de energía en el aire, en concentraciones, niveles o permanencia lo suficientemente altos como para constituir un riesgo a la salud y a la calidad de vida de la población, y a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental. Dichos contaminantes pueden ser:

- Primarios: Son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera debido a procesos naturales o antropogénicos.
- Secundarios: Se generan a partir de reacciones químicas que algunos contaminantes primarios sufren en la atmósfera.

Los principales contaminantes atmosféricos primarios, derivados de la actividad humana, incluyen:

- Partículas atmosféricas
- Compuestos de azufre
- Compuestos de nitrógeno
- Compuestos orgánicos
- Compuestos metálicos
- Ruido
- Radiaciones ionizantes

Entre los contaminantes secundarios, destacan aquellos generados por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. La contaminación fotoquímica es el producto de una serie de reacciones químicas complejas entre diversos constituyentes descargados a la atmósfera urbana. Cuando estos reaccionan bajo condiciones de luz solar brillante, generan una mezcla de contaminantes agresivos denominada *smog fotoquímico*.

### 3.1.1) Contaminantes Atmosféricos

La mayoría de los contaminantes atmosféricos pueden afectar directamente la salud de las personas, ya que ingresan al organismo a través del sistema respiratorio o de la piel. En otros casos, el contaminante es transportado desde el aire al suelo o a los cuerpos hídricos, donde posteriormente ingresa en la cadena trófica. El transporte de contaminantes desde la atmósfera hacia la superficie terrestre se produce por sedimentación de las partículas del aire y/o por absorción y arrastre de las lluvias. La Figura 3.1 muestra un esquema simplificado del transporte y destino de los contaminantes atmosféricos.

A continuación se revisan brevemente las características de los principales agentes contaminantes atmosféricos, y sus efectos sobre las personas y los ecosistemas.

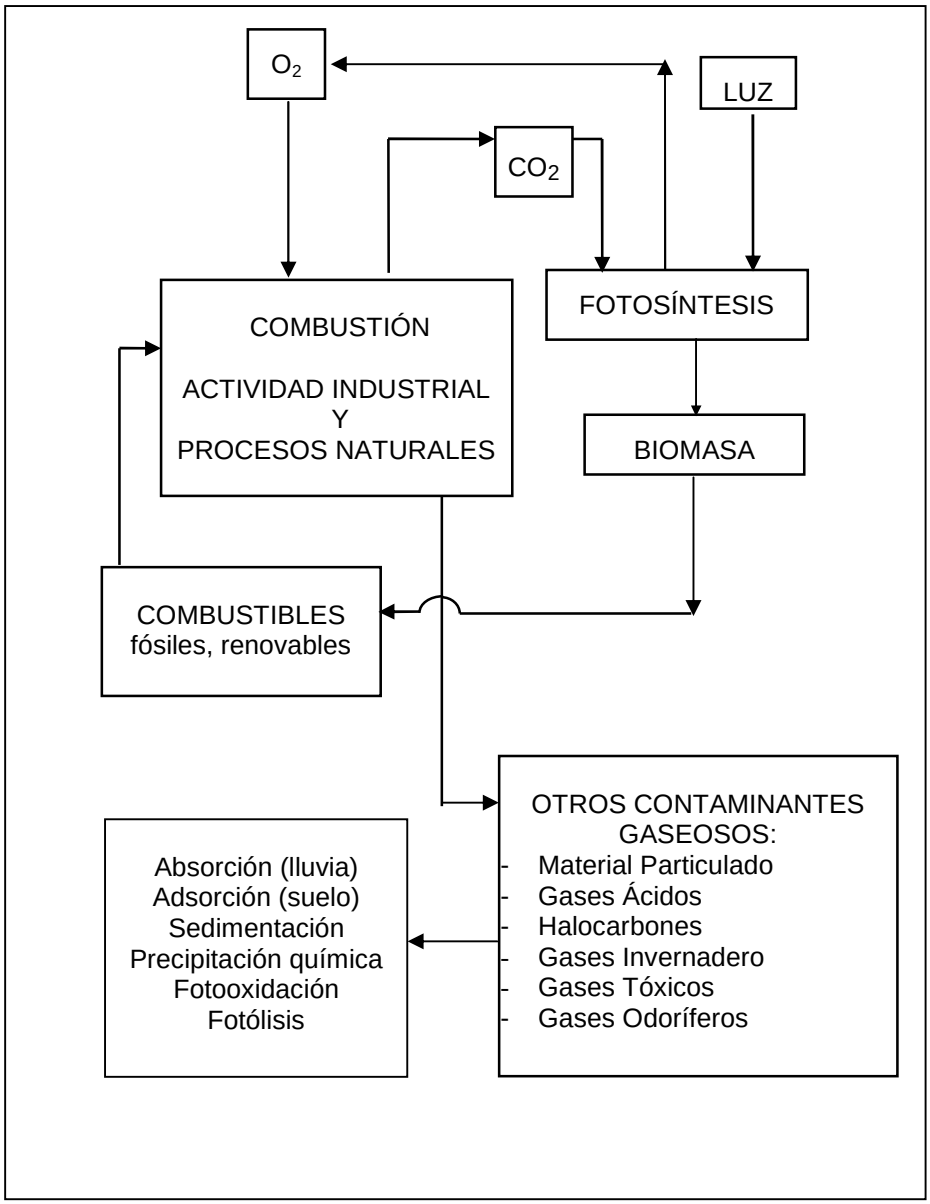



**FIGURA 3.1: CICLO GENERATIVO / REGENERATIVO DE LOS CONTAMINANTES GASEOSOS**

- **Partículas Atmosféricas**

El material particulado existente en el aire, corresponde a partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera[2] y cuyos tamaños oscilan entre $2\times10^{-4}$ y $5\times10^{2}$ μm. Estas partículas se encuentran ampliamente repartidas en la atmósfera, y forman una suspensión estable en el aire. La composición química de las partículas depende de su origen y, generalmente, constituyen una mezcla de substancias diversas, entre las cuales se puede mencionar: silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, óxidos, metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, etc. Muchas provienen de procesos naturales, y son transportadas debido a la acción del viento; por ejemplo, las cenizas derivadas de los incendios y erupciones volcánicas, la acción del viento sobre los océanos y la turbulencia del mar que genera aerosoles, el polvo de los suelos secos sin cobertura vegetal, el polen, etc. Además, las partículas son originadas por una gran gama de procesos tecnológicos, tales como en la combustión de madera y de combustibles fósiles, y en el procesamiento de material sólido (reducción de tamaño, secado, transporte, etc.).

Las partículas menores de 0,1 μm son, generalmente, iones y núcleos de condensación generados en los procesos de combustión, actividad volcánica, evaporación del agua de mar pulverizada, iones metálicos absorbidos en las gotas de agua de la atmósfera, etc. Estas constituyen un importante riesgo para la salud humana, ya que pueden entrar con facilidad al sistema pulmonar.

Las partículas sólidas entre 0,1 y 10 μm son aerosoles formados en procesos naturales y antropogénicos. Este material particulado se encuentra disperso en la atmósfera, y puede mantenerse suspendido por largo tiempo, debido a su baja velocidad de sedimentación. En las zonas urbanas, este tipo de material particulado puede tener un alto contenido de sulfatos, nitratos, fierro, plomo e hidrocarburos aromáticos.

Las partículas sólidas de mayor tamaño, entre 10 y 500 μm, tienen una velocidad de sedimentación mayor y permanecen menos tiempo en la atmósfera. Este polvo grueso contiene, principalmente: silicatos, sulfatos, cloruros, nitratos, fierro, calcio, aluminio, manganeso, plomo, zinc, magnesio y cobre. También se encuentra la

[2] La American Society for Testing and Materials (ASTM) define los siguientes términos para las diferentes categorías de partículas en la atmósfera:
*Aerosoles:* Partículas sólidas o líquidas de tamaño microscópico en medio gaseoso, tales como humo, niebla o bruma.
*Polvo:* Se refiere a partículas sólidas capaces de mantenerse suspendidas en el aire por un tiempo limitado y que pueden sedimentar debido a la acción de la gravedad (tamaño mayor que 1 μm).
*Gotas*: Partículas líquidas de pequeño tamaño, capaces de mantenerse suspendidas en la atmósfera, bajo condiciones de turbulencia.
*Cenizas:* Partículas de cenizas finamente divididas arrastradas por gases de combustión.
*Niebla:* Se refiere a aerosoles visibles, formados por agua líquida o hielo dispersos en el aire.
*Humo:* Son partículas sólidas de pequeño tamaño, derivadas de la combustión incompleta, constituidas principalmente por carbón y otros materiales combustibles.

presencia de compuestos orgánicos generados por la combustión incompleta del carbón y derivados del petróleo. Estas partículas son eliminadas por retención y arrastre con las gotas de lluvia.

Muchas partículas son químicamente inertes, pero pueden adsorber substancias químicas activas presentes en la atmósfera. Sin embargo, existen partículas que son altamente corrosivas o tóxicas, debido a su propia naturaleza química o a la presencia de compuestos corrosivos o tóxicos adsorbidos en su superficie.

Aquelas partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 10 μm pueden cruzar las barreras protectoras de la zona superior del sistema respiratorio. Una vez que las partículas entran al tracto respiratorio, se les presentan varios caminos de ingreso al resto del cuerpo. Algunas pueden ser atrapadas por el flujo mucoso que baña una porción del tracto respiratorio. Finalmente, el mucus es tragado y, por lo tanto, las partículas llegan al estómago y a los intestinos. Otras permanecen en los pulmones donde pueden rodearse de tejido y, eventualmente, ser incorporadas al flujo sanguíneo. Debido a estos efectos negativos, las normativas ambientales establecen niveles máximos de exposición a material particulado de tamaño inferior a 10 μm (comúnmente denominado MP10); por ejemplo, en Chile se establece un nivel máximo de 150 $\mu g/m^3$ para una exposición de 24 horas.

Existe poca información respecto al efecto del material particulado sobre la vegetación. Algunos investigadores han señalado que el polvo puede bloquear los poros de las hojas y disminuir la fotosíntesis. También se ha identificado varias substancias presentes en las partículas que causan daño a las plantas, tales como, por ejemplo, fluoruros y compuestos ácidos.

- **Compuestos de Azufre**

El dióxido de azufre ($SO_2$) y el trióxido de azufre ($SO_3$) son los principales óxidos de azufre presentes en la atmósfera. La principal fuente antropogénica de óxido de azufre es la combustión de combustibles fósiles ricos en azufre(ej. carbón, petróleo combustible (*fuel oil*), diesel) y representa cerca de un tercio del total del $S0_2$ atmosférico. El principal componente azufrado del carbón es la pirita ($FeS_3$), la que se oxida a $Fe_2O_3$ y $SO_2$ durante la combustión. Otras actividades industriales relevantes son las refinerías de petróleo y las fundiciones de minerales sulfurados. Alrededor de un 93% de todas las emisiones de $SO_2$ generadas por el hombre provienen del hemisferio norte.

El $SO_2$ es un gas que no se inflama, no es explosivo y es incoloro. En el aire, el $SO_2$ se oxida parcialmente en $SO_3$ y, en presencia de humedades altas, se transforma en ácido sulfúrico y sus sales, por medio de procesos fotoquímicos atmosféricos:

$$SO_2 + ½\ O_2 \longrightarrow SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

El anhídrido sulfuroso es un precursor de aerosoles secundarios (ej. sulfatos),

típicamente asociados a la fracción fina del material particulado. La atmósfera corrosiva, generada bajo dichas condiciones, afecta una gran variedad de materiales tales como el acero, zinc, cobre, y aluminio, formando sulfatos metálicos. Más aún, los materiales de construcción, estatuas, etc., que poseen componentes de carbonato de calcio (caliza, dolomita, mármol y mortero), son especialmente vulnerables al ataque de estas neblinas ácidas:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

Varias especies animales, incluyendo el hombre, responden al dióxido de azufre mediante constricción bronquial, la que aumento en la resistencia al flujo de aire. El anhídrido sulfuroso al ser inhalado se hidrata con la humedad de las mucosas constituyendo un riesgo para la salud de las personas y otras especies animales al producir constricción bronquial. Dicho efecto aumenta con la actividad física, con la hiperventilación, al respirar aire frío y seco y en personas con hiperreactividad bronquial. De acuerdo a los resultados de estudios epidemiológicos de morbilidad, mortalidad o cambios en la función pulmonar en grupos de población sensible, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que no se supere una concentración de $SO_2$ de 500 $\mu g/m^3$ para una exposición de 10 minutos, o de 250 $\mu g/m^3$ para un periodo de 24 horas, o de 50 $\mu g/m^3$ para un periodo de un año. En Chile, las normas vigentes al año 2000 establecen niveles máximos permitidos de 365 $\mu g/m^3$ y 80 $\mu g/m^3$ para periodos de 24 horas y de un año, respectivamente.

Concentraciones elevadas de $SO_2$ y largos tiempos de exposición pueden causar daños severos a las plantas. Los daños agudos parecen estar causados por la absorción rápida del $SO_2$. El tejido dañado de la planta se caracteriza, primeramente, por la apariencia seca y blanqueada, seguida por una decoloración café-rojiza. Los manzanos, perales, pinos y otros árboles son especialmente susceptibles al daño crónico; como también lo son la mayoría de las plantas usadas en la horticultura, la alfalfa, la cebada y el algodón.

Finalmente, entre los compuestos de azufre de relevancia ambiental, se encuentran el sulfuro de hidrógeno ($H_2S$) y los mercaptanos. El $H_2S$ se produce a partir de la reacción del azufre con el hidrógeno, en procesos industriales o naturales. Además, se genera como subproducto en la biodegradación anaeróbica, en presencia de sulfatos. El $H_2S$ tiene un fuerte olor a huevo podrido, que es detectado por el ser humano a muy bajos niveles de concentración (del orden de 6 $\mu g/m^3$). A concentraciones mayores es altamente tóxico y explosivo, por lo que sus emisiones deben mantenerse bajo estricto control. En presencia de oxígeno se oxida a $SO_2$.

Otros contaminantes de interés son los mercaptanos. Estos son compuestos orgánicos sulfurados de bajo peso molecular ($CH_3S$, $C_2H_5S$), de características odoríferas, y se generan tanto en procesos industriales (ej. producción de pulpa sulfatada) como naturales (ej. degradación anaeróbica de material proteico). A bajas concentraciones, no presentan efectos tóxicos y, eventualmente, se oxidan en presencia de oxígeno.

- **Óxidos de Nitrogeno ($NO_X$)**

Los tres óxidos de nitrógeno que se encuentran comúnmente en la atmósfera son: óxido nitroso ($N_2O$), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno ($NO_2$). Estos se denominan genéricamente $NO_X$. El $N_2O$ es un gas relativamente poco reactivo, y es un componente traza de la atmósfera "natural". El NO es un gas incoloro e inodoro; mientras que el $NO_2$ es café-rojizo (color de la atmósfera visto frecuentemente sobre áreas urbanas) y tiene un olor desagradable.

Los óxidos de nitrógeno son producidos directa e indirectamente por procesos de combustión a altas temperaturas. En dichos procesos el $N_2$ presente en el aire se oxida para formar principalmente NO, el que se transforma en $NO_2$ mediante reacciones fotoquímicas. En las zonas urbanas, las concentraciones máximas de $NO_X$ coinciden con los volúmenes máximos de tráfico. Los gases de escape de los motores de automóviles son ricos en NO y pobres en $NO_2$. Generalmente, una pequeña fracción del total de $NO_X$ está presente como $NO_2$. Durante la mezcla inicial del aire con los gases de escape calientes, se oxida parte del NO:

$$2NO + O_2 \longrightarrow 2NO_2 .$$

Las reacciones químicas de los compuestos nitrogenados en la atmósfera son muy importantes en el contexto de los procesos de transformación que ocurren en ese medio. Aparte de las fuentes antropogénicas, los $NO_X$ se forman a partir de las reacciones entre el $N_2$ y el $O_2$ del aire en la alta estratósfera.

El $NO_X$ en la atmósfera, está sujeto a las siguientes reacciones fotoquímicas:

$$NO_2 + \text{luz solar} \longrightarrow NO + O$$
$$O + O_2 \longrightarrow O_3$$
$$O_3 + NO \longrightarrow NO_2 + O_2$$

Estas ecuaciones establecen un ciclo, que otorga concentraciones estacionarias de NO, $NO_2$ y $O_3$. Las constantes de velocidad de reacción son tales, que permiten alcanzar el estado estacionario en forma relativamente rápida.

Finalmente, gran parte del dióxido de nitrógeno atmosférico se convierte en ácido nítrico y sales de nitrato:

$$4NO_2 + O_2 + H_2O \longrightarrow 4HNO_3$$

Las sales de nitrato forman material particulado y/o sedimentan o son arrastradas por la lluvia.

La exposición a óxidos de nitrógeno puede irritar los pulmones, producir constricción bronquial y disminuir la resistencia ante infecciones respiratorias (ej. influenza), particularmente en individuos con enfermedades respiratorias pre-existentes, tales como asma. Estos efectos pueden ser mayores cuando existen otros compuestos alergénicos presentes en el aire. La OMS propone como nivel límite de $NO_2$ una concentración promedio anual de 40 $\mu g/m^3$ para exposiciones

crónicas. En Chile, la norma de calidad de aire para $NO_2$ vigente al año 2000 establece un límite de 100 $\mu g/m^3$ como concentración media aritmética anual.

- **Hidrocarburos**

Además de los hidrocarburos de alto peso molecular, presentes en el material particulado, existe un amplio rango de compuestos orgánicos volátiles, destacándose aquellos que poseen entre 1 y 4 átomos de carbono, ya que se encuentran en estado gaseoso, bajo condiciones ambientales normales. Su importancia ambiental radica en su participación en las reacciones de oxidación fotoquímica. En dichas reacciones, los hidrocarburos se transforman en radicales libres, generándose derivados aldehídos y otros compuestos oxidados, como por ejemplo: formaldehído, acroleína, acetaldehído y nitrato de peroxyacetilo.

- **Oxidantes Fotoquímicos**

Cuando los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos se ponen en contacto, en presencia de luz solar, tiene lugar un conjunto de reacciones químicas complejas que generan contaminantes secundarios, conocidos como *smog fotoquímico.*

El ozono es uno de los oxidantes fotoquímicos más abundantes, y se genera por la reacción entre el $O_2$ y el oxígeno atómico (O), en presencia de un catalizador (M) que estabiliza la molécula de ozono:

$$O_2 + O + M \longrightarrow O_3 + M$$

El ozono se consume en la reacción con el NO para formar $NO_2$:

$$O_3 + NO \longrightarrow NO_2 + O_2$$

El ozono es un fotooxidante que se produce en la troposfera por efecto de la oxidación de monóxido de carbono e hidrocarburos en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. De este modo, los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno constituyen precursores en la formación de ozono troposférico.

Por su parte, el oxígeno atómico se produce debido a la acción de la luz solar sobre el dióxido de nitrógeno. El oxígeno atómico es altamente reactivo y su interacción con el agua genera radicales hidroxilos, los que juegan un papel fundamental en los complejos procesos químicos atmosféricos:

$$O + H_2O \longrightarrow 2\ HO\bullet$$

Los radicales hidroxilos reaccionan con los hidrocarburos (RH), para producir radicales libres de hidrocarburos (R•), en presencia de luz solar (a longitudes de onda menores de 0,38 $\mu m$):

$$NO_2 + \text{luz solar} \longrightarrow NO + O \quad \text{(Reacción de iniciación)}$$

$$OH\bullet + RH \longrightarrow R\bullet + H_2O$$

Estas substancias, a su vez, reaccionan con el NO original para formar más $NO_2$:

$$R\bullet + O_2 + NO \longrightarrow RO\bullet + NO_2$$

$$RO\bullet + O_2 \longrightarrow HO_2\bullet + R'CHO$$

$$HO_2\bullet + NO \longrightarrow HO\bullet + NO_2$$

El efecto neto de estas reacciones, es que una molécula de hidrocarburo convierte dos moléculas de NO a $NO_2$, y produce una molécula de aldehído. De hecho, se produce más $NO_2$ que aquel consumido en la reacción de disociación original, que proporciona el oxígeno atómico inicial, por lo que aumenta la concentración de $NO_2$ y disminuye el nivel de NO.

Tal como se menciona más adelante, el ozono también se genera en la estratosfera donde juega un papel fundamental para proteger la superficie terrestre de la radiación UV. Sin embargo, el ozono troposférico es nocivo para los animales y las plantas, debido a su gran capacidad oxidante que lo hace reaccionar con toda clase de substancias orgánicas. Los efectos típicos del ozono en la salud son cambios en la función pulmonar (ej. exacerbación del asma, inflamaciones pulmonares y alteraciones estructurales del pulmón) que van precedidos por irritación de ojos y de las vías respiratorias en poblaciones sensibles. La OMS establece un límite de concentración de ozono de 120 $\mu g/m^3$ por un período máximo de 8 horas, para el cual los efectos agudos sobre la salud pública son bajos. En Chile, el límite vigente al año 2000 establece una concentración límite de 160 $\mu g/m^3$ para una exposición de 8 horas.

- **Óxidos de Carbono**

Los óxidos de carbono están constituidos por el dióxido de carbono ($CO_2$) y el monóxido de carbono (CO). El $CO_2$ generalmente no se considera como contaminante atmosférico, debido a que es un componente natural de la atmósfera donde juega un importante papel en el efecto invernadero. Sin embargo, existe gran preocupación por las crecientes emisiones de este gas como producto de la combustión, lo que puede afectar el balance térmico terrestre (este aspecto se discute en la Sección 3.1.2 ).

Por su parte, el CO es un contaminante que proviene, principalmente, de la combustión incompleta de cualquier tipo de combustible. También es producido en grandes cantidades por muchas fuentes naturales: a partir de gases volcánicos, incendios forestales, oxidación del metano ambiental, disociación del $CO_2$ en la parte superior de la atmósfera, etc. Los automóviles con motores de combustión interna son una de las principales fuentes de emisión de monóxido de carbono en las zonas urbanas. Las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua, estufas y otros aparatos domésticos que queman combustible también son fuentes

importantes de CO, tanto al aire libre como en ambientes interiores (en este último caso, el humo de cigarrillo puede ser una fuente adicional significativa).

Los posibles mecanismos de eliminación del CO en la atmósfera, son las reacciones con radicales hidroxilos en la tropósfera y estratósfera, que lo transforman en $CO_2$ :

$$2\ HO\bullet + CO \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

El CO tiene efectos serios sobre la salud, principalmente respiratorios y cardio-vasculares. En concentraciones altas, puede causar la muerte, en tiempos de exposición relativamente cortos. En concentraciones menores, como aquellas existentes en el aire urbano, el CO afecta la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. El oxígeno y el monóxido de carbono son transportados dentro del cuerpo humano por la hemoglobina (molécula encontrada en los glóbulos rojos). El $CO_2$ generado en la actividad metabólica es transportado por la sangre hacia los pulmones, donde se intercambia por $O_2$, el que entra en la circulación sanguínea, mediante la acción de la hemoglobina. Desgraciadamente, la afinidad del CO con la hemoglobina es 200 veces mayor que la correspondiente al oxígeno. La hemoglobina a la cual se ha adherido CO se llama carboxihemoglobina (COHb), la que no puede transportar $O_2$ hacia las células. Según la OMS, el nivel de COHb en la sangre de las personas expuestas a CO no debiera superar el 2,5%, respecto al contenido total de hemoglobina. Para asegurar tal meta, la OMS propone concentraciones máximas de CO en el aire de 10 mg/m$^3$ para una exposición de 15 minutos, o 30 mg/m$^3$ para un periodo de 1 hora, o 10 mg/m$^3$ para 8 horas. En Chile, los límites vigentes al año 2000 establecen concentraciones de CO en el aire de 40 mg/m$^3$ y 10 mg/m$^3$ para periodos de 1 hora y 8 horas, respectivamente.

- **Ruido**

El sonido representa la propagación de ondas de presión audibles a través de un medio elástico. El ruido es un sonido indeseable, cuya intensidad, frecuencia y duración, constituyen una molestia para las personas afectadas. El oído humano, transforma estas ondas de presión en señal acústica, con un umbral mínimo del orden de 20 μPa. El nivel de presión sonora (NPS), se define en términos del número de decibelios[3] de presión acústica (P) en relación a una presión de referencia ($P_0$ =20 μPa ):

$$NPS = 20 \log (P/P_0)$$

Los valores de NPS se encuentran en el rango 10-140 dB. El umbral del dolor corresponde a 140 dB (ej. el sonido de un motor a propulsión ubicado a una distancia de 25 m). Los camiones y otras maquinarias pesadas generan NPS del orden de 90-110 dB, mientras que una biblioteca típica presenta 40 dB.

[3] **Decibel (dB)**: Unidad adimensional usada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. De esta manera, el decibel es usado para describir niveles de presión, potencia o intensidad sonora.

Debido a su naturaleza logarítmica, la combinación de varios niveles de presión sonora ($NPS_K$) generados por diferentes fuentes k, requiere convertir dichos valores a sus respectivas presiones acústicas. Dichas presiones acústicas se pueden sumar ($P_T$) y luego calcular el nivel de presión sonora resultante ($NPS_T$) :

$$P_T = \sum_K P_K = \sum_K P_0 10^{NPS_K / 20} \qquad NPS_T = 20 log\left(\frac{P_T}{P_0}\right)$$

La propagación del sonido en el aire depende del tipo de fuente sonora, de las condiciones atmosféricas (dirección del viento, presión y temperatura), y del medio donde se propaga. La onda acústica emitida sufre pérdidas de energía en su propagación, atenuación por el aire, reflexión, absorción y difracción debido a obtáculos, etc. A medida que la onda se aleja de la fuente emisora, su energía decrece. El NPS medido a una distancia determinada de la fuente emisora, disminuirá en 6 decíbeles (dB) si se mide al doble de esa distancia.

El ruido afecta directamente a la salud de las personas y existen estrictas regulaciones sobre los niveles máximos permisibles. En Chile, el Decreto Supremo Nº146/97 establece que para zonas destinadas a usos residenciales se fijan límites de NPS de 55 dB y 45 dB para horario diurno (7-21 h) y nocturno (21-7 h), respectivamente. Dicho Decreto fija un NPS máximo de 70 dB para zonas industriales exclusivas.

- **Radiaciones Ionizantes**

Aquí se incluyen los rayos X, las partículas $\alpha$ y $\beta$, y los rayos $\gamma$. Estas radiaciones tienen serios efectos para la salud de las personas, debido a su poder para ionizar la materia que encuentra a su paso.

Aún cuando existen fuentes de radiactividad naturales, las principales emisiones provienen de fuentes antropogénicas, debido al uso y procesamiento de materiales radiactivos. Las centrales nucleares y las fábricas de material bélico, son los principales usuarios de materiales radiactivos. Sin embargo, los usos difusos, tales como en medicina, instrumentos de laboratorio y análisis químicos, son los principales responsables de emisiones no controladas de radiaciones ionizantes.

- **Otros Contaminantes Atmosféricos**

Existen otros contaminantes atmosféricos que presentan problemas a nivel local. Entre ellos podemos nombrar:

***Compuestos Halogenados***:

**$Cl_2$ :** es un gas pesado, de color amarillento con un fuerte olor característico, que se utiliza ampliamente en diferentes aplicaciones industriales. Es altamente oxidante, y se utiliza como germicida en la potabilización de agua. Produce fuertes irritaciones en las mucosas del sistema respiratorio.

**HCl:** es un contaminante que se emite, normalmente, en los procesos de combustión de plásticos clorados u otros compuestos organoclorados. Es muy corrosivo e irritante.

**HF:** es un contaminante gaseoso derivado de diversas actividades industriales específicas, tales como la producción de aluminio, de fertilizantes fosfatados y de ciertos tipos de cementos. Se ha demostrado que causa perjuicios graves y extensos a la vegetación.

**Compuestos organoclorados**: Existen varios compuestos de este tipo que se emiten a la atmósfera en diferentes actividades:

-Los *bifenilos policlorados (PCB):* Son un grupo de compuestos cuya fórmula general es $C_{12}H_{10-X}Cl_X$, con diferentes niveles de sustitución (existen 209 combinaciones posibles). A pesar de que su estado normal es líquido, se pueden encontrar presentes en los humos derivados de la combustión incompleta de polímeros clorados. Son muy tóxicos y de baja biodegradabilidad, por lo que persisten en el ambiente por largo tiempo. Debido a su alta constante dieléctrica y baja presión de vapor, se utiliza industrialmente como aislante en condensadores eléctricos y transformadores.

-Las *dioxinas y furanos* han despertado el interés debido a su altísimo potencial tóxico. Constituyen una familia de compuestos aromáticos clorados tricíclicos. Las dioxinas se diferencian de los furanos en la cantidad de átomos de oxígeno presentes en la molécula (uno en los furanos, dos en las dioxinas). Se conocen un total de 75 isómeros de dioxinas, llamadas genericamente policlorodibenzo-para-dioxinas (PCDD), y 135 isómeros de furanos, llamados policlorodibenzofuranos (PCDF). Son muy poco solubles en agua (menos de 0,12 ppb) y tienen una bajísima presión de vapor, por lo que son poco volátiles. Son químicamente estables a temperaturas menores de 850ºC, y se descomponen con facilidad por acción de la luz en presencia de hidrógeno. Su gran estabilidad les permite resistir los ataques químicos y biológicos existentes en el suelo y en el agua, por lo que son altamente persistentes y bioacumulables. Su emisión a la atmósfera proviene de la combustión incompleta de compuestos orgánicos clorados (plásticos clorados, lignina clorada). También se generan en la reacción del $Cl_2$ y los compuestos fenólicos.

***Metales pesados***

Los metales pesados se encuentran en la atmósfera como material particulado. Algunos metales, tales como el mercurio y el tetraetilo de plomo, poseen una alta presión de vapor, por lo que pueden presentarse en estado gaseoso. En este grupo de contaminantes se incluyen además, al cadmio, cromo, cobre, zinc y arsénico. En general, son persistentes y bioacumulables en los seres vivos.

***Asbestos***

El asbesto es otro contaminante atmosférico importante. Asbesto es el nombre general de un grupo de minerales fibrosos, todos los cuales son básicamente silicatos hidratados. Estos varían en el contenido metálico, en la resistencia al calor y en otras propiedades. Estas variaciones determinan los usos industriales de los diferentes tipos de asbesto, e influyen en sus efectos biológicos. Una exposición crónica durante varios años, produce una enfermedad caracterizada por dificultades severas al respirar, conocida como *asbestosis*. Partes de las fibras inhaladas se fijan firmemente en el tejido pulmonar; la reacción natural del organismo consiste en cubrir estas fibras con un complejo fierro-proteíco, formando cuerpos asbestosos. La inhalación excesiva de las fibras, produce una formación progresiva de tejido fibroso, el que eventualmente cubre gran parte de los pulmones.

La principal causa de muerte entre trabajadores de la industria del asbesto es el cáncer pulmonar. Se debe tener en consideración que el asbesto-cemento es muy utilizado en Chile en la construcción de viviendas. En la actualidad, se sabe que una exposición moderada a polvos de asbesto-cemento aumenta el riesgo de cáncer al pulmón en 10 veces, comparado con la población general. En personas fumadoras el riesgo aumenta en 90 veces.

**Metano**

El metano ($CH_4$) se encuentra presente naturalmente en la atmósfera, y se genera a partir de los procesos biológicos anaeróbicos. Ello ocurre en los sedimentos de los cuerpos de agua superficiales, pantanos, en los intestinos de los rumiantes y en otros medios anóxicos. Los vertederos de residuos biodegradables emiten metano, generado por la acción de bacterias anaeróbicas. El metano se oxida en la atmósfera a $CO_2$.

### 3.1.2) Cambios Atmosféricos Globales

En las últimas décadas, se han acumulado datos científicos que indican que la Humanidad está amenazada por el peligro del calentamiento global de la Tierra, y el aumento de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Estos peligros son serios, ya que la existencia de la vida en la Tierra es posible gracias a un delicado balance de fenómenos naturales, que han sido seriamente perturbados por la actividad humana.

Aún cuando la naturaleza de estos fenómenos es diferente, ambos se deben a cambios en la composición química de nuestra atmósfera. La atmósfera está constituida en un 99,96% (en volumen, excluyendo el vapor de agua) por $N_2$, $O_2$ y Argón, los que no han experimentado mayores variaciones en muchos milenios. Sin embargo, existen otros gases atmosféricos, que se encuentran en concentraciones de unas pocas partes por millón, cuya composición ha sufrido cambios significativos en las últimas décadas. Los más importantes, desde el punto de vista ambiental, son el dióxido de carbono ($CO_2$), el metano ($CH_4$), el óxido de nitrógeno ($N_2O$), el ozono

($O_3$) y los clorofluorocarbonos o halocarbones (CFC).

**El Calentamiento Global de la Tierra**

Tal como se menciona en el Capítulo 2, la composición química de la atmósfera juega un papel determinante en el balance térmico, ya que ésta absorbe parte de la radiación solar y de la energía radiada por la Tierra. La longitud de onda de la radiación depende de la temperatura en la superficie del cuerpo emisor. De acuerdo a la ecuación de Wien, la longitud de onda a la cual se obtiene la máxima intensidad en el espectro emitido por un cuerpo negro a una temperatura T (K) es :

$$\lambda_{max} = \frac{2.898}{T\,(K)} \qquad (\mu m)$$

Por lo tanto:

- la energía solar incidente tiene longitudes de onda corta (menos de 4 μm, con una máxima intensidad alrededor de 0.5 μm), ya que su fuente posee una temperatura del orden de 6.000 K en la superficie.

- la energía radiante de la Tierra, tiene longitudes de onda larga (radiación térmica), mayores de 4 μm, con una intensidad máxima a 10 μm, ya que la superficie terrestre tiene una temperatura media del orden de 300 K.

Una parte importante de la energía solar ultravioleta es absorbida por el $O_2$ y $O_3$ estratosférico, parte de la cual se emite posteriormente como radiación térmica de onda larga. A su vez, la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, es absorbida por aquellos gases atmosféricos que absorben ondas largas ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$, $H_2O$, $O_3$, CFC), y re-emitida hacia la superficie, produciendo un "efecto de invernadero". La importancia de dichos gases se ilustra en la Tabla 3.1, que muestra sus respectivas concentraciones en la atmósfera, y su contribución al efecto invernadero. Es interesante notar que los CFC's tienen una importante contribución a dicho efecto, a pesar de su baja concentración, ya que absorben en el rango de longitud de onda correspondiente a la ventana de radiación atmosférica, donde otros gases no tienen mayor capacidad de absorción (7-13 μm).

Por su parte, el vapor de agua absorbe radiación de longitud de onda menor de 8 μm y mayor de 18 μm; por lo tanto, si bien contribuye al efecto invernadero, tiene menor impacto sobre la ventana de radiación atmosférica entre 7 y 12 μm.

**TABLA 3.1: PRINCIPALES GASES INVERNADERO Y SUS CARACTERÍSTICAS**

| PRINCIPALES GASES INVERNADERO | CONCENTRACIÓN ATMOSFÉRICA (ppm) | INCREMENTO ANUAL % | CONTRIBUCIÓN ACTUAL AL EFECTO INVERNADERO % | RADIACIÓN ABSORBIDA μm |
|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 355 | 0,4 | 57 | 2,7 4,3 15 |
| $CH_4$ | 1,68 | 1,0 | 12 | 3 7,7 |
| $N_2O$ | 0,31 | 0,2 | 6 | 4,5 7,8 |
| CFC | $2,2\ 10^{-3}$ | 5,0 | 25 | 7-20 |

En las últimas décadas, la atención ha estado principalmente centrada en las emisiones de $CO_2$, ya que están directamente relacionadas con la generación de energía a partir de combustibles fósiles. El aumento de la actividad industrial genera un incremento de las necesidades energéticas y, por consecuencia, acelera la tasa de emisión de $CO_2$. El ciclo natural del carbono tiene como pilar la actividad fotosintética. Durante la fotosíntesis, el $CO_2$ es utilizado para sintetizar moléculas orgánicas, en presencia de energía solar, liberando $O_2$ como subproducto. De este modo, el carbono es removido constantemente de la atmósfera y asimilado por las plantas terrestres y organismos fotosintéticos acuáticos. Así se establece un balance entre las emisiones de $CO_2$ (debido a la combustión y a la respiración de los organismos vivientes) y el consumo de $CO_2$ por fotosíntesis. El efecto combinado de aumento de la generación de $CO_2$ en la actividad humana, y la destrucción de áreas boscosas, resulta en un desequilibrio que aumenta la concentración media de $CO_2$ en la atmósfera. La implementación de fuentes alternativas de energía (es decir, no basadas en la combustión de material orgánico), medidas de conservación y aumento de eficiencia energética, sumada a extensos programas de reforestación, pueden revertir la tendencia actual.

- **Destrucción de la Capa de Ozono**

El ozono ($O_3$) presente en la estratosfera absorbe los rayos ultravioletas. Aunque está presente en pequeñas cantidades (del orden de $10^{-6}$ ppm), su presencia es vital para la vida sobre la Tierra, porque absorbe radiación UV-B entre 0,20 y 0,32 μm, que es letal para los seres vivos. Se ha demostrado que un aumento de la exposición a la radiación ultravioleta tiene serios efectos directos e indirectos sobre la salud humana (mutaciones y cáncer a la piel, riesgo de cataratas, afecta el sistema inmunológico humano). Aparte de estos efectos directos sobre los seres humanos, la exposición a niveles elevados de radiación UV, afecta también el desarrollo de otras especies terrestres y acuáticas. Por ejemplo, se ha demostrado que la productividad de las cosechas disminuye significativamente debido al aumento de la radiación UV. Por su parte, el fitoplancton y otras especies marinas son afectadas debido a que pasan la mayor parte de su existencia cerca de la superficie del agua.

La gravedad de estos efectos adversos sobre los seres humanos, y todas las otras formas de vida expuestas a la radiación solar, depende de la concentración de ozono

en la estratosfera, ya que éste actúa como un verdadero escudo protector contra las radiaciones ultravioleta.

A su vez, la concentración de $O_3$ en la atmósfera está determinada por el balance entre los procesos físico-químicos de formación y destrucción de ozono. El proceso de formación natural del $O_3$, tiene como base la reacción del oxígeno con la radiación UV, en presencia de un catalizador; la reacción neta es:

$$3\,O_2 + h\nu \xrightarrow{M_1} 2\,O_3$$

donde el catalizador, $M_1$, representa una tercera molécula ($O_2$ o $N_2$) que absorbe la energía liberada por la reacción y *hv* es la radiación ultravioleta.

La destrucción natural del ozono se debe a la fotólisis, en presencia de un catalizador:

$$2\,O_3 + h\nu \xrightarrow{M_2} 3\,O_2$$

Este proceso incluye una compleja secuencia de reacciones en cadena, donde se generan radicales libres. El efecto neto es la formación de una capa de ozono y la absorción de radiación UV. El calentamiento que resulta de este proceso es responsable de la inversión térmica que caracteriza a la estratósfera, lo que le otorga una alta estabilidad a la atmósfera, y permite un largo tiempo de residencia a los contaminantes estratosféricos.

Ciertos contaminantes atmosféricos (por ejemplo, óxidos de nitrógeno, cloro, bromo), catalizan las reacciones de destrucción del ozono, y cada una de estas moléculas puede destruir miles de moléculas de $O_3$ antes de perder su poder catalítico.

Afortunadamente, gran parte de los contaminantes gaseosos son absorbidos por las lluvias, o destruídos en reacciones de oxidación fotolítica, antes de que lleguen a la estratósfera. Solamente los más insolubles en agua y químicamente más estables, pueden alcanzar la estratósfera (especialmente los CFC's). El perfil vertical de concentración de ozono refleja esta situación, encontrándose los mayores niveles en las capas superiores de la estratósfera.

Sin embargo, existe clara evidencia de que tanto la concentración como el espesor de la capa de ozono están disminuyendo significativamente, con el consiguiente aumento de la intensidad de radiación UV-B, que llega a la superficie terrestre. Aparte de los efectos sobre la vida ya mencionados, la presencia de radiación UV-B cerca de la superficie promueve la formación de ozono a bajas alturas. En las áreas urbanas, el ozono participa en reacciones fotoquímicas con otros contaminantes gaseosos (ej.: hidrocarburos) generando subproductos dañinos para la salud. Esto es de vital importancia en la formación del smog fotoquímico en las grandes ciudades.

El "agujero de ozono" sobre la Antártica, que aparece en la primavera Austral a nivel del vórtice polar, ilustra la gravedad de la situación. Chile y Argentina son

particularmente afectados por tal fenómeno, constatándose bajas concentraciones de ozono sobre su territorio austral durante dicho período. Los efectos de largo plazo de estos fenómenos aún son impredecibles, aunque su gravedad está fuera de dudas.

- **Los CFC y su Impacto Ambiental Global**

En su definición más general, el término CFC se refiere a un conjunto de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, cuyos átomos de hidrógeno han sido reemplazados por átomos de halógenos (fluor, cloro, bromo). A diferencia de todos los otros contaminantes atmosféricos, los CFC no se generan naturalmente, sino que son sintetizados industrialmente.

Los CFC's totalmente halogenados son inertes, no-inflamables, de baja toxicidad e insolubles en agua. Ellos son los que presentan mayor impacto ambiental. Aquellos CFC's que poseen átomos de hidrógeno son menos estables y sufren descomposición antes de alcanzar la estratosfera.

Los CFC son utilizados, principalmente, para la formación de aerosoles y como refrigerantes. La empresa DuPont estableció el nombre de Freones para los CFC, con un sistema de numeración que indica la cantidad de átomos de C, H y F [4].

Aquellos compuestos que además contienen bromo,se denominan halones. A pesar de que la producción mundial de halones es pequeña en relación al resto, su efecto ambiental es serio, debido al alto poder catalítico del bromo.

**TABLA 3.2: PRINCIPALES CARBONOS HALOGENADOS**

| PRODUCTO | FÓRMULA | PRODUCCIÓN MUNDIAL (1985) TON/AÑO | PRINCIPALES USOS |
|---|---|---|---|
| CFC-11 | $CFCl_3$ | 341.500 | Aerosoles, espumas, refrigerantes |
| CFC-12 | $CF_2Cl_2$ | 443.700 | Aerosoles, refrigerantes |
| CFC-113 | $C_2F_3Cl_3$ | 163.200 | Solventes en electrónica |
| Halón-1301 | $CF_3Br$ | 25.000 | Extintores de llama |
| Halón-1211 | $CF_2ClBr$ | | |
| Halón-2402 | $C_2F_4Br_2$ | | |

Aparte de su aporte al efecto invernadero mencionado anteriormente, la importancia ambiental de los CFC radica en su gran estabilidad química e insolubilidad en agua, lo que les permite llegar a las capas superiores de la estratosfera, donde con el tiempo sufren fotólisis, debido a la intensa radiación UV (en el rango 0,19-0,22 μm). Los átomos de halógeno generados (principalmente cloro y bromo) participan como potentes catalizadores de las reacciones de destrucción del ozono. Cabe destacar que un átomo de bromo es 30 a 120 veces más activo que el cloro en su efecto anti

[4] Para determinar la fórmula química de un CFC a partir de su numeración se debe sumar 90 a dicho número. El primer dígito (izquierda) corresponde al número de átomos de C en la molécula; el dígito del medio corresponde al número de átomos de H, mientras que el dígito de la derecha indica el número de átomos de F. El resto de los enlaces con el carbono está cubierto por átomos de Cl.

ozono. Basta que exista una parte por billón de estos gases traza, para que la concentración de ozono estratosférico cambie significativamente. Debido a su gran estabilidad, los CFC tienen vidas medias del orden de 60-200 años, lo que agrava aún más su impacto ambiental de largo plazo.

En 1974, Molina y Rowland publicaron en la revista *Nature* las primeras evidencias científicas del efecto destructor de $O_3$ de los CFC usados en aerosoles. En ese entonces, el consumo de CFC-11 y CFC-12 en aplicaciones de aerosoles en USA era del orden de 200.000 ton/año. Como respuesta, en 1979 la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) prohibió el uso de esos CFC en aerosoles no esenciales. En la actualidad, el consumo de CFC en esa aplicación en USA es de alrededor de 10.000 ton/año. Sin embargo, el uso de CFC en otras aplicaciones ha aumentado considerablemente.

En casi todos los usos de CFC, existen sustitutos de menor impacto ambiental global. Sin embargo, en muchos casos los sustitutos imponen costos adicionales, debido al mayor precio del producto o a las dificultades de uso. Por ejemplo, los halones pueden ser reemplazados como extintores de incendios, por sistemas en base a $CO_2$ combinado con sistemas de rociado y espumas livianas. Los aislantes térmicos en base a fibra de vidrio, pueden sustituir las espumas rígidas de poliestireno (que requieren CFC para su manufactura), aún cuando son menos eficientes por unidad de espesor. En aplicaciones de aerosoles, los CFC han sido reemplazados en parte por isobutano, propano, $CO_2$ o sistemas de bombeo. En el área de refrigerantes, existen varios sustitutos, tales como amoniaco, isobutano, $CO_2$, cloruro de metilo, etc. Sin embargo, estos compuestos presentan problemas debido a su toxicidad, inflamabilidad, o a requerimientos de alta presión de operación, imponiendo mayores costos en las instalaciones.

El 16 de Septiembre de 1987, en Montreal (Canadá), 35 países (incluyendo EEUU, la Unión Europea y Chile) firmaron un Protocolo sobre el control de substancias que destruyen la capa de ozono, estableciendo que para 1998 las emisiones debían ser reducidas a un 50% por debajo de los niveles existentes en 1986. Los gases bajo escrutinio del Protocolo son: CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115 y los halones. El Protocolo de Montreal considera una serie de incentivos para reducir los efectos económicos adversos de dichas restricciones. El acuerdo promueve la cooperación entre países signatarios, en las áreas de investigación para formular alternativas tecnológicas y nuevos productos. A su vez, se facilita el acceso a la información sobre producción y consumo de los compuestos bajo control y se están desarrollando diferentes iniciativas para una regulación más eficiente.

Desgraciadamente, aún cuando el Protocolo de Montreal se cumpliese en su totalidad, la vida media de los CFC es muy larga y su concentración media en la atmósfera seguirá aumentando o se mantendrá por muchos años. Las proyecciones demuestran que, incluso con una reducción del 50% respecto de los consumos en 1986, la concentración media de CFC-12 (actualmente del orden de $4\ 10^{-4}$ ppm) se duplicará en los próximos 60 años (la vida media del CFC-12 es de 150 años). Las mismas proyecciones demuestran que se requeriría una reducción del orden de 87% para lograr mantener constante la concentración actual de CFC-12. Por otra parte, la concentración de CFC-11 parece haber llegado a un nivel estacionario, del

orden de 2,5 $10^{-4}$ ppm, lo que demuestra la efectividad de las medidas acordadas en el Protocolo de Montreal.

### 3.1.3) Transporte y Destino de los Contaminantes Atmosféricos

La calidad del aire local varía ampliamente, aún cuando las tasas de emisión de contaminantes gaseosos permanezcan relativamente constantes, debido a que una gran parte de los contaminantes atmosféricos son eliminados a través de varios mecanismos físicos y químicos naturales.

- **Dispersión Física**

Los vientos permiten la dispersión de los gases arrastrándolos en dirección horizontal y vertical. La facilidad con que los contaminantes se dispersan verticalmente, está determinada principalmente, por la forma como la temperatura del aire varía con la altura, lo que es resultante de un complejo balance térmico local. La capacidad de dilución del ambiente aéreo está limitada por la velocidad del viento y por la altura que pueden alcanzar las emisiones gaseosas.

Debido a la dispersión, la concentración del contaminante a nivel de suelo varía con la distancia desde el punto de emisión, existiendo un punto o zona de mayor concentración, que representa la zona de máximo impacto debido a tales emisiones. Más adelante se revisan los modelos utilizados para describir estos procesos.

- **Absorción Debido a la Lluvia.**

Los componentes de mayor solubilidad en agua serán eliminados por las lluvias y transferidos al suelo y a los cuerpos acuáticos. Su impacto dependerá de la cantidad de contaminantes absorbidos, y las características del área afectada por las precipitaciones. Los sólidos finos serán arrastrados fácilmente por las lluvias, sin que presenten un mayor impacto ambiental posterior. Sin embargo, la lluvia ácida (pH 4-6), formada debido a la absorción de óxidos de azufre y nitrógeno, puede afectar seriamente las tierras forestales y de cultivo, al bajar el pH del suelo, inhibiendo o destruyendo los microorganismos y la flora existente. En ciertos casos, dichos efectos transcienden las fronteras nacionales; por ejemplo, las emisiones de $SO_x$ y $NO_x$ provenientes de las centrales termoeléctricas británicas (en base a carbón mineral) han tenido efectos desastrosos sobre los bosques y terrenos agrícolas escandinavos, debido a la lluvia ácida generada. Las precipitaciones ácidas sobre las aguas superficiales pueden afectar su calidad, particularmente en aquellos casos de altas tasas de emisión. Los lagos son los principales afectados por la lluvia ácida, debido a la gran superficie expuesta a las precipitaciones, y a los largos tiempos de residencia que los caracterizan. Por su parte, la lluvia ácida puede tener poco efecto sobre la vida marítima, debido a la alta capacidad de autorregulación del pH que tiene el agua de mar.

- **Transformaciones Fotoquímicas**

Los procesos fotoquímicos atmosféricos transforman los contaminantes volátiles a través de una compleja cadena de reacciones fotoquímicas. Tal como se describió en secciones anteriores, dichas reacciones pueden dar origen a contaminantes secundarios nocivos, particularmente en áreas urbanas con altos niveles de contaminación.

### 3.1.4) Modelos de Dispersión Atmosférica

Además de la cantidad de contaminantes emitidos, la calidad del aire en un lugar dado depende, en gran medida, de las características dinámicas de la atmósfera local. Dichos tópicos caen dentro del ámbito de la meteorología. A continuación se introducirá en forma muy general aquellos conceptos relevantes al transporte de los gases en la atmósfera.

El perfil vertical de temperatura del aire, es un factor determinante en el mecanismo de dispersión atmosférica de los contaminantes. Una de las características de la troposfera es la disminución gradual de la temperatura con la altura. Cuando una pequeña porción de aire está más caliente que el aire en la su entorno, su menor densidad lo hace ascender. En la medida que asciende, experimenta una dilatación, debido a la menor presión atmosférica que existe a mayor altura. Si se dilata adiabáticamente, su temperatura disminuye, generándose un perfil de temperatura decreciente con la altura. El gradiente de temperatura adiabático ideal del aire seco es de aproximadamente -1ºC / 100 m. Es decir, por cada 100 m de altura, la temperatura ambiente disminuye en 1ºC.

En la realidad, el aire tiene un contenido de humedad significativo y, al ascender, parte del vapor de agua presente en el aire sufre condensación, por lo que el gradiente de temperatura adiabático promedio es del orden de –0,65ºC/100 m.

- **Estabilidad atmosférica**

Los niveles de estabilidad atmosférica se determinan comparando el gradiente de temperatura real con respecto al gradiente de temperatura adiabático ideal. La estabilidad se define en términos de la facilidad o dificultad impuesta por la atmósfera para el movimiento vertical de las masas de aire:

- Una atmósfera es estable cuando impide los movimientos verticales de aire.
- Una atmósfera es inestable, cuando se favorece el movimiento ascendente de las masas de aire.

Cuando la temperatura aumenta con la altura (fenómeno denominado *inversión térmica*), la densidad de la masa de aire más cercana al suelo es mayor que la de la masa superior, por lo que no se produce un movimiento ascendente del aire, dificultando la dispersión de los contaminantes. Ello representa una condición de alta estabilidad atmosférica.

Las inversiones térmicas se pueden generar por diferentes razones:

- *Inversión por radiación*: Típicamente, se origina durante las noches de invierno, cuando la capa de aire cercana al suelo se enfría más rápidamente que las capas vecinas más altas. Esta inversión térmica tiende a desaparecer durante el día, cuando la radiación solar calienta la superficie.

- *Inversión por subsidencia*: Se debe a la presencia de sistemas de alta presión (anticiclones). El movimiento descendente de las grandes masas de aire, genera un calentamiento (por compresión) del aire cercano a la superficie terrestre. La inversión térmica de este tipo puede durar días o, incluso, meses. Este fenómeno es bastante complejo, ya que involucra la dinámica de la atmósfera a escala planetaria.

- *Inversión frontal*: Se origina cuando se encuentran frentes cálidos y fríos, donde la masa de aire frío circula bajo la capa de aire caliente.

Las condiciones geográficas y topográficas (ej.: las brisas marinas, la presencia de valles, los vientos de las laderas de los cerros, entre otros) tienen una gran influencia sobre el perfil térmico.

La presencia de grandes concentraciones urbanas también afecta el perfil vertical de temperatura, particularmente cerca de la superficie. La alta densidad de fuentes de calor (sistemas de calefacción, motores de combustión interna, etc), la capacidad de las estructuras urbanas para mantener el calor y las mayores concentraciones de $CO_2$ en las cercanías del suelo, alteran el perfil térmico. En muchos casos, se constata la creación de corrientes ascendentes en los centros de mayor actividad urbana, descendiendo en la periferia, desde donde circula en forma radial de vuelta hacia dichos centros, formando anillos de convección.

Para fines de modelación, la estabilidad atmosférica se clasifica en base a los criterios establecidos por Pasquill y Gifford (1961), que consideran 6 categorías de estabilidad, de acuerdo a la velocidad del viento, nubosidad y radiación solar:

A = Atmósfera muy inestable
B = Atmósfera moderadamente inestable
C = Atmósfera levemente inestable
D = Atmósfera neutra
E = Atmósfera moderadamente estable
F = Atmósfera estable

La Tabla 3.3, muestra las condiciones meteorológicas correspondientes a cada clase de estabilidad atmosférica, de acuerdo a Pasquill y Gifford:

**TABLA 3.3: CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA DE ACUERDO A PASQUILL Y GIFFORD**

| VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s) (a 10 m de altura) | RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL DÍA | | | NUBOSIDAD NOCTURNA | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Fuerte | Moderada | Baja | Nublado (>4/8) | Claro (<3/8) |
| < 2 | A | A - B | B | E | F |
| 2 – 3 | A – B | B | C | E | F |
| 3 – 5 | B | B – C | C | D | E |
| 5 – 6 | C | C – D | D | D | D |
| > 6 | C | D | D | D | D |

- **Emisiones Gaseosas desde Chimeneas**

La forma y extensión de la pluma (o penacho) de gases emitidos desde una chimenea depende del diseño de ésta, de la velocidad y temperatura de salida de los gases, del tipo de contaminantes emitidos, del relieve y de la naturaleza del suelo, y de las condiciones meteorológicas locales. Las Figuras siguientes, muestran 4 diferentes ejemplos de tipos de plumas, para distintas clases de estabilidad atmosférica.

Es importante predecir el comportamiento de una pluma, para evaluar el efecto de la emisión sobre la calidad del aire. El modelo más utilizado está basado en la suposición de que la concentración promedio del contaminante en la dirección perpendicular al viento, desde la fuente de emisión, presenta una distribución normal de Gauss.

Si observamos la pluma en un instante dado, podemos constatar que ella tiene una forma irregular, producto de la dinámica atmosférica en ese momento. Por ejemplo, puede presentar una forma serpenteante, tal como se muestra en las Figuras 3.2 y 3.6. Un tiempo más tarde, la pluma puede haber cambiado totalmente su forma. Si se registran las variaciones de la forma de la pluma en el tiempo, se podría obtener una envoltura promedio representativa. El perfil de concentración promedio presentaría mayor valor de concentración en la zona central, disminuyendo hacia la periferia de la envoltura, de un modo similar al de una distribución Gaussiana.

En su formulación matemática más sencilla, el modelo supone condiciones de estado permanente, es decir, la tasa de emisión de contaminantes, su temperatura y velocidad de salida, así como las condiciones meteorológicas, se mantienen constantes. Además, se supone que el contaminante no sufre transformaciones químicas (es decir, es un contaminante conservativo), ni se absorbe en la superficie del suelo (de hecho, el modelo supone que el contaminante se refleja totalmente una vez que toca el suelo). Esta última condición no es aplicable en el

caso de la dispersión de material particulado.

El sistema de coordenadas tridimensional mostrado en la Figura 3.6, presenta la chimenea situada en el origen, con el viento en la dirección X. Interesa predecir la concentración a nivel del suelo, es decir, cuando Z = 0. Dicha concentración en una posición (X , Y) dada, se obtiene a partir de:

$$C_{X,Y} = \frac{Q}{\pi v \sigma_Y \sigma_Z}\left(\exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_Z^2}\right)\right)\left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_Y^2}\right)\right)$$

donde:

| | | |
|---|---|---|
| $C_{X,Y}$ | = | concentración a nivel del suelo, en el punto X,Y (mg/m$^3$) |
| $X$ | = | distancia en la dirección del viento desde el punto de emisión de los gases (m) |
| $Y$ | = | distancia horizontal desde el eje central de la pluma (m) |
| $Q$ | = | flujo másico de contaminantes emitidos (mg/s) |
| $h$ | = | altura de la chimenea (m) |
| $H$ | = | altura efectiva de elevación de la pluma (m) |
| $V$ | = | velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s) |
| $\sigma_Y$ | = | coeficiente de dispersión horizontal (m) |
| $\sigma_Z$ | = | coeficiente de dispersión vertical (m) |

Si se requiere la concentración del contaminante en la dirección del viento, a lo largo del eje central de la pluma, se utiliza la expresión anterior con Y = 0.

La velocidad del viento generalmente se mide en anemómetros ubicados a 10 metros de altura. Para estimar la velocidad del viento a una altura *H* dada, a partir de una velocidad $v_0$ , medida a una altura $H_0$ , se puede utilizar la siguiente relación:

$$v = v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^P$$

donde:

*p* = es un parámetro adimensional, depende de la estabilidad atmosférica.

**TABLA 3.4: PARÁMETRO ADIMENSIONAL "p" EN FUNCIÓN DE LA ESTABILIDAD.**

| CLASE DE ESTABILIDAD | PARÁMETRO *P* |
|---|---|
| A, B | 0,15 |
| C | 0,20 |
| D | 0,25 |
| E | 0,40 |
| F | 0,60 |

Los coeficientes $\sigma_Y$ y $\sigma_Z$ representan la desviación estándar de la curva de

distribución normal de concentración (horizontal y vertical, respectivamente). Estos se deben obtener a partir de datos empíricos, y varían con la distancia desde el punto de emisión y con las condiciones topográficas. A modo de referencia, se presentan dos correlaciones publicadas en Masters (1991):

$$\sigma_Y = a\,X^{0,894} \quad \text{(m)}$$
$$\sigma_Z = c\,X^{d} + f \quad \text{(m)}$$

donde $X$ se expresa en kilómetros, para obtener los coeficientes de dispersión en metros. Las constantes *a, b, c, d y f,* se muestran en la Tabla 3.5:

**TABLA 3.5: VALORES DE LAS CONSTANTES a-f PARA EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE DISPERSIÓN**

| **ESTABILIDAD** | | **X < 1 km** | | | **X >1 km** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *a* | *c* | *d* | *f* | *c* | *d* | *f* |
| A | 213 | 440,8 | 1,94 | 9,3 | 459,7 | 2,09 | -9,6 |
| B | 156 | 106,6 | 1,15 | 3,3 | 108,2 | 1,10 | 2,0 |
| C | 104 | 61,0 | 0,91 | 0 | 61,0 | 0,91 | 0 |
| D | 68 | 33,2 | 0,73 | -1,7 | 44,5 | 0,52 | -13,0 |
| E | 51 | 22,8 | 0,68 | -1,3 | 55,4 | 0,31 | -34,0 |
| F | 34 | 14,4 | 0,74 | -0,4 | 62,6 | 0,18 | -48,6 |

La Tabla 3.6 ilustra algunos valores típicos de coeficientes de dispersión calculados a partir de dichas correlaciones, para diferentes condiciones.

La elevación efectiva de la pluma, $H$, depende de las condiciones meteorológicas, de la temperatura y velocidad de salida de los gases, y del diseño de la chimenea. Las relaciones presentadas en literatura utilizan un factor de flujo convectivo, $F$, definido como:

$$F = g\,r^2\,v_G\left(1 - \frac{T_A}{T_G}\right)$$

$F$ = factor convectivo ($m^4/s^3$)
$g$ = aceleración de gravedad (9,8 $m/s^2$)
$r$ = radio interno de la chimenea (m)
$v_G$ = velocidad de salida de los gases (m/s)
$T_G$ = temperatura de salida de los gases (K)
$T_A$ = temperatura del aire (K)

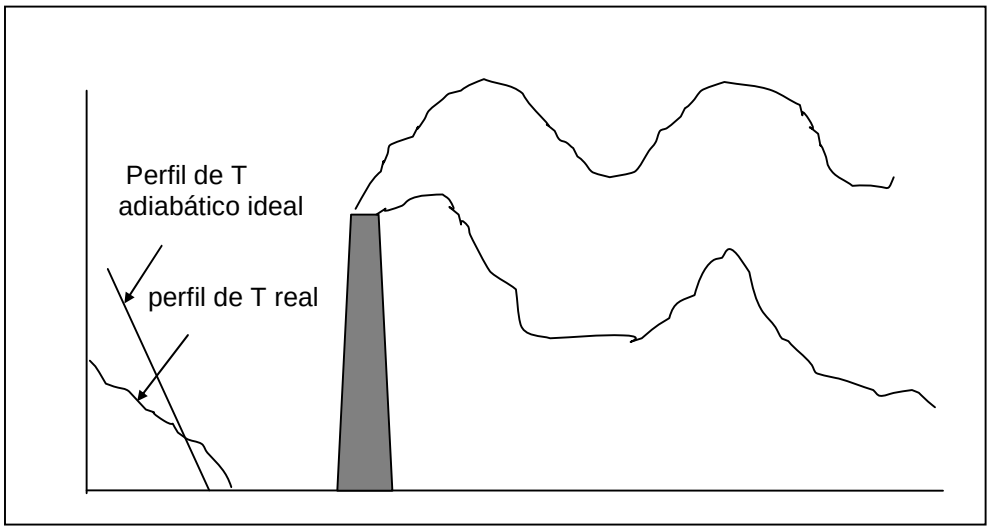



**FIGURA 3.2: DISPERSIÓN EN FORMA SERPENTEANTE. ATMÓSFERA INESTABLE, BUENA DISPERSIÓN DE LOS GASES. SIN EMBARGO, LA PLUMA PUEDE TOCAR EL SUELO POR CORTOS INTERVALOS.**

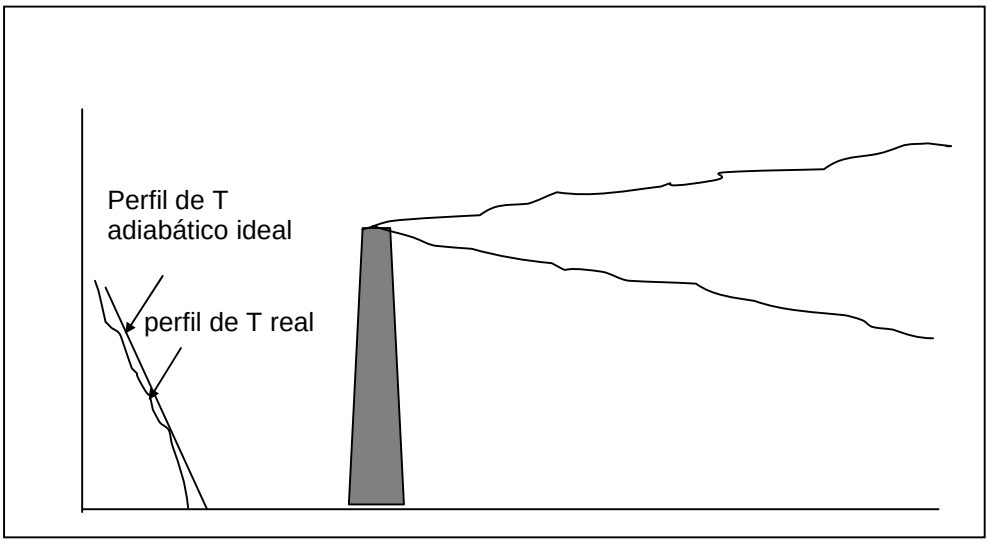



**FIGURA 3.3: DISPERSIÓN EN FORMA DE CONO. PERFIL DE TEMPERATURA SIMILAR AL PERFIL ADIABÁTICO IDEAL. ATMÓSFERA LEVEMENTE INESTABLE. LLEGA AL SUELO A MAYOR DISTANCIA.**

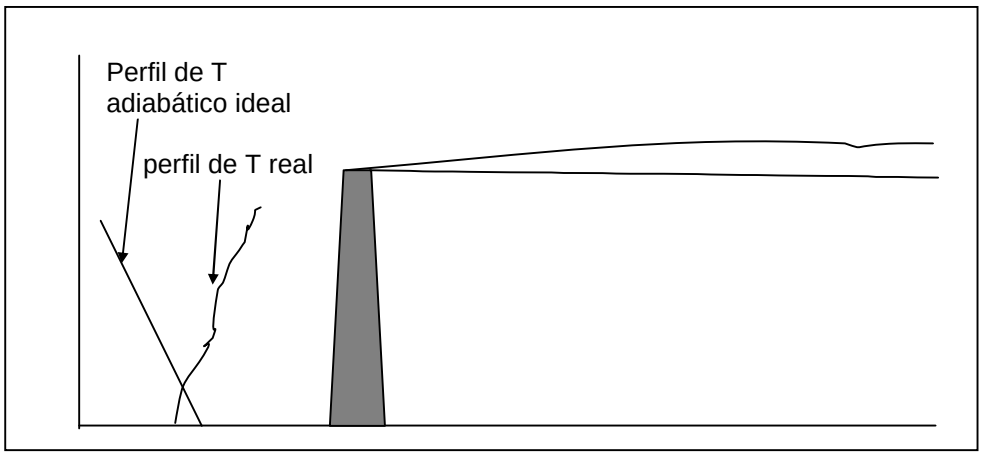



**FIGURA 3.4: DISPERSIÓN EN FORMA DE ABANICO. PERFIL DE TEMPERATURA INVERTIDO. ATMÓSFERA ESTABLE. POBRE DISPERSIÓN VERTICAL. TRANSPORTE DE LOS CONTAMINANTES A GRAN DISTANCIA ANTES DE MEZCLARSE.**

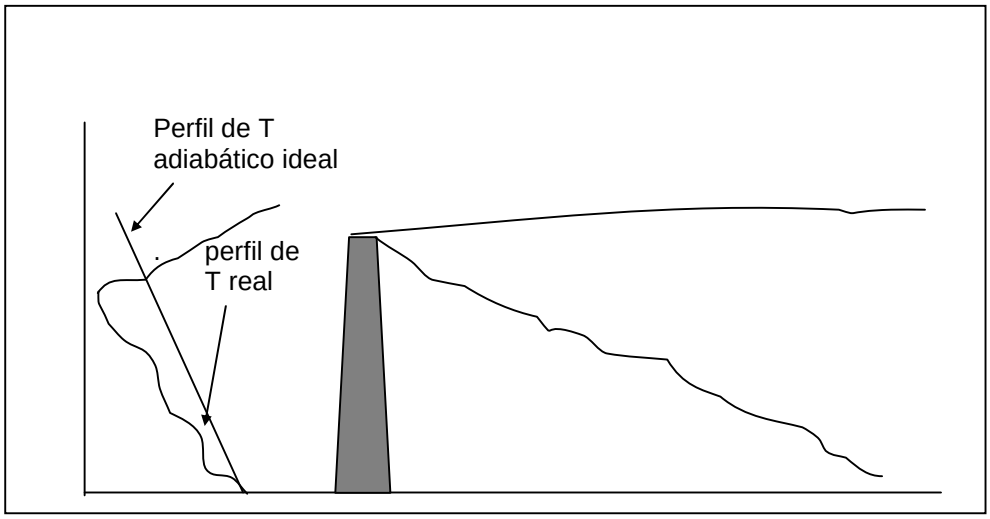



**FIGURA 3.5: DISPERSIÓN EN FORMA DE FUMIGACIÓN. INVERSIÓN TÉRMICA QUE IMPIDE ASCENSO DE LA PLUMA. LA PLUMA CAE RÁPIDAMENTE AL SUELO.**

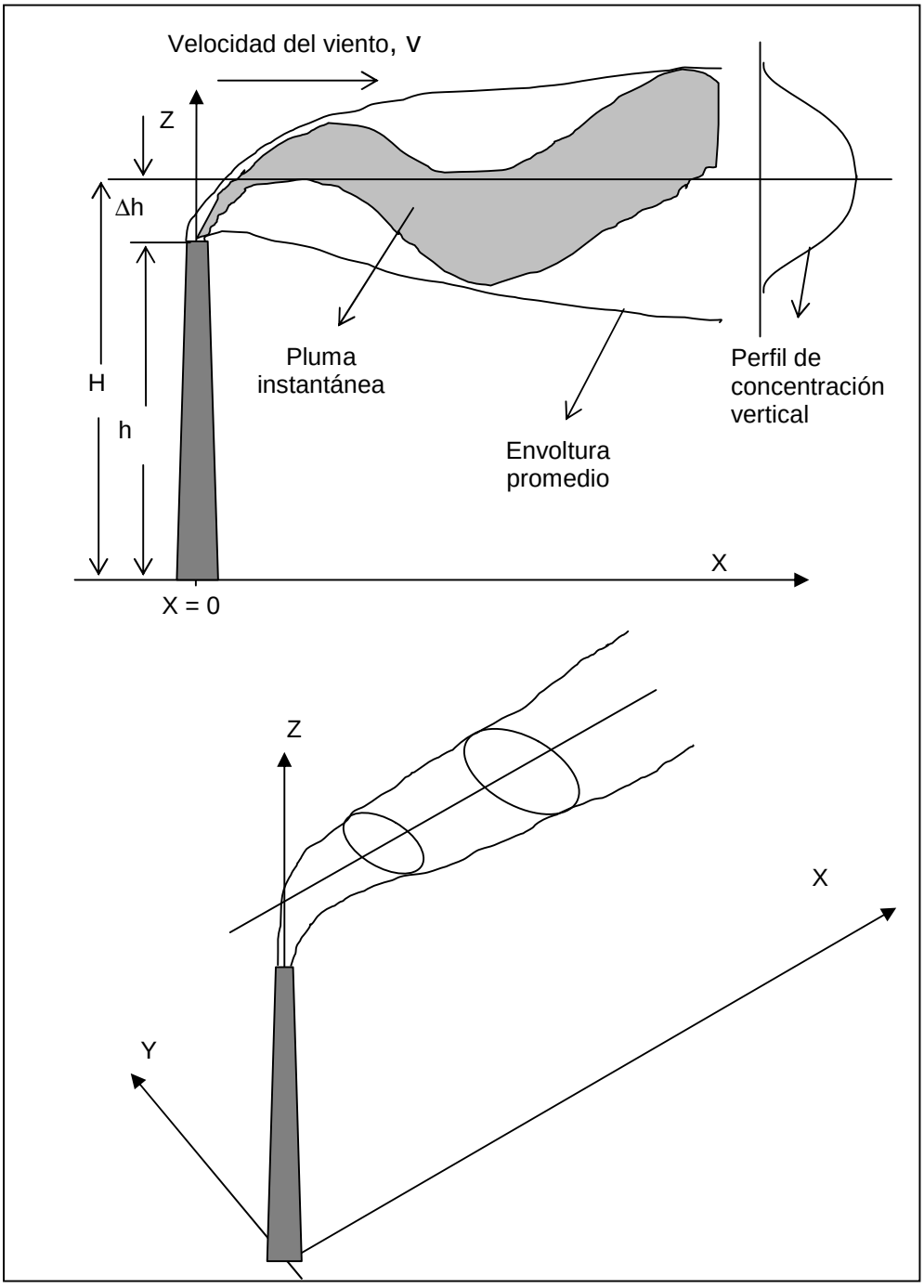



**FIGURA 3.6: PRESENTA LA CHIMENEA SITUADA EN EL ORIGEN, CON EL VIENTO EN LA DIRECCIÓN X.**

**TABLA 3.6: COEFICIENTES DE DISPERSIÓN (σ) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE LA FUENTE Y DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA**

| Distancia X (km) | Clase de Estabilidad | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\sigma_Y$ | | | | | | $\sigma_Z$ | | | | | |
| | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| 0,2 | 51 | 37 | 25 | 16 | 12 | 8 | 29 | 20 | 14 | 9 | 6 | 4 |
| 0,4 | 94 | 69 | 46 | 30 | 22 | 15 | 84 | 40 | 26 | 15 | 11 | 7 |
| 0,6 | 135 | 99 | 66 | 43 | 32 | 22 | 173 | 63 | 38 | 21 | 15 | 9 |
| 0,8 | 174 | 128 | 85 | 56 | 41 | 28 | 295 | 86 | 50 | 27 | 18 | 12 |
| 1 | 213 | 156 | 104 | 68 | 50 | 34 | 450 | 110 | 61 | 31 | 22 | 14 |
| 2 | 396 | 290 | 193 | 126 | 94 | 63 | 1953 | 234 | 115 | 51 | 34 | 22 |
| 4 | 736 | 539 | 359 | 235 | 174 | 117 | - | 498 | 216 | 78 | 51 | 32 |
| 8 | 1367 | 1001 | 667 | 436 | 324 | 218 | - | 1063 | 406 | 117 | 70 | 42 |
| 16 | 2540 | 1860 | 1240 | 811 | 602 | 405 | - | 2274 | 763 | 173 | 95 | 55 |
| 20 | 3101 | 2271 | 1514 | 990 | 735 | 495 | - | 2904 | 934 | 196 | 104 | 59 |

Para clases de estabilidad ***neutra o inestable*** (A-D), se utiliza la siguiente ecuación para estimar el salto de la pluma:

$$\Delta h = \frac{1{,}6\, F^{1/3}\, x_f^{2/3}}{v_h}$$

donde:

$\Delta h$ = es el salto de la pluma, ( es decir, H – h) (en metros)
$x_f$ = es la distancia en la dirección del viento hasta el punto en que la pluma alcanza su altura máxima (m)
$v_h$ = velocidad del aire a la altura de la chimenea (m/s)

La distancia $x_f$ se obtiene de:

$x_f = 120\, F^{0,4}$ para $F > 55$ ($m^4/s^3$)
$x_f = 50\, F^{5/8}$ para $F < 55$ ($m^4/s^3$)

Para atmósferas ***estables*** (categorías E y F), el salto de la pluma se obtiene de:

$$\Delta h = 2{,}4\left(\frac{F}{v\,S}\right)^{1/3}$$

donde $S$ es un parámetro relacionado con la estabilidad, definido como (en unidades $s^{-2}$):

$$S = \frac{g}{T_A}\left(0{,}01 + \frac{dT_A}{dz}\right)$$

donde la derivada $dT_A/dz$ representa el gradiente de temperatura del aire, expresado en (ºC/m).

- **Dispersión Bajo Condiciones de Inversión Térmica**

El desarrollo del modelo Gaussiano mostrado anteriormente no considera la existencia de una inversión térmica sobre la chimenea. El modelo Gaussiano se puede modificar para tomar en cuenta el efecto de reflejo que tiene la capa de inversión térmica. Una modificación utilizada a menudo para condiciones de inversión térmica, es la siguiente:

$$C_{X,Y} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\, v\, \sigma_Y L}\left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_Y^2}\right)\right)$$

donde $L$ es la altura de la capa de inversión térmica (m). Esta expresión es válida para distancias mayores que el doble de la distancia en la dirección del viento,

donde la envoltura superior de la pluma se encuentra con la capa de inversión. Esta distancia coincide con la distancia a la cual el coeficiente de dispersión $\sigma_Z$ es igual a $\sigma_Z = 0{,}47\ (L - H)$ .

- **Modelos para Dispersión de Fuentes Lineales**

En algunos casos, interesa modelar el efecto de fuentes de contaminantes atmosféricos de tipo lineales, por ejemplo, en el caso de gases emitidos por los vehículos que transitan en las carreteras.

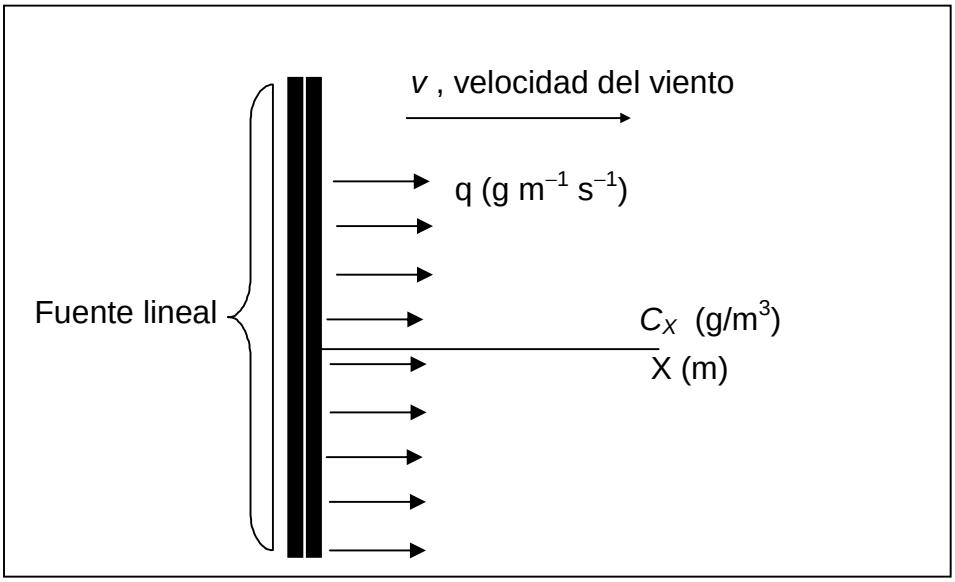



**FIGURA 3.7: MODELACIÓN DEL EFECTO DE FUENTES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE TIPO LINEAL.**

La concentración a nivel del suelo, $C_X$ , a una distancia X en la dirección del viento, cuando éste es perpendicular a la fuente lineal (Figura 3.7), se puede estimar a partir de:

$$C_X = \frac{2q}{\sqrt{2\pi}\ v\sigma_Z}$$

donde $q$ es la tasa de emisión por unidad lineal de fuente (g $s^{-1}$ $m^{-1}$) y $v$ es la velocidad del viento, perpendicular a la fuente lineal.

## 3.2) CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua juega un papel fundamental en el funcionamiento de la Biósfera. Tal como se señaló en el Capítulo 2, el agua presenta propiedades que le permiten ser un excelente medio de transporte de energía y materia. La energía solar permite mantener un ciclo hidrológico que tiene un efecto determinante sobre todos los demás ciclos biogeoquímicos.

A su vez, el agua es un fluido vital, sin el cual la existencia de la vida, como se manifiesta en la Tierra, no es posible. Sin embargo, sobre el 97% del agua existente en nuestro planeta se encuentra en los océanos. La Historia del Hombre nos demuestra que el agua, ha sido uno de los principales recursos limitantes de su desarrollo económico y social. Cada vez que la disponibilidad de agua se redujo más allá de un nivel crítico, sea por razones climáticas o por acción del hombre, languideció también el grupo humano que se nucleó en torno a dicho cuerpo de agua.

Desde el punto de vista de la sociedad humana, el agua se utiliza en diferentes roles, principalmente:

- Agua para consumo humano directo (vital).
- Agua para usos domésticos (lavado, sanitario, cocina).
- Agua para usos industriales (medio térmico, transporte de materiales, medio de reacción, solvente, lavado).
- Agua para fines de regadío agrícola, en actividad pecuaria, forestal, etc.
- Agua como medio para la producción de especies marinas (peces, algas, moluscos, etc.).
- Agua como recurso para la generación de energía eléctrica.
- Agua como medio recreacional.
- Agua como medio receptor de los residuos de la actividad humana.

Aproximadamente un 42% del agua utilizada en EEUU se destina a producción agrícola, comparada con un 39% para generación hidroeléctrica; por su parte, la minería e industria sólo utilizan un 8% del total, mientras que el resto (11%) se consume en actividades domésticas y comerciales.

Todos estos usos del agua implican requerimientos de calidad y cantidad que deben ser mantenidos para garantizar su consumo sin daños a la salud de las personas y un desarrollo económico sustentable. Más aún, algunos de estos requerimientos implican intervención física directa sobre los cuerpos de agua, pudiendo modificar drásticamente su morfología y su caudal, con serias consecuencias para el equilibrio ecológico en el medio acuático.

La relativa escasez de este fluido vital, y su importancia determinante para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, motivan que el agua sea uno de los principales objetivos de protección ambiental de la sociedad moderna. A modo de ejemplo, cabe destacar que en el mundo existen más de 1.200 millones de seres

humanos que no tienen acceso directo a agua potable, y más del 20% de los peces de agua dulce están en peligro de extinción. En la actualidad, en todos los países las regulaciones de control ambiental establecen límites a las descargas de residuos líquidos que son vertidos en los cuerpos de agua; además, fijan estándares de calidad de agua de acuerdo a su potencial de uso.

### 3.2.1) Contaminantes Líquidos

El efecto de los residuos líquidos sobre los ecosistemas acuáticos depende, entre otros factores, de su composición química, de las características físicas y biológicas del efluente, además de las características del medio receptor acuático.

Los contaminantes en fase líquida incluyen un amplísimo rango de compuestos disueltos y suspendidos, orgánicos e inorgánicos. A continuación se resumen los efectos de los principales residuos que se vierten comúnmente en las aguas superficiales.

- **Material orgánico biodegradable disuelto**

Los compuestos orgánicos solubles biodegradables permiten mantener la actividad de microorganismos unicelulares heterótrofos (bacterias, hongos), que requieren de fuentes de carbono orgánico y que se alimentan por transporte a través de la membrana celular. Estos organismos acuáticos reciben, además, los compuestos derivados de la actividad biológica terrestre en las zonas aledañas a los cuerpos de agua, que son transportados por la escorrentía superficial o subterránea. Aquí se incluyen los compuestos generados a partir de la descomposición de especies muertas y del material que se descarga desde las riberas (frutos, ramas, excrementos, etc).

Cuando un nutriente entra al agua, los organismos aerobios consumen oxígeno disuelto como resultado de la actividad metabólica inducida. Así, el nutriente ejerce una demanda sobre la disponibilidad del oxígeno disuelto, denominada *Demanda Biológica de Oxígeno*. Si la cantidad de materia orgánica en el medio es muy alta, ello puede conducir a una disminución en la concentración de oxígeno disuelto. A niveles bajos de oxígeno disuelto (viz. 2-4 mg/l) los peces tienden a desaparecer y el ambiente acuático favorece a las especies anaeróbicas.

**Problemas generados en las aguas anóxicas:**

El metabolismo anaeróbico es mucho más lento que el proceso aeróbico. (típicamente, por más de un orden de magnitud) y de menor eficiencia, generando varios compuestos orgánicos intermedios (ej.: ácidos orgánicos, alcoholes, metano). Como resultado de la menor velocidad de consumo del material orgánico disuelto, éste se acumulará en el medio acuático, a menos que su ingreso al sistema acuático disminuya drásticamente.

Si los nutrientes disueltos entran al agua a una tasa tal, que el oxígeno disuelto se consume más rápidamente de lo que se puede reponer, el agua se desoxigena. Ningún aerobio obligado, desde los microbios hasta los peces, podrá sobrevivir en

dichas aguas. Así, los contaminantes orgánicos se acumularán, produciéndose anaerobiosis, lo que genera substancias malolientes (ej.: sulfuros y aminas volátiles) y compuestos orgánicos parcialmente oxidados.

Aparte del mal olor, la anaerobiosis puede presentar problemas para la salud humana, ya que muchas bacterias anaerobias son patógenas (por ejemplo, tétano, botulismo). Cuando el agua contiene sulfatos disueltos, las bacterias anaerobias reductoras producen $H_2S$ (corrosivo y venenoso). La conversión de mercurio inorgánico a organomercurio tiene lugar bajo condiciones anaerobias. La anaerobiosis genera compuestos orgánicos (ácidos orgánicos) que pueden ser inhibidores o tóxicos para los organismos heterotróficos. Generalmente, las aguas anóxicas pueden ser recuperadas si la entrada de contaminantes se detiene, permitiendo consumir anaeróbicamente los nutrientes remanentes y que el oxígeno transferido naturalmente restablezca los procesos aeróbicos.

- **Compuestos tóxicos:**

La población microbiana puede verse afectada debido a la presencia de contaminantes químicos tóxicos, por inhibición o muerte por envenenamiento. Diferentes organismos presentan distinta susceptibilidad a la presencia de tóxicos. Por ejemplo, el fenol es tóxico para casi todas las especies (razón por la cual se usa como desinfectante); sin embargo, ciertas bacterias (Pseudomonas) pueden usarlo como nutriente y descomponerlo, aún cuando su actividad es inhibida a altas concentraciones de fenol. Muchos componentes tóxicos pueden ser degradados por actividad química o bioquímica natural y, por lo tanto, su acción puede ser de relativa corta duración en el ecosistema.

Existen otros tóxicos, tales como los metales pesados o ciertos compuestos orgánicos, cuya toxicidad persiste, debido a que no son afectados por desactivación natural. Estos últimos, son los más difíciles de controlar, ya que por ser no degradables, se acumulan en el medio receptor y, a pesar de ser desechados a muy baja concentración, persisten y afectan la vida del sistema. En muchos casos se produce un aumento de la concentración de dichos contaminantes, cuando entran a formar parte de la cadena alimenticia de las diferentes especies del ecosistema. Por ejemplo, la concentración de DDT en los tejidos de los organismos superiores puede llegar a ser 50.000 veces más alta que la concentración en el medio receptor. En el caso de las dioxinas, dicho factor puede llegar a ser del orden de 5.000.

Por otra parte, los procesos naturales que ocurren en el medio receptor incrementan la toxicidad de algunos contaminantes primarios. Por ejemplo, el mercurio inorgánico es tóxico, pero los compuestos de organomercurio generados a partir de mercurio inorgánico en las aguas son 10 veces más venenosos.

Muchos de los compuestos tóxicos, no biodegradables, que se encuentran a muy bajas concentraciones, pueden ser ingeridos por los organismos vivientes de los diferentes niveles tróficos, depositándose en sus tejidos y entrando en la cadena alimenticia. Esto resulta en un aumento de la concentración del material contaminante a medida que es transferido a las especies superiores, lo que puede

tener consecuencias para la salud humana.

**Nitrógeno y Fósforo**

Las algas y plantas acuáticas utilizan la energía de la luz para sintetizar material orgánico complejo, a partir de $CO_2$, agua y otros materiales como nitrógeno (N) y fósforo (P). A su vez, el oxígeno generado por fotosíntesis es utilizado por los organismos heterótrofos y por algunos autótrofos oxidantes. Cuando este balance ecológico se altera debido a un aumento drástico de los nutrientes limitante, los resultados pueden ser desagradables o desastrosos. El aumento de la cantidad de nutrientes necesarios para a vida en un cuerpo de agua se denomina eutrofización[5]. La eutrofización puede genera serios problemas en los cuerpos de agua superficiales:

- La fotosíntesis implica la creación de materia orgánica a partir de materiales inorgánicos y, por lo tanto, la producción en grandes cantidades de substancias orgánicas donde antes sólo existían una pocas. Cuando las algas/plantas mueren, sus componentes se transforman en nutrientes orgánicos que ejercen una demanda de oxígeno

- Durante la acción fotosintética, el $CO_2$ es rápidamente consumido, generando un aumento del pH, que puede llegar sobre 10. Durante la noche, la reacción inversa ocurre, consumiendo oxígeno y generando $CO_2$, con lo cual el pH tiende a bajar. La actividad fotosintética tiene un significativo efecto sobre el nivel de pH del cuerpo de agua, ya que afecta la reacción reversible

$$HCO_3^- + H^+ \longleftrightarrow CO_2 + H_2O$$

- En ausencia de luz, muchos tipos de algas usan el oxígeno para obtener energía en la descomposición oxidativa de compuestos orgánicos previamente sintetizados. En efecto, almacenan la energía luminosa en la forma de energía química, para usarla en ausencia de luz (como una batería de automóvil). Así, mientras más fuerte sea el crecimiento de algas durante el día (lo que puede producir sobresaturación de oxígeno), mayor será la desoxigenación durante la noche. Cuando se produce una cubierta de algas flotantes muy gruesa, la transmisión de la luz se ve afectada, de manera que aún en el día, las algas en los niveles inferiores utilizan el oxígeno.

Finalmente, las masas de algas depositadas en las riberas, mueren y se pudren, produciendo condiciones anaeróbicas, presentando un peligro para la salud (ej.:

[5] La eutrofización se define como el proceso de enriquecimiento de nutrientes en un cuerpo de agua. Es un fenómeno natural en el proceso de envejecimiento de lagunas y lagos (lagos eutróficos). Por el contrario, un cuerpo de agua joven, pobre en nutrientes necesarios para la vida, se denomina oligrotrófico. El incremento de los nutrientes en la laguna permite una mayor producción de plantas y animales acuáticos. Dicho incremento en la materia orgánica genera a su vez un aumento del contenido orgánico de los sedimentos. El proceso de eutrofización de una laguna muy gradual, pudiéndo detenerse, e incluso revertirse a una situación oligotrófica, debido a cambios climáticos y modificaciones en la vegetación aledaña.

formación de *Clostridium botulinum*, que es un anaerobio obligado patógeno). Por otra parte, las ramificaciones de las plantas acuáticas atrapan sólidos orgánicos que se descomponen, ejerciendo una demanda de oxígeno concentrada.

Generalmente el N y P son los factores limitantes. En el crecimiento microbiano, se consume P en forma de fosfato, mientras la mayoría de las bacterias asimilan N en la forma de $NH_3$ y sólo unas pocas lo hacen como $NO_3^-$. En cambio las algas, asimilan el N como $NO_3^-$ y muy pocas como $NH_3$. Hay más bacterias que pueden usar $NO_3^-$ como fuente de oxígeno que como fuente de N. De acuerdo a la estequiometría aproximada de la fotosíntesis en las algas, la proporción N : P es del orden de 7. Según la Ley del Mínimo de Liebig, un cuerpo de agua con una relación N : P mucho mayor que 7 indica que el P es el nutriente limitante; por otra parte, un valor de N : P mucho menor que 7 implica una limitación por N. Algunos autores sugieren que concentraciones de P y N superiores a 0,015 y 0,3 mg/l, respectivamente, son suficientes para generar un crecimiento excesivo de algas en aguas lacustres.

Las principales fuentes de N orgánico son las proteínas, los aminoácidos y la urea; por su parte, el N inorgánico está en la forma de $NH_3$, $NO_3^-$, $NO_2^-$. El amoníaco es un producto característico de la descomposición de la materia orgánica, y se puede oxidar microbiológicamente a nitritos y nitratos, mediante la acción de las bacterias nitrificantes. Estos procesos ocurren naturalmente en la aguas, y constituyen una importante contribución a la demanda biológica de oxígeno.

- **Otros agentes contaminantes**

La temperatura y el pH afectan directamente la vida de los organismos superiores, la que sólo es posible dentro de rangos limitados de temperatura y de pH.

- *Temperatura:* Los efluentes calientes pueden alterar negativamente el ecosistema, ya que la elevación de la temperatura reduce la solubilidad del oxígeno. Más aún, el metabolismo microbiano aumenta al elevarse la temperatura (hasta cierto límite).
- *pH:* Es importante evitar descargar aguas con pH muy diferente de 7. Desgraciadamente, la eutrofización de un cuerpo de agua genera variaciones extremas de pH que tienen un efecto negativo sobre muchas especies acuáticas.
- *Sólidos suspendidos:* Los sólidos en el agua interfieren directamente con la transferencia de oxígeno y con la transmisión de la luz. Además, cuando sedimentan afectan la vida en el fondo del cuerpo de agua. Si son orgánicos biodegradables, imponen una fuerte demanda de oxígeno que genera rápidamente un medio anóxico.

- **Caudal Mínimo Ecológico**

La calidad del agua no solamente es afectada por los vertidos de residuos, sino que también por su consumo para diferentes actividades humanas. El consumo de agua fluvial en actividades industriales, agrícolas o domésticas, así como la

instalación de embalses y otras intervenciones directas sobre el medio físico, pueden afectar las características hidrológicas del río. Si tales intervenciones resultan en una reducción significativa de su caudal, se pueden generar consecuencias adversas sobre el ecosistema acuático. Las variaciones de caudal producen cambios en la población de las diferentes comunidades. Algunas especies pueden ser sustituidas por otras que cumplen la misma función en el ecosistema, pero que presentan distintos requerimientos ambientales y poseen diferentes ciclos de vida.

La disminución del caudal puede afectar seriamente el proceso de oxigenación del río, generando una reducción de su capacidad de autodepuración. Esta situación puede originarse debido a una reducción importante del área de contacto río-aire y/o del coeficiente de transferencia de masa (denominado coeficiente de reaireación).

El ecosistema que representa un tramo de río está condicionado, principalmente, por:

- La morfología del cauce
- El flujo del cauce
- Las características físico-químicas del agua circulante
- El tipo de hábitat existente en el lecho y en las riberas fluviales
- Los recursos tróficos existentes en el medio acuático
- Las características climáticas
- Los vertidos derivados de la actividad humana en la cuenca

Para determinar el caudal mínimo aceptable, desde el punto de vista ecológico, se puede utilizar modelos matemáticos que permiten predecir el efecto de cambios de caudal sobre la calidad del hábitat acuático y sobre la capacidad de autodepuración. Por ejemplo, en algunos estudios, se recomienda utilizar los simuladores PHABSIM (*physical habitat simulation system*) y QUAL2E (modelo de calidad de agua). Es importante señalar que se deben considerar los potenciales usos del río en estudio, como por ejemplo, en actividades recreativas y de piscicultura.

### 3.2.2) Capacidad de Autodepuración del Medio Acuático

Tal como se mencionó en secciones anteriores, los contaminantes sufren diferentes transformaciones físicas, químicas y biológicas que tienen lugar en el medio acuático. Como resultado de estos procesos, la concentración del contaminante primario en la columna de agua tiende a disminuir. La actividad biológica constituye uno de los mecanismos de mayor importancia en la autodepuración de los cuerpos receptores hídricos; sus principales características se presentan a continuación.

#### a) Cadena trófica acuática

La vida se originó y evolucionó inicialmente en medio acuoso. Debido a su gran

capacidad solvente, el agua presente en la naturaleza contiene compuestos orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos, de origen biológico y de origen geológico. La cadena trófica en los ecosistemas acuáticos es compleja e interactúa con los componentes físicos y químicos del medio, de manera análoga a los ecosistemas terrestres.

Los organismos autótrofos presentes en el agua absorben energía solar y la utilizan para sintetizar compuestos orgánicos a partir de moléculas inorgánicas ($CO_2$, $NH_4^+$, $NO_2^-$). En los ecosistemas acuáticos, la mayor parte de la fotosíntesis la realiza el fitoplancton, que sirve de alimento a los consumidores heterótrofos (principalmente el zooplancton). A su vez, los organismos heterótrofos consumen $O_2$ y aportan $CO_2$ al medio, como resultado de su actividad metabólica, el cual es utilizado por los organismos fotosintéticos acuáticos.

A su vez, las bacterias, hongos y algas sirven de alimento para otros organismos, tales como protozoos, invertebrados, y peces. Así, las diferentes especies acuáticas crecen y mueren, se alimentan las unas de las otras, de acuerdo a su posición en la cadena trófica, en un equilibrio dinámico alterado sólo por los azares de la naturaleza y por la actividad del hombre. La presencia de una variada fauna acuática es muestra de un "buen estado de salud" del medio acuático.

**b) Oxígeno Disuelto (OD)**

Se denomina oxígeno disuelto al oxígeno contenido en el medio acuoso. El oxígeno del aire se transfiere a través de la superficie y se disuelve en el agua (los principios físicos que caracterizan este proceso se revisan en el Capítulo 6).

La concentración de oxígeno disuelto (OD) es uno de los indicadores del estado de salud del medio acuático. Un alto OD, cercano a saturación, indica un río con bajo contenido de materia orgánica biodegradable. Por otra parte, una concentración de OD muy inferior a su nivel de saturación indica la presencia de una carga orgánica superior a la capacidad de aireación del sistema. La concentración de OD varía con la profundidad, siendo mayor en la superficie; en el lecho de casi todos los cuerpos de agua lacustres existe una capa anóxica en los sedimentos.

En las aguas naturales, las dos fuentes fundamentales de oxígeno son:

- el oxígeno atmosférico del aire.
- el oxígeno producido por las plantas y otros organismos fotosintéticos presentes en el agua.

Una corriente de agua con alta capacidad de aireación estará en condiciones de permitir una rápida descomposición de los materiales orgánicos, por parte de los microorganismos aerobios presentes. Cualquier condición que altere negativamente la oxigenación del agua contribuirá a su deterioro. Por ejemplo, los sólidos en suspensión y los contaminantes cromóforos reducen la transmisión de

luz hacia los organismos fotosintéticos de la columna de agua, con lo que se reduce la producción de oxígeno; por otra parte, los sólidos flotantes reducen el área disponible para la transferencia de oxígeno desde el aire e interfieren directamente sobre la luz que penetra a la columna de agua.

Cuando los nutrientes son utilizados aeróbicamente, una parte se consume en la generación de biomasa, aumentando así la población microbial. Si se reduce la cantidad de nutrientes disponibles para el crecimiento celular, algunos microbios morirán y se desintegrarán. Normalmente, cuando los organismos acuáticos mueren sus restos sedimentan y sufren descomposición anaeróbica. En los cuerpos de agua de cierta profundidad, existe una zona anóxica en el fondo, donde los organismos anaeróbicos metabolizan los compuestos orgánicos generados por la lisis de las células muertas.

**c) Autodepuración en la aguas**

La actividad viviente le otorga a un cuerpo de agua una cierta capacidad de autodepuración, ya que los compuestos orgánicos que se vierten en éste, son consumidos por los microorganismos heterótrofos. Como resultado de la actividad metabólica de los microorganismos, los compuestos orgánicos disueltos son transformados en biomasa celular, en $CO_2$ y en otros compuestos inorgánicos simples.

La capacidad de autodepuración es altamente dependiente de la disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua. El oxígeno es el reactivo esencial en los sistemas aeróbicos. Cuando los organismos aerobios metabolizan, los nutrientes orgánicos consumen al mismo tiempo el oxígeno disuelto. Los altos requerimientos metabólicos de oxígeno se contraponen con su baja solubilidad en el agua (la concentración de saturación del oxígeno disuelto en agua, en contacto con el aire a presión atmosférica y temperatura ambiente, está en el rango 7-10 $g/m^3$ ). Si la velocidad de transferencia de oxígeno desde el aire hacia el seno del agua es menor que la velocidad de consumo metabólico de oxígeno, su concentración en el agua disminuirá gradualmente, hasta constituirse en un reactivo limitante en las reacciones de oxidación intracelular. La reducción en la disponibilidad de oxígeno afectará, primeramente, a los organismos superiores de la cadena trófica. Ello provocará un desbalance en el equilibrio poblacional, generando un acelerado incremento de la cantidad de microorganismos en el cuerpo de agua. Como consecuencia de esto, el consumo de oxígeno aumenta, hasta llegar a generar un medio acuático anóxico. Bajo tales condiciones, la actividad metabólica aeróbica se detiene, dando paso a vías metabólicas anaeróbicas.

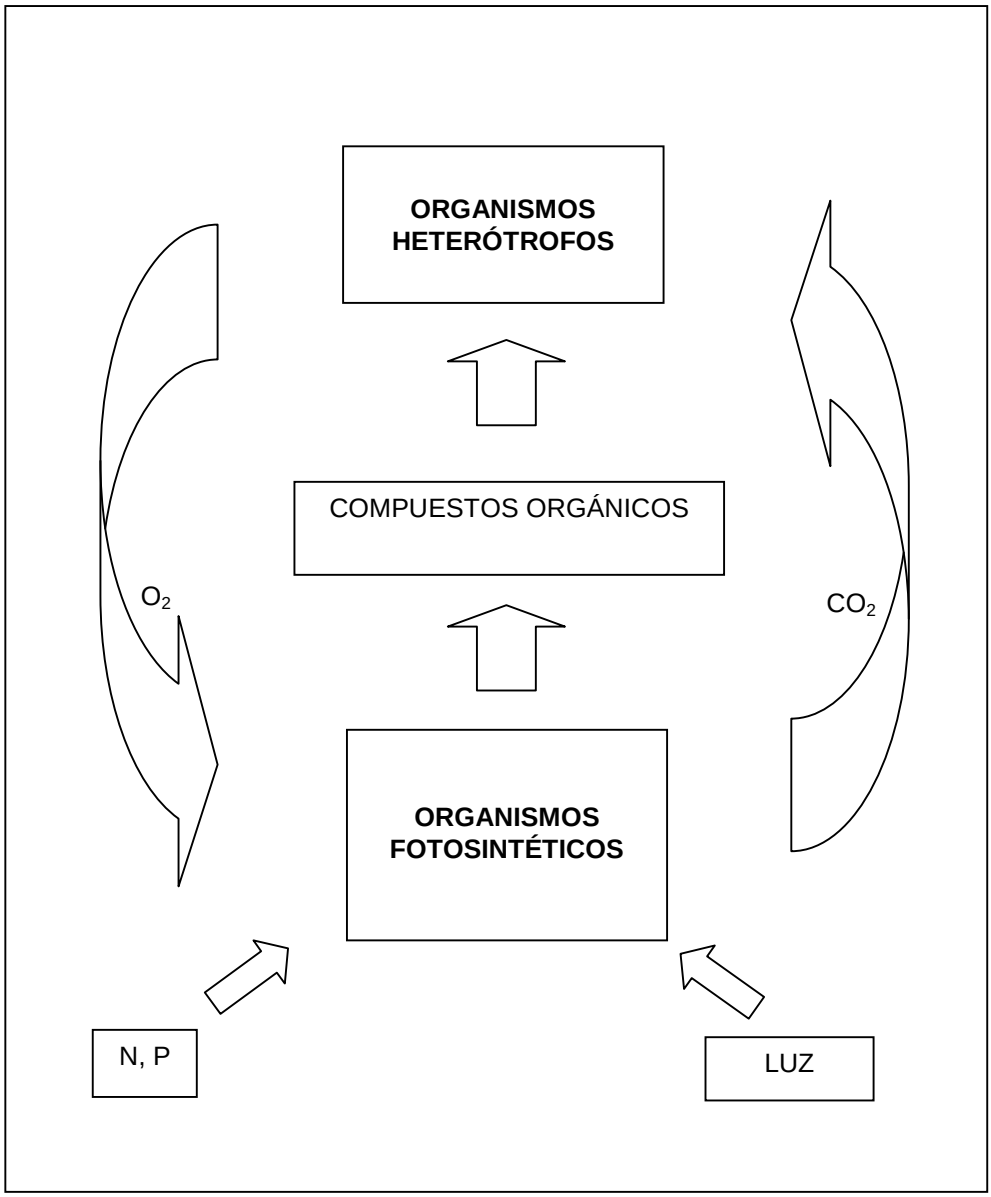



**FIGURA 3.8: CADENA TRÓFICA SIMPLIFICADA**

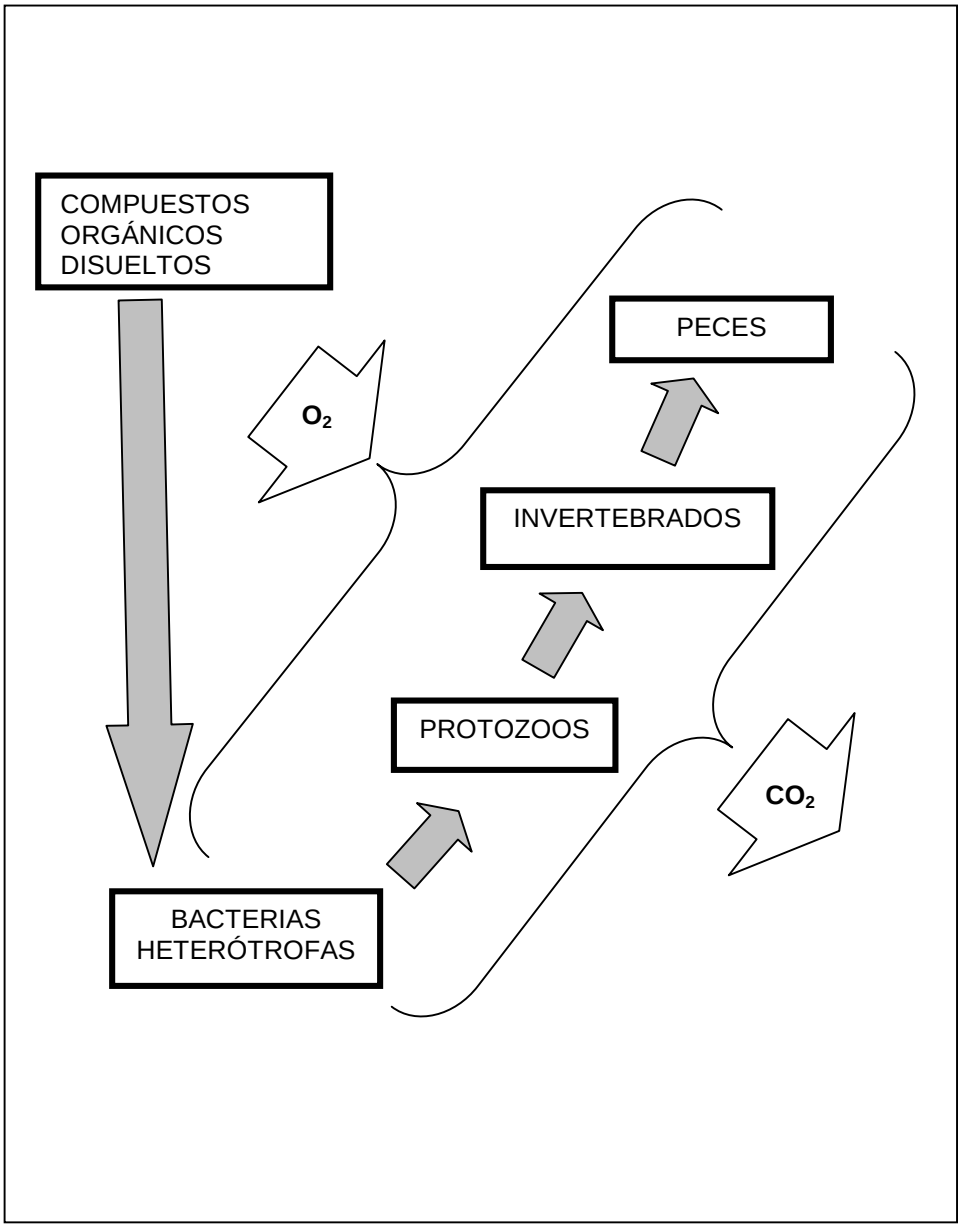



**FIGURA 3.9: CADENA TRÓFICA AERÓBICA**

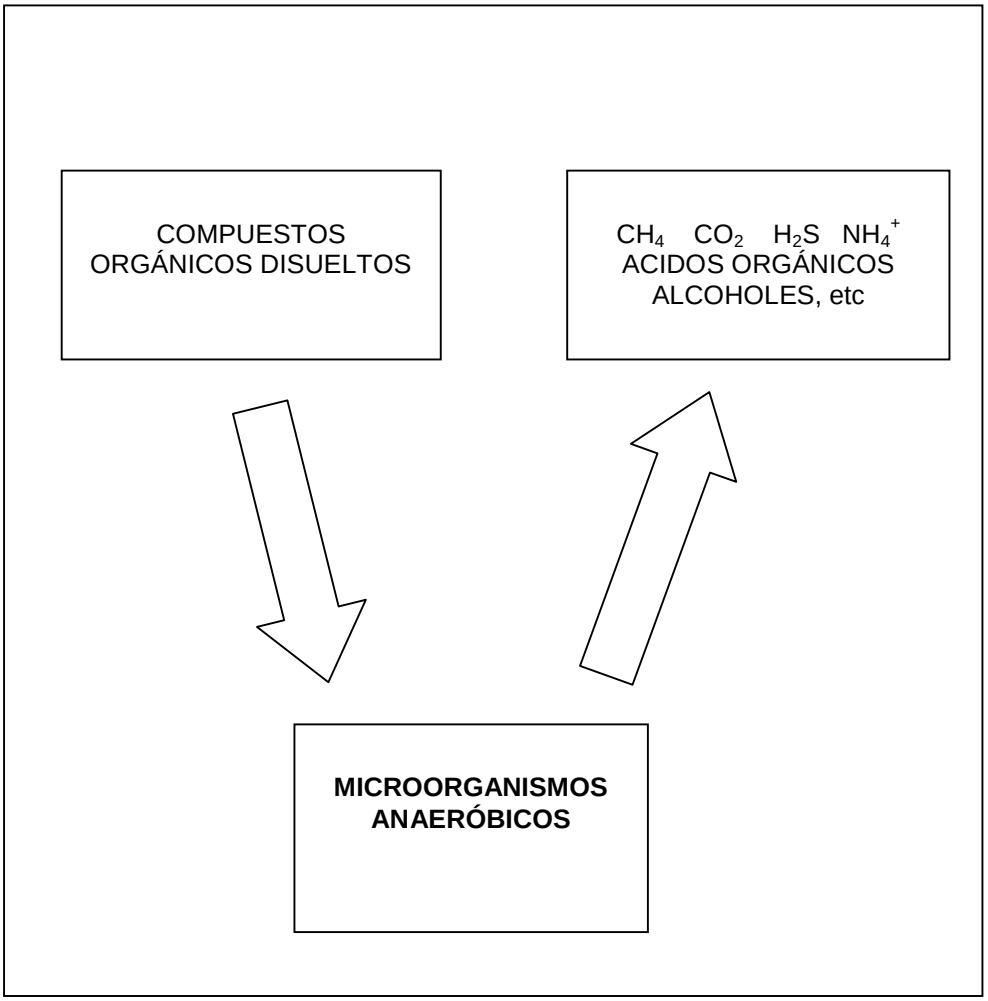



**FIGURA 3.10: ACTIVIDAD ANAERÓBICA**

### 3.2.3) Modelos de Calidad de Agua

Es importante contar con herramientas de modelación que permitan predecir el efecto de las descargas de contaminantes sobre la calidad de las aguas receptoras.

Los contaminantes que se vierten en un cuerpo de agua se diluyen en el medio, a través de mecanismos convectivos y advectivos, reduciendo así su concentración. Mientras mayor sea el volumen dentro del cual se vierte el contaminante, menor será su concentración en éste una vez que se diluya. La capacidad de dilución de un río, lago, o mar, depende entre otros factores de las características de las corrientes acuáticas, de la velocidad y turbulencia de los cursos, de la morfología del cauce, etc.

Además de su simple dilución en el medio, los contaminantes vertidos pueden sufrir transformaciones físicas, químicas y biológicas complejas que tienen lugar en el agua:

- Algunos de estos compuestos pueden ser transferidos a los sedimentos o al aire por cambio de fase (por ejemplo, volatilización, precipitación, adsorción).

- Pueden sufrir cambios químicos, por ejemplo, por degradación biológica, o por fotooxidación o hidrólisis química.

- Algunos compuestos entran en la cadena alimenticia, pero no sufren degradación ni excreción y se pueden bioacumular en los diversos componentes biológicos. Tal es el caso de algunos metales y compuestos orgánicos recalcitrantes (ej.: DDT).

Existen modelos matemáticos para describir tales fenómenos con diferentes niveles de complejidad. Muchos de estos se encuentran disponibles en forma gratuita en los ficheros electrónicos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) norteamericana (ej.: QUAL2E).

En términos generales, la gran mayoría de los modelos utiliza balances de masa (dinámicos o en estado permanente) para establecer las relaciones matemáticas entre las diferentes variables. Normalmente, se requiere información acerca de las características físicas y químicas del cuerpo de agua y sus condiciones hidrodinámicas. En el caso de compuestos que se distribuyen en el aire, agua y sedimentos, se necesitan datos acerca de sus relaciones de equilibrio, solubilidades, presiones de vapor u otros.

En general, el balance de masa para una especie i considera los siguientes flujos:

| ***Entrada de i – Salida de i – Consumo de i + Generación de i = Acumulación de i*** |
|---|

La expresión para el consumo de i depende del fenómeno responsable de la desaparición del compuesto (degradación química o biológica, cambio de fase). Comúnmente, la velocidad de consumo de un compuesto, $r_C$ , se aproxima a una cinética de primer orden:

$$r_C = -k\,[C]$$

donde *[C]* es la concentración de la especie en el medio y *k* es la constante cinética de primer orden. En el caso de aquellos contaminantes que se generan producto de la actividad en el medio acuático (por ejemplo, formación de bacterias), se utilizan expresiones de primer orden similares para describir su tasa de crecimiento (sin el signo negativo).

La Tabla 3.7 ilustra algunos valores de constantes cinéticas de primer orden para varios compuestos orgánicos de interés, debido a su alta toxicidad (a modo de referencia, se presentan los correspondientes valores para su descomposición en aire).

**TABLA 3.7: CONSTANTES CINÉTICAS PARA DEGRADACIÓN (1$^{er}$ ORDEN) DE COMPUESTOS ORGÁNICOS EN AGUA Y EN AIRE [6]**

| **COMPUESTOS ORGÁNICOS** | ***k* Agua ($día^{-1}$)** | ***k* Aire ($día^{-1}$)** |
|---|---|---|
| Benceno | 0,1-0,7 | 0,7 |
| Benzopireno | 2,5 | 0,1-0,7 |
| Tetracloruro de carbono | 0,002-2,3 | $9\ 10^{-5}$ |
| Clordano | 0,001 | 0,02 |
| Cloroformo | 0,02-2,3 | 0,01 |
| DDT | 0,001-0,01 | - |
| Dicloroetano | 0,1-0,7 | 0,02 |
| Formaldehído | 0,2-0,8 | 0,9 |
| Heptacloro | 0,7 | 0,02 |
| Hexacloroetano | 0,07-0,6 | $9\ 10^{-5}$ |
| Bifenilos policlorados (PCB) | 0,05-0,3 | 0,01 |
| Dioxina (2,3,7,8 TCDD) | $9\ 10^{-4} – 2\ 10^{-3}$ | - |
| Tricloroetano | 0,1-4,9 | $4\ 10^{-4} – 9\ 10^{-4}$ |
| Tricloroetileno | 0,008-0,7 | 0,2 |
| Cloruro de vinilo | 0,1-0,7 | 0,6 |

Los amplios rangos de variación en algunos casos reflejan diferentes condiciones ambientales de temperatura, luminosidad y biota existentes en el medio acuático.

[6] Adaptado de Masters G.M., "Introduction to environmental engineering and science", 2ª ed., Prentice-Hall International Editions, London, 1998

Para el caso de un río de morfología sencilla, es común utilizar un modelo simple donde se supone un flujo pistón. En el caso de una descarga puntual y continua, la solución en estado estacionario permite obtener el perfil axial de concentración, aguas abajo de la descarga:

$$[C] = [C]_0 \, e^{-kx/v}$$

Donde:

$[C]$ = concentración de contaminante disuelto en el río, x (m) aguas abajo de la descarga (mg/l)
$[C]_0$ = concentración de contaminante disuelto en el río, en el punto de descarga, considerando que el vertido se mezcla instantáneamente con el río (mg/l)
$k$ = constante cinética de 1$^{er}$ orden para el consumo de contaminante (día$^{-1}$)
$x$ = distancia desde el punto de descarga, en dirección aguas abajo (m)
$v$ = velocidad media del río (m/s)

En el caso de las descargas de material orgánico biodegradable, interesa predecir su efecto sobre la concentración de oxígeno disuelto. Uno de los primeros modelos para predecir tal efecto en los cuerpos fluviales fue presentado por Streeter y Phelps en 1925. Dicho modelo considera el río como un reactor de flujo pistón, y establece un balance para el oxígeno disuelto y el material biodegradable, bajo condiciones de estado estacionario. En el caso del balance de oxígeno, se incluye la entrada de oxígeno por transferencia desde el aire, también expresada por un modelo de primer orden. En versiones posteriores, se toma en cuenta, además, el aporte de oxígeno por vía fotosintética. La solución analítica del modelo de Streeter y Phelps para una descarga puntual y continua, permite estimar la concentración de oxígeno disuelto a lo largo de un río:

$$[O_2] = [O_2]_{SAT} - \frac{k_D [C]_0}{k_A - k_D}\left(e^{-(k_D x/v)} - e^{-(k_A x/v)}\right) - \left([O_2]_{SAT} - [O_2]_0\right)e^{-(k_A x/v)}$$

donde:

$[O_2]$ = concentración de oxígeno disuelto en el río a x (m) aguas abajo de la descarga (mg/l),
$[O_2]_0$ = concentración de oxígeno disuelto en el río, inmediatamente aguas arriba de la descarga (mg/l)
$[O_2]_{SAT}$ = concentración de saturación de oxígeno disuelto en el río, a la temperatura media del agua (mg/l)
$[C]_0$ = concentración de material orgánico disuelto en el río, en el punto de descarga, considerando que el vertido se mezcla instantáneamente con el río. Está expresada como Demanda Biológica de Oxígeno, $DBO_5$ (mg/l) (este concepto se explica en detalle en la sección 6.2.2)
$k_A$ = constante cinética de primer orden para la transferencia de oxígeno desde el aire (aireación) (día$^{-1}$)
$k_D$ = constante cinética de primer orden para el consumo de oxígeno por

acción metabólica (día$^{-1}$)

Como resultado de los fenómenos de consumo biológico de oxígeno y reposición física de éste, se presenta un perfil axial típico de concentración de oxígeno disuelto aguas debajo de una descarga de material orgánico biodegradable (ver la Figura siguiente):

- Inicialmente, la alta demanda biológica de oxígeno impuesta por la descarga de material orgánico tiende a reducir la concentración de oxígeno disuelto en el río. Si dicho efecto es mayor que la velocidad de aireación del río, la concentración de oxígeno disuelto disminuirá sostenidamente.
- La ecuación de Streeter y Phelps demuestra que la concentración de material orgánico disuelto disminuye gradualmente a medida que nos alejamos del punto de descarga, lo que implica también una reducción de la velocidad de consumo de oxígeno.
- Cuando la velocidad de consumo de oxígeno alcanza el mismo nivel que la velocidad de aireación del río, la concentración de oxígeno disuelto llega a su valor mínimo, y comenzará a aumentar gradualmente a partir de dicho punto crítico.
- Aguas abajo del punto crítico, la velocidad de consumo de oxígeno es menor que la velocidad de aireación y, eventualmente, la concentración de oxígeno disuelto en el río alcanzará su valor de saturación.

El punto de máximo impacto, *x**, donde se constata la concentración de oxígeno disuelto mínima en el río, $[O_2]_{MIN}$ , debido a la descarga de material orgánico, se puede estimar en base a:

$$x^* = \frac{v}{k_A - k_D} \ln\left\{\frac{k_A}{k_D}\left[1 - \frac{\left([O_2]_{SAT} - [O_2]_0\right)(k_A - k_D)}{k_D [C]_0}\right]\right\}$$

La concentración mínima de oxígeno disuelto debido a la descarga se obtiene reemplazando el valor de *x** en la ecuación de Streeter-Phelps

A pesar de ser un modelo muy simplificado, permite obtener resultados que pueden ser utilizados como una primera aproximación en la predicción del impacto causado por una descarga de material orgánico.

La constante cinética de primer orden para la degradación biológica del material orgánico disuelto, $k_D$ ,está dentro del rango 0,1 - 0,7 (día$^{-1}$), dependiendo del tipo de material orgánico, de las características de la biota bacteriana y de la temperatura del agua.

Por su parte, la constante de aireación, $k_A$, depende de las características del sistema hídrico y de la temperatura. Esta constante es mayor en aquellos ríos que presentan una alta velocidad y gran turbulencia superficial. Algunos valores típicos obtenidos de literatura se presentan el la Tabla 3.8:

**TABLA 3.8: CONSTANTES DE AIREACIÓN (1er ORDEN) PARA DISTINTOS CUERPOS DE AGUA.**

| TIPO DE CUERPO DE AGUA | CONSTANTE DE AIREACION, DE 1er ORDEN, $k_A$ (día$^{-1}$) |
|---|---|
| Lagunas | 0,1-0,2 |
| Lagos de mayor tamaño | 0,2-0,3 |
| Ríos de baja velocidad | 0,3-0,5 |
| Ríos con velocidad normal | 0,5-0,7 |
| Ríos rápidos y con caídas de agua | 0,7-1,5 |

Existen varios modelos para predecir la constante de aireación, $k_A$. Se puede utilizar la fórmula de O'Connor y Dobbins :

$$k_A = \frac{3{,}9\, v^{1/2}}{p^{3/2}}$$

donde $p$ es la profundidad media del río en (m), $v$ es la velocidad media en (m/s) y $k_A$ se expresa en (día$^{-1}$) a 20ºC.

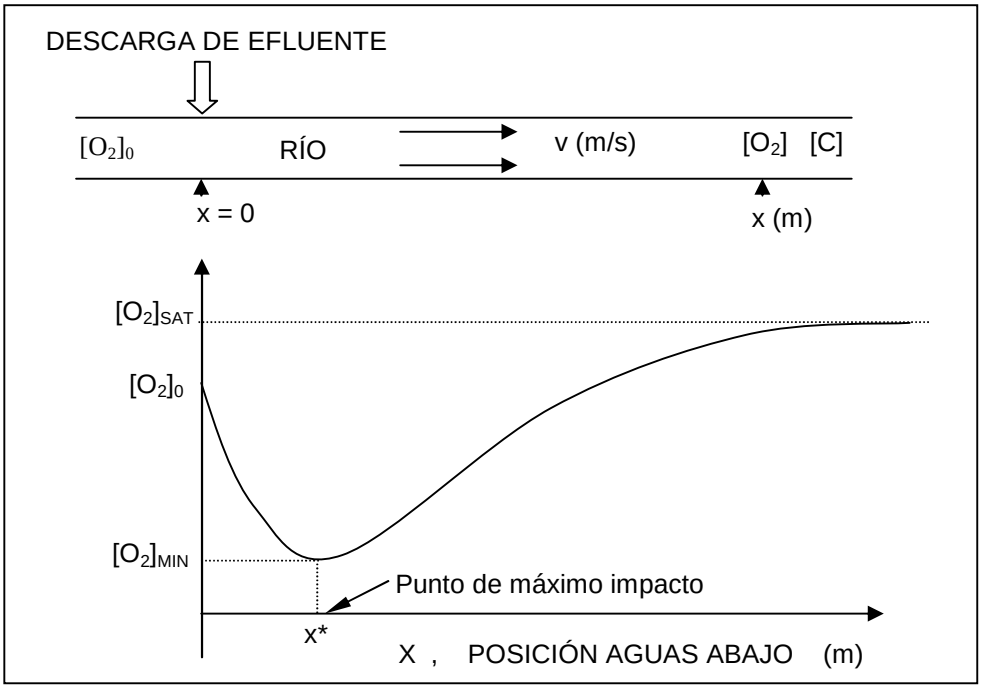



**FIGURA 3.11: EFECTO DE UNA DESCARGA DE MATERIAL ORGÁNICO BIODEGRADABLE, SOBRE EL OXÍGENO DISUELTO EN UN RÍO.**

## 3.3) CONTAMINACIÓN DEL SUELO

### 3.3.1) Principales características del suelo:

El suelo constituye el soporte material y la fuente de alimentos para al desarrollo de los seres vivos que habitan en él. El suelo es una mezcla variable de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. Se origina debido a la desintegración física de las rocas subyacentes, en un proceso de erosión muy lento, disgregándose en pequeños fragmentos. Los cambios de temperatura y pH ayudan al desarrollo de este proceso dinámico, cuyo resultado final es la liberación de los diferentes nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas y otros organismos que habitan allí.

Los residuos orgánicos generados por la actividad viviente se van mezclando con los componentes originales del suelo, incrementando el contenido orgánico de éste. Un suelo maduro se forma después de cientos de años en que los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos logran un contenido de materia orgánica significativo, mezclado con las finas partículas provenientes de la roca madre. Los espacios entre las partículas están llenos de agua y gases. La porosidad y la textura del suelo son características fundamentales y determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas y animales del suelo.

Una composición típica del suelo, muestra un contenido de sólidos de aproximadamente 50% en volumen, mientras que el resto es una mezcla de agua y aire. Lejos de tener una estructura homogénea, existe un perfil vertical de composición química y estructura física que, en forma simplificada, puede considerarse compuesto por:

- En la zona superior, de un espesor que en general es de unos pocos centímetros, se encuentra la mayor fracción de materia orgánica (llamado *horizonte A*). Consta de los restos de plantas y otros organismos que están siendo lentamente degradados a materia orgánica finamente dividida, en un proceso de formación de *humus*, a través de la acción de microorganismos saprófitos (bacterias y hongos) y de artrópodos. Su espesor es de unos pocos centímetros, usualmente en el rango de 5 a 25 cm, con un contenido de carbono orgánico entre 1 y 6%. En suelos maduros, este horizonte presenta estratos que reflejan diferentes grados de progreso en el proceso de degradación de los organismos muertos.

- Bajo la capa superior se encuentra el *horizonte B o subsuelo*, formado por los productos de las alteraciones de las rocas, además de material orgánico y mineral que lixivia desde la zona superficial. Además, se encuentran compuestos inorgánicos que se han derivado de la descomposición de la materia orgánica. Su espesor está en el rango 30 a 100 cm.

- La capa más profunda, llamada *horizonte C*, está formada por material disgregado procedente del fondo rocoso, con un alto contenido mineral. En

muchos casos esta materia madre pudo haber sido transportada desde otros sitios por gravedad (depósitos coluviales), por las aguas (depósitos aluviales), por glaciares (depósitos glaciales) o por vientos (depósitos eólicos). Los suelos transportados suelen ser muy fértiles, como lo demuestran las ricas tierras agrícolas en las zonas de delta de los grandes ríos. Su espesor puede llegar hasta unos 30 m de profundidad.

El espesor y las características de cada horizonte, dependen de las condiciones climáticas y de las distintas situaciones topográficas. En las praderas, la formación de humus es rápida, mientras que la mineralización es lenta, ya que los pastos tienen una vida muy corta, acumulándose grandes cantidades de materia orgánica que se pudre y humifica con rapidez. En los bosques, en cambio, las hojas y raíces se degradan con mayor lentitud, pero la mineralización es más rápida, por lo que la capa de humus es delgada.

Los suelos con pendientes pronunciadas, tienden a tener horizontes A y B muy delgados debido a la erosión. Por su parte, en las tierras con mal drenaje, el agua lixivia con rapidez los materiales y los lleva a capas más profundas, donde precipitan formando una capa dura de mineral impenetrable para las raíces de las plantas, para los animales o el agua.

En promedio, el agua constituye alrededor de 20 a 30% en volumen de la composición del suelo y se encuentra ligada a las partículas que están en la zona superior del suelo, o bien como agua libre en las zonas inferiores (es decir, agua subterránea). Se debe tener presente que el contenido de agua del suelo puede variar significativamente desde una condición casi seca hasta la saturación, dependiendo de las condiciones climáticas. Por otra parte, el aire contenido en el suelo se encuentra en pequeños poros existentes en los horizontes A y B, con un significativo contenido de $CO_2$ y alrededor de 15% de $O_2$, producto de la actividad respiratoria de los microorganismos del suelo. Una parte importante del $CO_2$ generado se disuelve en el agua del suelo, acidificándola; ello contribuye a la disolución de algunos carbonatos presentes en el subsuelo, principalmente, $CaCO_3$. En los horizontes más profundos, la ausencia de $O_2$ favorece el desarrollo de los procesos anaerobios que generan $CH_4$, $H_2S$, $CO_2$ y ácidos orgánicos.

Las partículas inorgánicas del suelo, principalmente aquellas de unos pocos μm, presentan una gran área superficial para adsorber agua y nutrientes. Generalmente, las partículas más pequeñas están compuestas por arcillas (es decir, óxidos de silicio y aluminio hidratados). Los iones metálicos, como el $Ca^{+2}$, $K^{+}$, $Na^{+}$, $Mg^{+2}$ y otros iones esenciales, que están presentes en las partículas del suelo, son liberados cuando se encuentran presentes iones $H^{+}$, en un proceso de intercambio iónico que es muy importante en el suministro de iones para las plantas. Los principales minerales que componen el suelo son silicatos que provienen de la disgregación de las rocas ígneas y metamórficas. Otros minerales que también se encuentran en grandes proporciones son los óxidos de fierro, óxidos de manganeso, titanio, aluminio, zinc, etc., y los carbonatos (principalmente de calcio).

La materia orgánica del suelo consiste de plantas parcialmente degradadas, organismos microscópicos y humus, resultante de la acción de hongos y bacterias sobre los materiales lignocelulósicos.

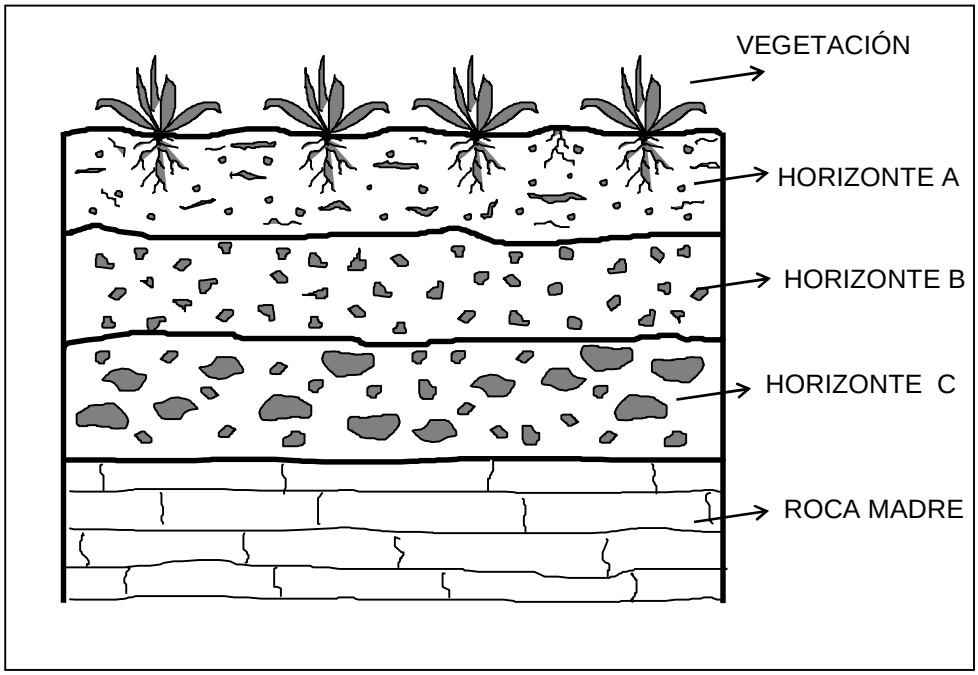



**FIGURA 3.12: PERFIL ESQUEMÁTICO DE UN SUELO**

**Erosión de suelos**

La erosión es un proceso natural donde la acción del viento, el agua y otros agentes meteóricos, tiende a modificar el relieve estructural y, finalmente, a destruirlo. El agente principal de erosión es el agua corriente, debido a su alta capacidad como solvente, como medio para transporte de material de energía.
Los factores que condicionan la erosión son:

- El clima, ya que determina las cantidades de agua que circulan por el suelo, así como los regímenes de viento.
- Las condiciones estructurales de un terreno, que fijan las pendientes e influyen sobre la dirección de escurrimiento del agua.
- La naturaleza de las rocas sobre las que ejerce la acción, el agua y el aire.

La erosión del suelo genera una reducción de su capacidad productiva potencial, ya que se elimina el soporte que permite la supervivencia de las comunidades bióticas terrestres. Generalmente, los suelos comienzan a erosionarse debido a la eliminación de su cubierta vegetal protectora, como resultado de procesos naturales o acciones humanas (incendios forestales, tala abusiva, deforestación intencional, pastoreo abusivo, agotamiento y abandono de tierras agrícolas, actividades industriales y mineras, etc.). La recuperación de un suelo erosionado, es difícil y lenta, requiriendo cientos o miles de años para que se formen unos pocos centímetros de suelo. En este sentido, la reforestación intensiva de áreas erosionadas ha demostrado ser muy efectiva para detener los procesos erosivos y recuperar terrenos improductivos.

**TABLA 3.9: TIPOS DE SUELOS DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS**

| TIPO DE SUELO | CARACTERÍSTICAS |
|---|---|
| **Podzol** | Abundante material vegetal en el horizonte A, arenoso y ácido, con alto predominio de humus (color oscuro). El horizonte B es rico en material coloidal, que son arrastrados hacia las zonas profundas. Característico de climas fríos y húmedos. |
| **Chernozen** | El horizonte A es rico en humus y en óxidos de fierro (color pardo-amarillo). El horizonte B contiene carbonato de calcio. Característico de regiones húmedas con veranos cálidos. |
| **Lateritas** | El horizonte A es casi inexistente, mientras que el horizonte B tiene un alto contenido de óxidos de fierro y alumina (color rojizo). Característico de regiones tropicales de clima cálido y húmedo. |
| **Suelos desérticos** | El horizonte A es de color gris claro. El horizonte B contiene depósitos de carbonato de calcio. Característico de regiones con clima desértico. |

**TABLA 3.10: CAPACIDAD DE USO DEL SUELO(*)**

| CLASE DE SUELO | CARACTERÍSTICAS Y USO RECOMENDADO |
|---|---|
| I | Suelos profundos, fáciles de trabajar, casi planos; sin escurrimiento superficial; sin riesgos para cultivos. Se requiere uso de fertilizantes, cubiertas de residuos y rotación de cultivos para mantener la fertilidad y estructura del suelo. |
| II | Suelos productivos de pendientes y profundidad moderadas; ocasional escurrimiento superficial; pueden requerir drenaje; moderado riesgo de daños cuando son cultivados; uso de rotaciones; prácticas especiales de cultivos para controlar erosión. |
| III | Suelos de moderada fertilidad sobre pendientes moderadas, sujetos a erosión más severa; sujetos a severos riesgos de daños por lo que se debe mantener una adecuada cobertura vegetal. |
| IV | Buenos suelos de pendientes fuertes, sujetos a severa erosión; severos riesgos de daños por lo que deben ser cultivados sólo ocasionalmente |
| V | Tierras muy pedregosas para cultivos; sujetas a erosión suave con manejo apropiado; podrían ser usadas para praderas o forestal, pero el pastoreo debe ser regulado para prevenir que la cobertura vegetal sea destruida. |
| VI | Suelos delgados sobre pendientes fuertes; uso de pastoreo o forestal; pastoreo debe ser regulado. Si la cobertura forestal es destruida, el uso debe ser restringido hasta que sea restablecida. |
| VII | Pendientes fuertes, suelos erosionables y delgados; también incluye tierras pantanosas; severo riesgo de daños cuando es usada para pastoreo o forestal; se debe aplicar manejo forestal o pastoril estricto. |
| VIII | Pendientes muy fuertes; reserva para vida silvestre, recreación limitada y conservación de cuencas hidrográficas. |

(*) *Sistema del U.S. Department of Agriculture (EEUU)*

### 3.3.2) Contaminación de Suelos

Los residuos depositados o abandonados en el suelo presentan diferentes características físicas y químicas. Más aún, los residuos se pueden encontrar ubicados sobre la superficie del suelo o enterrados bajo tierra. Una vez depositados en el suelo, los residuos están sujetos a transformaciones, debido a los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, lo que puede facilitar su transporte, dependiendo de las características de los contaminantes primarios y secundarios, y de las características geoquímicas del medio.

A continuación se describen algunos de los principales contaminantes primarios del suelo, derivados de la actividad humana.

- **Residuos Orgánicos Biodegradables**

Incluyen una amplia gama de residuos derivados de la actividad doméstica o de actividades similares donde no se generen compuestos tóxicos. Contienen restos de alimentos y otros materiales de origen animal y vegetal. Los compuestos sólidos biodegradables pueden sufrir degradación anaeróbica, debido a la acción de microorganismos, bajo condiciones de pH, temperatura y humedad adecuadas, generando compuestos volátiles, líquidos orgánicos e inorgánicos y humus.

- **Residuos Peligrosos**

Frecuentemente, provienen de fuentes industriales, hospitales, laboratorios químicos y bioquímicos, agrícolas y forestales. Incluyen compuestos sólidos, líquidos y gaseosos (presentes en contenedores) desechados en el suelo, cuya composición química, forma de disposición y concentración constituyen un peligro para la salud y seguridad de las personas y, además, representan un potencial de daño ambiental significativo. El rango de compuestos orgánicos e inorgánicos que caen dentro de esta categoría es amplísimo, y entre estos se encuentran, solventes orgánicos, biocidas, compuestos aromáticos, compuestos halogenados, metales pesados, hidrocarburos, cianuros inorgánicos, isocianatos, agentes patógenos y otros agentes biológicamente activos, etc.. Los peligros asociados a estos residuos se deben a sus propiedades químicas, físicas y biológicas, que les confieren características de toxicidad, inflamabilidad, corrosividad y reactividad. En los países industrializados existe una estricta legislación para controlar la disposición de estos residuos.

- **Residuos Estables:**

Generalmente, se originan a partir de obras de demolición, reparación y construcción de viviendas y caminos, en la actividad doméstica, en oficinas, comercio, y en algunas actividades industriales. Incluyen todos aquellos materiales, sólidos y líquidos, que presentan una alta estabilidad física y química, bajo las condiciones ambientales normales, tales como: desechos cerámicos, ladrillos, madera, vidrios, mortero, restos de cables eléctricos, restos de estructuras, papeles, cartones, plásticos, etc..

### 3.3.3) Transporte de los Contaminantes en el Suelo

Por sí mismo, el suelo no es un vector importante de dispersión de contaminantes, pero en combinación con la acción del aire y del agua puede constituir un importante foco de emisión de contaminación.

La movilidad y destino final de los compuestos del suelo depende de varios factores, entre los cuales destacan; la existencia, profundidad y dirección de escurrimiento de la napa freática, la porosidad, la temperatura, la capacidad de adsorción e intercambio iónico de las partículas del suelo, el contenido de agua y aire, y la presencia de organismos vivos.

Si el residuo sólido se mantiene en fase sólida y pasa a formar parte integral de la matriz del suelo, su movilidad será similar a la del resto de las partículas del suelo. Sin embargo, aquellos contaminante primarios y secundarios que estén en fase líquida o que sean volátiles bajo las condiciones ambientales, podrán ser transportados fácilmente por el agua y el aire:

- Los contaminantes solubles en agua presentes en el suelo son transportados superficialmente por las aguas lluvia hacia los ríos, lagos y el mar, o se infiltran hacia el interior del suelo hasta, eventualmente, contaminar un acuífero subterráneo. Por ejemplo, los compuestos orgánicos de bajo peso molecular (ácidos, alcoholes, aldehídos), generados por la actividad anaeróbica sobre residuos orgánicos biodegradables, son lixiviados por las aguas lluvia, constituyendo un importante foco de contaminación acuática.

- Aquellos contaminantes que sean volátiles, tales como hidrocarburos, compuestos orgánicos aromáticos, mercaptanos, aminas volátiles, $NH_3$, $H_2S$ y $CH_4$ , pueden ser transferidos al aire y transportados hacia otros lugares. La volatilización es favorecida por condiciones de alta temperatura y fuertes vientos. Generalmente, los compuestos volátiles son contaminantes secundarios derivados de la actividad biológica en el suelo o de procesos químicos de fotooxidación.

El transporte de los contaminantes en el aire y en medio fluvial ya fue descrito en secciones anteriores, por lo que no será revisado aquí. A continuación, se entregan antecedentes generales sobre el transporte de los contaminantes disueltos en los acuíferos subterráneos.

- **Transporte Vía Aguas Subterráneas**

Las aguas subterráneas son la mayor reserva de agua continental y una importante fuente de agua para consumo humano. Se originan debido a la infiltración directa de las lluvias, o bien a partir de las aguas de lagos y ríos que escurren a través de grietas y poros de las rocas, hasta alcanzar un nivel impermeable. La acumulación de aguas subterráneas es altamente dependiente de las características geológicas (por ejemplo, rocas porosas o fracturadas que

contienen agua) y se pueden distinguir diferentes tipos de acuíferos :

***Acuíferos libres:*** consiste en una zona permeable saturada de agua, basada sobre un estrato impermeable. Sobre dicha zona existe una zona permeable no saturada de agua, donde los poros y grietas contienen agua y aire. El agua en la superficie del acuífero está a presión atmosférica.

***Acuíferos confinados:*** la roca permeable saturada de agua queda confinada entre dos capas impermeables, de modo que la presión del agua en la superficie del acuífero es mayor que la atmosférica.

El transporte de contaminantes en las aguas subterráneas depende de las condiciones de flujo del sistema. El flujo volumétrico de agua subterránea, F , a través de un área transversal A, se puede modelar de acuerdo a la ley de Darcy:

$$F = K A \frac{dh}{dx}$$

donde *K* es la conductividad hidráulica (o coeficiente de conductividad) y *dh/dx* es el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica puede variar en varios órdenes de magnitud para diferentes tipos de materiales; algunos valores ilustrativos de *K* se presentan a continuación:

| **MATERIAL** | ***K*** **(m/día)** |
|---|---|
| Arcilla | 0,0004 |
| Arena | 40 |
| Pedregoso | 4.000 |
| Caliza densa | 0,04 |
| Granito, cuarzo | 0,0004 |

La velocidad a la cual se transporta un contaminante disuelto en un acuífero, *v*, se puede estimar en base a la relación de Darcy, tomando en consideración la porosidad del medio ($\Phi$, fracción de volumen de poros respecto del volumen total):

$$v = \frac{F}{A\Phi}$$

Sin embargo, en la realidad puede existir una significativa dispersión, debido a la tortuosidad del medio poroso y a los efectos de la adsorción del contaminante con la superficie de las partículas del suelo. Estos fenómenos son difíciles de modelar, debido a su gran complejidad y a la naturaleza altamente heterogénea del suelo.

## 3.4) TOXICIDAD

*¿Existe en la Naturaleza alguna substancia que no sea venenosa?*
*Todas las substancias sor un veneno, y sólo su dosis determina que no lo sean.*

Desde que Paracelsus, a comienzos del siglo XVI, escribió su célebre frase, mucho hemos aprendido acerca de los efectos adversos sobre la salud, derivados de la presencia de compuestos químicos en el ambiente. Las plantas y animales venenosos han sido conocidos (y utilizados) por los seres humanos desde comienzos de nuestra Historia.

En términos simples, la toxicidad se puede definir como un término utilizado para describir el efecto dañino de un compuesto químico sobre un mecanismo biológico. El estudio de estos efectos cae dentro del campo de la toxicología. En la actualidad, la toxicología es una disciplina donde convergen principios de la fisiología, la farmacología, la bioquímica, la biología molecular, la epidemiología y los fenómenos de transporte. Más aún, su aplicación al estudio de los efectos sobre los ecosistemas naturales ha dado origen a la ecotoxicología.

En esta sección, revisaremos algunos de los conceptos básicos que los ingenieros deben conocer, en el contexto de la ingeniería ambiental.

Cuando un agente químico ingresa al organismo, éste puede generar una respuesta tóxica que se manifiesta fisiológicamente de muchas formas: desde un dolor de cabeza, mareo y vómito, hasta convulsiones y muerte. Tal respuesta depende, entre otros factores, de la naturaleza química del compuesto, de la ruta de ingestión, del tiempo de exposición, de la dosis efectiva, del individuo y de los órganos afectados.

Existen tres vías de ingestión a través de las cuales los contaminantes pueden tener acceso al organismo humano (ver Figura 3.13):

- Vía oral: a través del tracto gastrointestinal (alimentos, bebidas).
- Vía respiratoria: a través del tracto respiratorio.
- Vía dérmica: a través del contacto con la piel u otras superficies externas (ej.: los ojos).

El ingreso de un contaminante al cuerpo humano es seguido por un conjunto de procesos altamente complejos, donde éste se absorbe, se distribuye, se almacena, se degrada y/o se elimina. Para producir algún efecto tóxico, el agente químico o alguno de sus productos de transformación, debe alcanzar un órgano con un nivel de concentración y un tiempo de exposición tales que puedan afectar su funcionamiento.

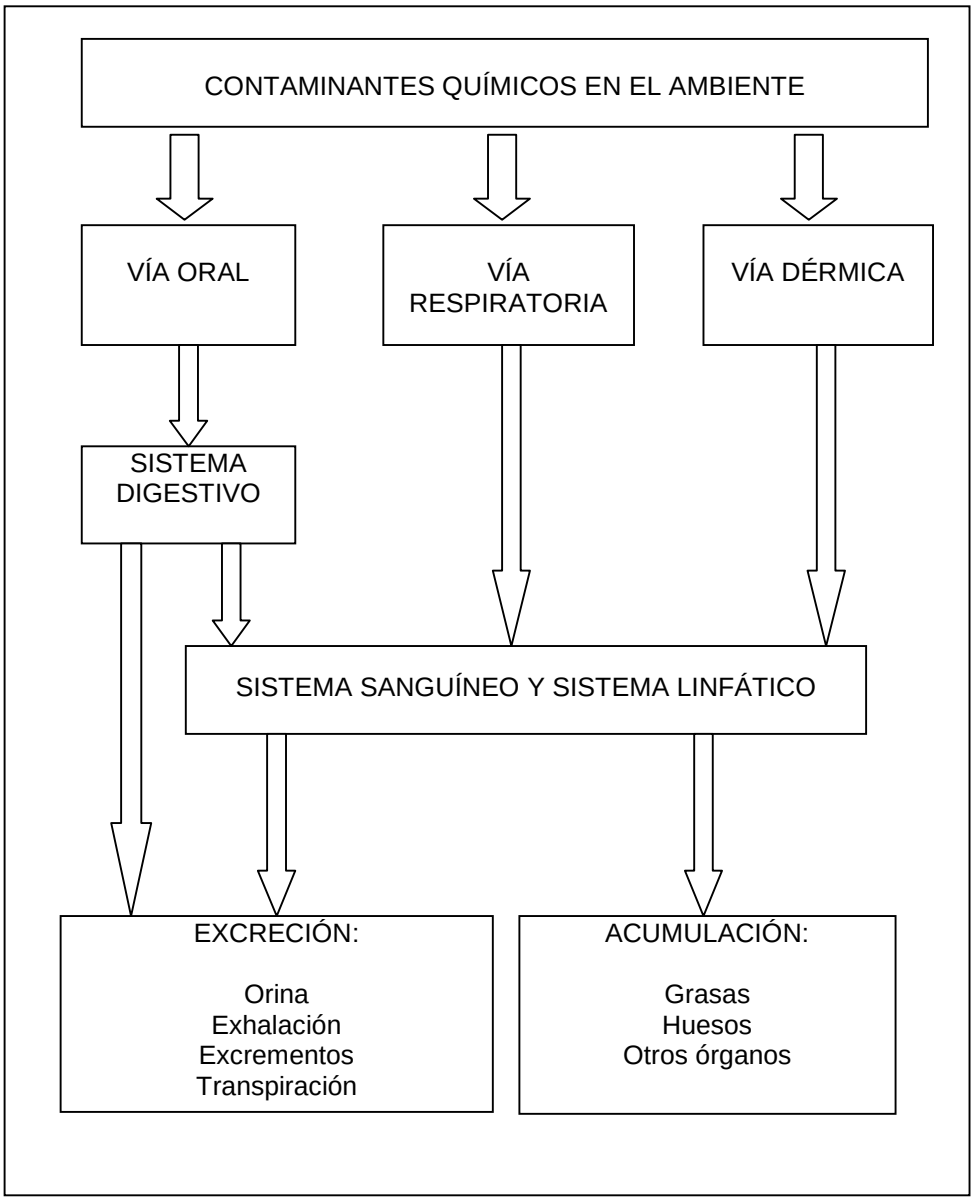



**FIGURA 3.13: DESTINO DE LOS CONTAMINANTES EN EL SER HUMANO**

El hígado es un órgano particularmente vulnerable a los agentes tóxicos, ya que su principal función es metabolizar las substancias que ingresan al organismo. Cabe mencionar además, que éste recibe la mayor parte del flujo sanguíneo. Los agentes químicos que afectan el funcionamiento del hígado se denominan hepatoxinas, e incluyen un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos (ej.: tetracloruro de carbono, cloroformo, tricloroetileno, arsénico, manganeso, drogas, pesticidas, etc.). El riñón es otro órgano expuesto al ataque tóxico, ya que actúa como filtro sanguíneo. Algunos agentes hemotóxicos, tales como el monóxido de carbono y los nitratos, afectan la capacidad de transporte de oxígeno en los glóbulos rojos de la sangre; otros agentes, por ejemplo el benceno, pueden afectar la capacidad de cicatrización de la sangre.

Los mecanismos y la secuencia de acciones específicas que resultan en un efecto tóxico, son muy complejos y, en la mayoría de los casos, no se conocen totalmente. Existe consenso de que el agente tóxico interactúa con una molécula o grupo de moléculas (receptoras) de una célula del órgano afectado, alterando drásticamente su función. Generalmente, el receptor es una enzima o algún componente de la membrana celular o molécula intracelular (ej.: ADN).

### 3.4.1) Absorción y distribución en el cuerpo

Existen múltiples vías a través de las cuales los contaminantes se distribuyen a través del organismo. Una vez que el agente químico ha ingresado al cuerpo, puede ser absorbido en el sistema sanguíneo, a través de las células que cubren el tracto gastrointestinal, o los alvéolos pulmonares, o los diferentes estratos de la piel, mediante procesos similares a los que regulan el ingreso del oxígeno, y de los compuestos y elementos vitales. La absorción celular puede ocurrir, principalmente, a través de dos mecanismos alternativos:

- ***Difusión simple***: Los compuestos ingresan por difusión molecular, debido a un gradiente de potencial químico (concentración), a través de la membrana celular. La velocidad de difusión depende del grado de ionización del compuesto y de su solubilidad en agua y en lípidos, entre otros. Las solubilidades en lípido y en agua entregan una medida de la facilidad con que el agente químico se distribuirá entre los tejidos grasos y en el sistema sanguíneo/linfático. En la práctica, se utiliza como parámetro el coeficiente de partición entre octanol y agua. La composición de la pared celular varía dependiendo de las funciones de cada célula y, por lo tanto, algunas de ellas permiten la fácil absorción de un compuesto polar, mientras que otras son más afines a compuestos no polares.

- ***Transporte activo***: Es un mecanismo de transporte a través de la membrana celular, con mayores niveles de selectividad. Generalmente, involucra reacciones químicas complejas entre el compuesto y moléculas presentes en la membrana de la célula. Este tipo de mecanismos permite, por ejemplo, absorber selectivamente los azúcares y otros compuestos nutritivos. Además, algunos contaminantes son eliminados mediante esta clase de mecanismos.

**a) Almacenamiento**

Una vez que los agentes tóxicos llegan a la corriente sanguínea, estos se pueden transportar a través de todo el cuerpo. Así, los compuestos se distribuyen parcialmente en diferentes órganos y tejidos, en distintas proporciones. En este sentido, la polaridad y la afinidad entre la estructura química del contaminante y el tejido juegan un papel determinante. Por ejemplo, en el caso de aquellos compuestos altamente solubles en lípidos, existe una mayor tendencia a almacenarse en zonas donde existe materia grasa.

Los lugares de almacenamiento de agentes tóxicos más importantes son:

- Materia grasa, en el caso de contaminantes lipofílicos (ej.: compuestos organoclorados).
- Plasma sanguíneo, en el caso de contaminantes afines a las proteínas de la sangre (ej.: mercurio).
- Huesos (ej.: plomo, radio, flúor).
- Riñones (ej.: cadmio).

En muchos casos, los compuestos almacenados pueden ser liberados hacia el resto del organismo, debido a cambios drásticos. Por ejemplo, el cambio de dieta, el estrés, el ejercicio físico intenso, y otras actividades que consumen grasas, podrían inducir una rápida liberación del contaminante almacenado en lípidos, produciendo una reacción tóxica.

**b) Biotransformación**

Cuando un contaminante llega a un órgano y no se almacena allí, pueden ocurrir dos eventos:

- ***Biotransformación***: En el caso de órganos ricos en enzimas, el contaminante es metabolizado, generando subproductos, algunos de los cuales pueden ser más tóxicos que el contaminante original.

- ***Ataque tóxico***: El agente químico forma un complejo con un receptor que deriva en la acción tóxica.

**c) Eliminación**

El contaminante o alguno de los subproductos de su metabolización, pueden ser eliminados a través de la orina, la bilis, los excrementos, las secreciones o la exhalación.

El efecto combinado de los procesos que tienen lugar una vez que el agente tóxico es ingerido tiene como resultado neto una disminución gradual de su concentración en el organismo. El estudio de la velocidad de estos procesos, se denomina toxicocinética, y es un importante componente de la toxicología.

En general, un modelo toxicocinético se puede expresar como:

$$[C] = [C]_0 - \int_0^t r_C \, dt$$

donde $r_C$ representa la velocidad neta de eliminación del contaminante, $[C]_0$ y $[C]$ son las concentraciones del contaminante a tiempo t = 0 y t = t, respectivamente, expresadas en mg o moles por unidad de volumen (litro de sangre) o por unidad de peso del individuo (kg).

La velocidad $r_C$ se basa en expresiones de pseudo-reacciones de orden cero, primer orden o segundo orden. Por ejemplo, el metabolismo del etanol se puede aproximar a una reacción de orden cero, mientras que la velocidad de eliminación de metil mercurio generalmente se modela como un proceso de primer orden.

Los modelos toxicocinéticos representan un enorme desafío, ya que se enfrentan a la enorme complejidad del funcionamiento del cuerpo humano.

### 3.4.2) Clasificación de las respuestas tóxicas

La respuesta tóxica de los compuestos se puede clasificar *de acuerdo a su efecto tóxico final*:

- ***Efecto genotóxico***: Incluye a todas aquellas substancias químicas que pueden producir alteraciones del ADN o de los cromosomas. Ello puede producir cáncer en las células somáticas (células de tejidos y órganos, no involucradas en la reproducción), o cambios hereditarios (por efectos en las células reproductoras). Estos efectos se ilustran en la Figura 3.14.

- ***Efectos no genotóxicos***: Incluye todos los otros efectos que no tengan relación con cambios en el DNA o en los cromosomas.

Los compuestos que producen cáncer se denominan ***cancerígenos***, mientras que los que producen mutaciones se denominan ***mutagénicos***. Aquellos compuestos tóxicos que tienen efectos adversos sobre el proceso de reproducción, desde la concepción hasta el nacimiento, se denominan ***teratogénicos*** (cuando afectan al embrión dentro de sus 3 primeros meses de vida) y ***fetogénicos*** (cuando afectan el desarrollo del feto en las últimas fases del embarazo).

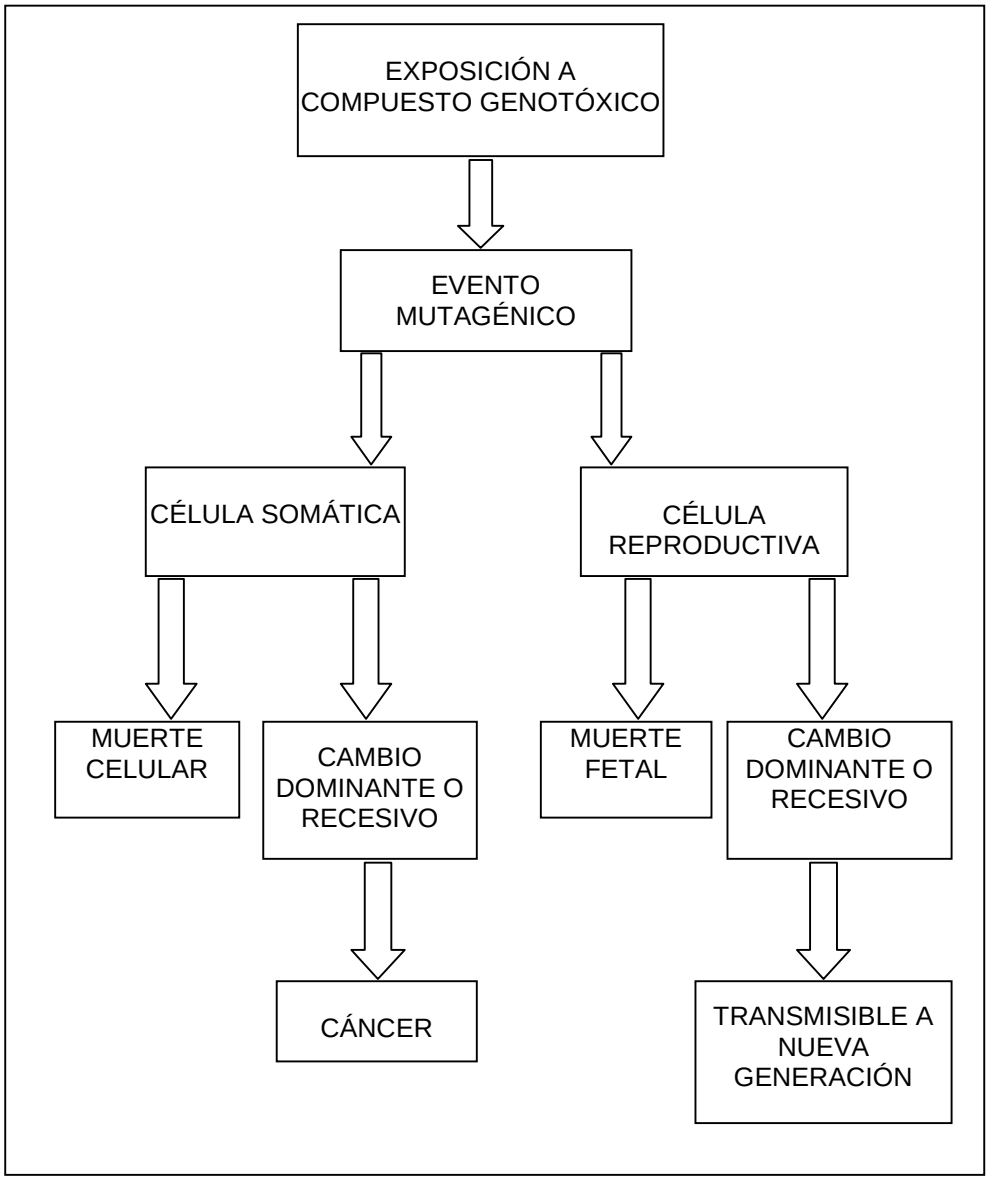



**FIGURA 3.14: EFECTOS GENOTÓXICOS**

Generalmente, los compuestos químicos cancerígenos también presentan efectos no cancerígenos, dependiendo de la dosis, tiempo de exposición y ruta de ingestión. Por ejemplo:

- *El arsénico* puede producir cáncer pulmonar, pero también produce daño hepático, fibrosis pulmonar y daño neurológico.

- *El plomo* produce tumores en el riñón, mientras que también es responsable de anemia, hipertensión, daño al cerebro y al riñón, etc.

- *El benceno* produce leucemia y afecta al feto en las mujeres embarazadas; también produce mareos, dolores de cabeza y anemia.

- *El cromo* es responsable de cáncer pulmonar, mientras que también produce bronquitis, y daño al hígado y al riñón.

- Los *hidrocarburos* aromáticos policíclicos son reconocidos cancerígenos (pulmón, estómago, piel), y también producen dermatitis y daño hepático.

La EPA norteamericana ha clasificado los compuestos cancerígenos en 5 grupos (A a E), de acuerdo a la evidencia epidemiológica acerca de su efecto cancerígeno. Así, las substancias del Grupo A, son aquellas acerca de las cuales existe suficiente evidencia de que producen cáncer. Los grupos B y C incluyen compuestos para los cuales la evidencia aún no es concluyente, mientras que D y E corresponden a aquellas substancias para las cuales no hay evidencia adecuada.

Una de las formas más utilizadas para clasificar los efectos tóxicos, se basa en el tiempo de respuesta de la manifestación del efecto:

- ***Toxicidad aguda o inmediata***: Se refiere a una acción tóxica que se manifiesta inmediatamente después de una exposición única. Por ejemplo, una dosis letal de dioxina puede resultar en muerte dentro de unos pocos minutos.

- ***Toxicidad crónica o retardada***: El efecto tóxico se manifiesta después de un período de latencia muy largo.

En este contexto, se utiliza el siguiente criterio para clasificar el período de exposición en los seres humanos:

- Exposición aguda: 1 día
- Exposición sub-aguda: 10 días
- Exposición sub-crónica: 2 semanas a 7 años
- Exposición crónica: sobre 7 años

En muchos casos, el efecto agudo puede ser reversible; sin embargo, es necesario señalar que una exposición aguda puede generar efectos toxicológicos retardados o enfermedades crónicas. Por ejemplo, una exposición aguda a un compuesto tóxico que afecte el sistema nervioso central genera en la mayoría de los casos, un daño irreversible, debido a la baja o nula capacidad de regeneración de dichos tejidos.

### 3.4.3) Modelos Dosis-Respuesta

En general, mientras mayor sea la dosis, más severa será la respuesta tóxica. Ello se debe a que, a mayores dosis y tiempos de exposición, mayor será el número de complejos formados entre el agente tóxico y el receptor.

Los estudios toxicológicos permiten correlacionar la respuesta tóxica con la dosis y tiempo de exposición. La respuesta tóxica no sólo depende de la dosis y tiempo de exposición, sino que de las características de salud y de la historia de cada individuo de la población evaluada, de su sexo, de su edad, etc.. Dada la fuerte naturaleza aleatoria del fenómeno, los modelos dosis-respuesta deben ser utilizados con cautela, ya que dependen fuertemente de la calidad estadística de los datos.

Existen muchos estudios basados en datos epidemiológicos, donde se mide la respuesta en seres humanos expuestos a los agentes químicos estudiados. Desgraciadamente, resulta difícil controlar totalmente las condiciones de tales ensayos, y los resultados están sujetos a un alto nivel de incertidumbre. Generalmente, se utilizan datos obtenidos a partir de experimentos controlados, con diversos tipos de animales (pequeños mamíferos, peces, crustáceos, etc.). La selección del organismo para efectuar los estudios de toxicidad es un paso crítico, ya que se requiere un organismo que permita establecer una conexión con los efectos tóxicos sobre el ser humano. Generalmente, se utilizan primates, ratas, conejos, ratones y conejillos de indias.

La típica relación entre dosis y respuesta para estudios sobre toxicidad aguda se ilustra en la Figura 3.15. Los estudios para determinar la relación dosis–respuesta requieren primeramente seleccionar la respuesta tóxica que se desea evaluar. Por ejemplo:

- Porcentaje de mortalidad.
- Numero de órganos seleccionados dañados.
- Numero de tumores cancerosos.
- Contenido de biomarcador (compuesto generado por acción del agente tóxico).

La dosis de agente tóxico se expresa, normalmente, como mg por unidad de peso del espécimen (mg/kg). Generalmente, los estudios de toxicidad aguda consideran un tiempo de exposición de 4 días. En el caso de peces o crustáceos, la dosis es muy difícil de estimar, por lo que se reemplaza por la concentración de contaminante en el medio acuático utilizado para el ensayo. Típicamente,

exponen muestras poblacionales a diferentes dosis (o concentraciones), durante el tiempo de duración del ensayo. Al final de éste, se determina la dosis ($LD_{50}$) (o concentración, $LC_{50}$) a la cual ocurre una mortalidad de 50% de los especímenes ensayados, previo descuento de la mortalidad natural en un medio carente del agente tóxico (i.e. control).

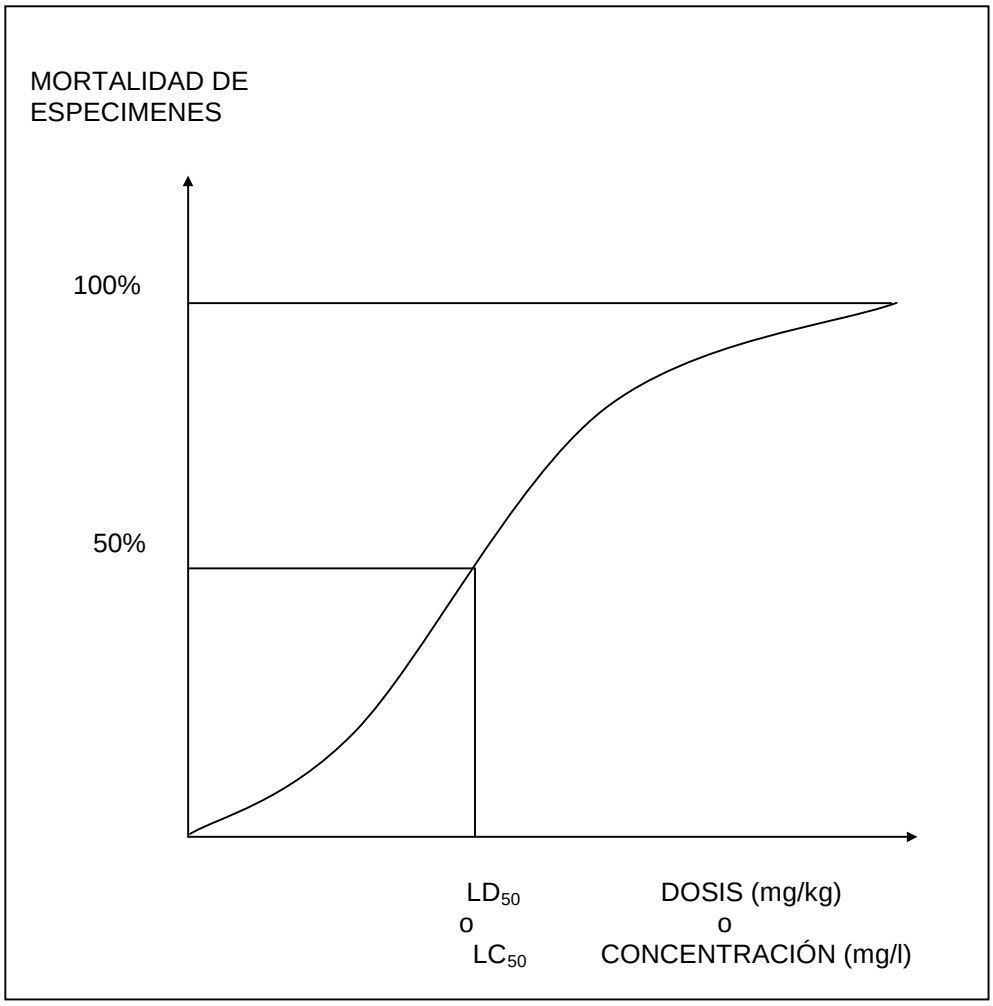



**FIGURA 3.15: RELACIÓN DOSIS – RESPUESTA . ENSAYOS DE TOXICIDAD AGUDA.**

La tabla siguiente muestra datos típicos de $LD_{50}$ realizados con ratas, durante un tiempo de exposición de 4 días:

**TABLA 3.11: TOXICIDAD AGUDA. VÍA ORAL EN RATAS. $LD_{50}$**

| SUBSTANCIA | $LD_{50}$ (mg/kg) |
|---|---|
| Etanol | 13.000 |
| Sal común | 3.800 |
| Aspirina | 1.500 |
| Lindano | 100-300 |
| Fluoruro de sodio | 200 |
| DDT | 110 |
| Nicotina | 50-60 |
| Arseniato de sodio | 40 |
| Paratión | 2 |
| Dioxina (TCDD) | 0,02-0,05 |

Los efectos tóxicos varían significativamente entre diferentes especies, incluso para tamaños, edades y pesos equivalentes. A modo de ejemplo, la toxicidad de la dioxina evaluada utilizando 3 especies diferentes:

**TABLA 3.12: TOXICIDAD AGUDA DE LA DIOXINA (TCDD). VÍA ORAL UTILIZANDO ESPECIES DIFERENTES. $LD_{50}$.**

| ESPÉCIMEN | $LD_{50}$ (mg/kg) |
|---|---|
| Conejillo de indias | 0,001 |
| Rata Long-Evans | 0,03 |
| Rata Han/Wistar | > 3 |

Los valores de dosis letal asociada a una substancia permiten clasificar su toxicidad aguda de acuerdo a los siguientes criterios:

| | |
|---|---|
| No tóxica: | Mayor que 15.000 (mg/kg) |
| Levemente tóxica: | 5.000-15.000 (mg/kg) |
| Moderadamente tóxica: | 500-5,000 (mg/kg) |
| Muy tóxica: | 50-500 (mg/kg) |
| Extremadamente tóxica: | 5-50 (mg/kg) |
| Super tóxico: | Menor que 5 (mg/kg) |

En la actualidad, se utiliza un conjunto de otros ensayos para evaluar efectos más específicos sobre funciones metabólicas y aspectos toxicocinéticos.

En el caso de compuestos no cancerígenos, es importante señalar que existe un umbral bajo el cual los efectos tóxicos no son observables. Cuando el agente tóxico ataca una célula, puede que su nivel de concentración sea muy bajo, y sólo algunas unidades enzimáticas sean afectadas, sin que ello tenga consecuencias para el funcionamiento de toda la estructura. Más aún, puede que el daño causado sea reparable por parte de los mecanismos existentes en el organismo afectado. Sin embargo, cuando una fracción significativa de unidades es afectada,

el efecto tóxico se manifestará en el organismo. Por ejemplo, el tetracloruro de carbono produce daño en los tejidos del hígado; sin embargo, si dicho ataque es limitado las células hepáticas pueden seguir funcionando satisfactoriamente, hasta que eventualmente, sean reparadas. Si dicho ataque es más severo, debido a mayores dosis de tetracloruro de carbono, el hígado presenta serias deficiencias, y se pueden producir daños irreversibles. Es importante, por lo tanto, mantener las dosis de substancias tóxicas por debajo de sus valores umbral. Existen recomendaciones basadas en estudios toxicológicos que establecen dosis diarias aceptables para diferentes substancias cuyo efecto tóxico es reconocido. Estos valores incluyen un factor de seguridad de 100, para compensar por las incertidumbres asociadas a la sensibilidad individual y a las diferencias entre el ser humano y las especies ensayadas.

Existen numerosas bases de datos sobre indicadores toxicológicos, publicadas y actualizadas periódicamente por la OMS, la Food and Agricultural Organization (FAO) y la EPA norteamericana, entre otros. Se recomienda consultar la base de datos IRIS (Integrated Risk Information System).

En el caso de compuestos cancerígenos, se ha desarrollado diferentes modelos matemáticos que relacionan la probabilidad de ocurrencia de cáncer y la dosis crónica diaria (DCD). Esta última se expresa como (mg/kg/día), es decir, como cantidad de contaminante ingerido diariamente por unidad de peso del individuo. La DCD representa un valor promedio diario que cubre todo el ciclo de vida del individuo.

El cáncer se define como una masa de tejido anormal, cuyo crecimiento excede el de los tejidos normales y persiste, aún cuando el estímulo que generó tal cambio haya cesado. En otras palabras, el cáncer es una enfermedad caracterizada por una anormalidad celular, en la cual una célula normal se altera y divide sin ningún control. La diferencia más importante entre un tumor benigno y uno maligno, radica en que éste último invade las estructuras cercanas y se propaga a sitios más distantes (metástasis).

Un modelo altamente simplificado supone una relación lineal entre la probabilidad ($P_C$) de adquirir cáncer durante el ciclo de vida, y la DCD:

$$P_C = f_P \times DCD$$

donde el factor de proporcionalidad, $f_P$ , se denomina *factor de potencia,* y depende tanto del tipo de agente tóxico, como de la vía de ingestión. La Tabla 3.13 muestra algunos valores de factor de potencia, para compuestos cancerígenos reconocidos.

**Acumulación en la Cadena Trófica**

Es importante considerar la distribución de un contaminante vertido al ambiente, a lo largo de la cadena trófica. Tal como se mencionó en secciones anteriores, algunos contaminantes son persistentes, y tienden a acumularse en los tejidos de las diferentes especies. Un contaminante que se bioacumula puede incrementar

su concentración en los tejidos a medida que es transferido a los niveles más altos de la cadena trófica. Este proceso, llamado biomagnificación, es muy importante en aquellos casos donde el ser humano está al final de la cadena alimenticia.

La biomagnificación dependerá de la capacidad de metabolización y/o excreción de las especies que componen la cadena alimenticia. En general, los resultados reportados sobre biomagnificación muestran una alta variabilidad, ya que dependen de la cadena trófica específica del ecosistema en estudio.

La Tabla 3.14 muestra algunos valores publicados por EPA, para la bioconcentración en especies marinas para diferentes compuestos presentes en el medio. La concentración en los organismos superiores $[C]_M$ , se puede estimar a partir de estos factores de bioconcentración, $f_{BC}$, y de la concentración del agente tóxico en el medio acuático $[C]_A$:

$$[C]_M = f_{BC}\ [C]_A$$

**TABLA 3.13: FACTOR DE POTENCIA**

| CONTAMINANTES | VIA ORAL $(mg/kg/día)^{-1}$ | VIA RESPIRATORIA $(mg/kg/día)^{-1}$ |
|---|---|---|
| Arsénico | 1,75 | 50 |
| Benceno | 0,029 | 0,029 |
| Benzopireno | 11,50 | 6,11 |
| Cloroformo | 0,006 | 0,08 |
| DDT | 0,34 | - |
| Dieldrin | 30 | - |
| Hexacloroetano | 0,014 | - |
| Cloruro de metileno | 0,0075 | |
| Níquel | - | 1,19 |
| PCB | 7,70 | - |
| Dioxina | $1,56 \times 10^{5}$ | - |
| Tetracloroetileno | 0,05 | $1\text{-}3 \times 10^{-3}$ |
| Cloruro de Vinilo | 2,3 | 0,3 |
| Tricloroetileno | 0,011 | 0,013 |

**TABLA 3.14: FACTORES DE BIOCONCENTRACIÓN EN AGUA**

| CONTAMINANTE | FACTOR (l/kg) |
|---|---|
| Aldrin | 28 |
| Arsénico | 44 |
| Benceno | 5 |
| Cadmio | 80 |
| Clordano | 14000 |
| Cloroformo | 4 |
| Cromo | 16 |
| Cobre | 200 |
| DDT | 54000 |
| Dieldrin | 4800 |
| Niquel | 47 |
| PCB | 100000 |
| Dioxina | 5000 |
| Tricloroetileno | 11 |
| Cloruro de Vinilo | 1,2 |

**BIBLIOGRAFÍA**


Cotton W.R., Pielke R.A.. "Human Impacts on Weather and Climate". Cambridge University Press (1995).

De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Doménech X. "Química Atmosférica: Origen y Efectos de la Contaminación", Miraguano Ediciones, Madrid (1991).

Doménech X., "Química Ambiental: el Impacto Ambiental de los Residuos". Miraguano Ediciones, Madrid (1994).

Erickson.J., "El efecto invernadero", McGraw Hill, Madrid (1992).

Fawell J., Hunt S., "Environmental Toxicology: Organic Pollutants", Ellis Horwood Ltd. Chichester (1989).

Fergusson J.E., "The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health effects", Pergamon Press, Oxford (1990).

Freedman B., "Environmental Ecology: The Ecological Effects of Pollution, Disturbance, and other Stresses". 2ª ed.. Academic Press. San Diego (1995).

Harper D. "Eutrophication of Freshwaters: Principles, Problems, and Restoration". Chapman & Hall. (1992)

Houghton J. "Global Warming: The Complete Briefing". 2ª ed. Cambridge University Press. (1997)

Masters G.M., "Introduction to Environmental Engineerig and Science", 2ª ed., Prentice-Hall Inc., London (1998)

Moriarty F., "Ecotoxicología: El estudio de contaminantes en ecosistemas", Ed. Academia S.L., León España. (1985).

Molina M.J., Rowland F.S., "Stratosferic sink for CFMs: Chlorine atom catalised destruction of ozone", Nature, 248, pp 810-812, (1974).

Vide J.M., "Fundamentos de Climatología Analítica", Editorial Síntesis, Madrid (1991).

# CAPÍTULO 4

# ASPECTOS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA DE PROCESOS

El objetivo de este capítulo es entregar una visión general de la actividad productiva, con vistas a identificar sus aspectos ambientales más relevantes, y las alternativas existentes para mitigar aquellos efectos no deseados. Primeramente, a modo de referencia, se presenta una breve descripción histórica del desarrollo de la actividad productiva. A continuación, se revisan los recursos materiales y energéticos utilizados en la actividad humana y los tipos de residuos generados. Finalmente, se presentan los diferentes procesos industriales relevantes para la realidad nacional, poniendo énfasis en los requerimientos materiales y energéticos, los tipos de transformaciones utilizadas y la naturaleza de los residuos.

## 4.1) UN POCO DE HISTORIA

Para escribir la historia del desarrollo de la actividad productiva, se debe comenzar por el principio. Los avances científicos de estas últimas décadas, permiten suponer que:

- La Tierra se formó hace 4.500.000.000 de años.
- Los primeros rasgos de vida aparecieron hace aproximadamente 2.000.000.000 de años.
- El *Homo erectus* ya habitaba la Tierra hace más de 2.000.000 de años.
- Existe evidencia de entierros funerarios que tuvieron lugar hace 50.000 años.
- Los registros escritos más antiguos datan de hace menos de 4.000 años.

Tenemos cierto conocimiento de lo que han sido los últimos 4.000 años de historia (al menos, de aquellas regiones donde han quedado registros arqueológicos interpretables). Sin embargo, para conocer el desarrollo histórico de la evolución de la sociedad humana, de sus tecnologías y modos de producción en los largos cientos de miles de años de evolución, tenemos que basarnos en los restos fosilizados, dispersos y deteriorados, de huesos humanos y sus pertenencias básicas, de alfarería y piedra.

En un largo proceso evolutivo de millones de años, nuestro ancestro se irguió en sus dos extremidades inferiores, y liberó así sus extremidades superiores para otros usos. El pulgar fue capaz de tocar los otros dedos de la mano, permitiendo realizar actos de precisión. Sus ojos tuvieron la capacidad para apreciar la tridimensionalidad del entorno y adquirir el sentido de profundidad.

Su cerebro fue creciendo de tamaño, desarrollando áreas de memoria y asociación, cada vez más poderosas y sofisticadas. Generó un lenguaje que fue adquiriendo mayor complejidad y capacidad de abstracción. Acumuló una experiencia básica sobre el concepto del peligro y del miedo. El progreso se aseguró en profundos

cambios genéticos, y también en la capacidad para comunicar los conocimientos adquiridos de una generación a otra.
En sus inicios, los seres humanos eran recolectores, cuya supervivencia dependía de la existencia local de agua, animales de caza, peces, aves y frutos. Debían emigrar constantemente en busca de agua y alimentos, por causa del clima, cataclismos u otros eventos naturales, amenazas de otros grupos humanos o bestias, u otros factores que afectaban la disponibilidad de los elementos vitales. Transcurrieron decenas de miles de años en los que se fueron desarrollando diferentes aspectos de la sociedad humana, de los que se pueden mencionar (no necesariamente en orden cronológico):

- La comunicación y la cooperación social dieron origen a la división del trabajo.

- Se descubrió el uso del fuego. Su control permitió iluminar la noche y las cavernas, protegerse del frío, cocer los alimentos y la arcilla, ahuyentar las bestias; (La caverna iluminada y tibia, protegió a nuestros ancestros del frío y de las fieras; al mismo tiempo, parece haber creado el entorno apropiado para las primeras expresiones místicas, sobre la vida y la muerte).

- Se desarrollaron mejores herramientas de piedra, madera y hueso, más sofisticadas en su forma y en su función. Se descubrió la palanca y la rueda, para transportar materiales de construcción, alimentos y materias primas diversas.

- Se identificaron los ciclos climáticos. Se identificó el ciclo reproductivo de las especies animales y vegetales. Se desarrolló la actividad de crianza de animales y aves. La domesticación también dio origen a una mejor capacidad de transporte al contar con animales de carga y tiro. Se descubrió la agricultura. La crianza y la agricultura fueron generando una mayor independencia de la caza y la recolección, dando origen a un modo de vida más sedentario.

- Se desarrollaron estructuras sociales más sofisticadas, con una base cultural y mística más elaborada (¿habremos comenzado a enterrar nuestros muertos con la esperanza de que dicha cimiente daría origen a otro ser humano, tal como ocurre con una planta?).

- Se descubrieron los metales (bronce, hierro). Ello dio origen a herramientas más elaboradas y durables; a armas más letales. La guerra parece estar presente en la base de nuestra Historia: la territorialidad existe tanto en las bestias como en el hombre, la lucha por los recursos escasos (tales como cotos de caza y fuentes de agua), la rapiña, la motivación de capturar esclavos para sacrificios a las deidades, como mano de obra para el transporte, las obras civiles y la actividad productiva...

- Se formaron los primeros complejos urbanos: conglomerados habitacionales, estatales, religiosos, militares, productivos, en torno a las fuentes de agua y a la producción de alimentos.

- El cielo nocturno, con sus estrellas y su luna, con sus movimientos cíclicos, se transformó en el reloj, el calendario y la brújula.

- Se inventó la escritura. La importancia de este hecho puede ser homologada a la importancia del fuego y de la rueda. Permitió la continuidad en el tiempo de conocimientos, normas y principios, hechos, leyendas y mitos, técnicas, etc..

El mundo de hace 2.000 años ya mostraba en forma incipiente, en todos los Continentes, los elementos tecnológicos, políticos y filosóficos que caracterizarían el desarrollo social hasta los tiempos modernos. Se habían desarrollado a cabalidad las técnicas básicas de irrigación; los procesos de fermentación para bebidas alcohólicas, para la producción de fermentados de leche (queso, yoghurt) y granos, para la preservación de alimentos; los hornos para metalurgia y alfarería; los conceptos para obras civiles; los ingenios mecánicos para el transporte marítimo y terrestre, etc.. Estas tecnologías se mantuvieron casi sin alteración hasta fines del siglo XVII.

Sin embargo, la acumulación de avances en el conocimiento, los contactos crecientes entre las sociedades de Oriente y Occidente, la ruptura de los marcos restrictivos al libre pensamiento, entre otros factores, generaron un caldo de cultivo que daría origen a un cambio tan radical y acelerado, que en menos de dos siglos modificó la faz de la Humanidad. Este proceso revolucionario, que comienza a desencadenarse principalmente en Europa y que rápidamente se expande por todo el mundo, es demasiado complejo para ser cubierto en un texto de esta naturaleza.

Muchas de las innovaciones tecnológicas se basaron en principios que ya habían sido identificados siglos atrás, cuya aplicación productiva fue motivada, en gran medida, por las poderosas fuerzas del desarrollo económico capitalista. Los principales hitos tecnológicos que tuvieron lugar desde entonces se enumeran a continuación:

- La Revolución Industrial nace formalmente con la aplicación industrial del motor a vapor en la segunda mitad del siglo XVIII. Sin embargo, ello es fruto de un largo proceso de acumulación de conocimientos en diferentes áreas de la física aplicada (ej.: mecánica, termodinámica). En 1705, los mecánicos ingleses Newcomen y Savery construyen la primera máquina a vapor para aplicaciones prácticas. A mediados de ese siglo, J. Watt perfeccionó dicho ingenio logrando su total introducción al ámbito industrial[1]. El descubrimiento del motor a vapor cambia radicalmente la capacidad para generar energía mecánica. Con anterioridad, las principales fuentes energéticas para mover ingenios mecánicos tales como vehículos, telares y molinos, provenían de fuente animal, hídrica o eólica. Con el advenimiento del motor a vapor, se incrementó la potencia disponible, así como la flexibilidad de uso (ej.: ya no se dependería de la existencia de un río caudaloso para instalar un molino o un telar). El motor a vapor significó una demanda acelerada de combustible, carbón y leña, principalmente. Durante los siglos XVIII y XIX, aquellos países que experimentaron el mayor desarrollo industrial, fueron también víctimas de la depredación de sus bosques para alimentar los ineficientes motores a vapor.

[1] Watt introdujo el condensador para una mejor utilización del calor; un sistema para mejorar la distribución del vapor a ambos lados del pistón; un sistema articulado para unir el vástago del pistón, mediante un movimiento rectilíneo, a un balancín del que cada extremidad describe un arco de círculo; un volante para dar uniformidad al movimiento de la máquina; un regulador de bolas, para compensar las desigualdades en la producción de vapor.

- La pujante industria textil europea, haciendo uso de los motores a vapor, fue uno de los sectores que dinamizó los desarrollos en otras áreas. La demanda de algodón, carbón, madera, minerales, tinturas, lubricantes y otros insumos, se incrementó exponencialmente.

- La agricultura tampoco estuvo ajena a los nuevos cambios: la introducción de fertilizantes y sistemas de bombeo hidráulico de mayor potencia, permitieron incrementar la productividad agrícola y suplir así la demanda creciente de la nueva población obrera de los grandes centros industriales.

- Así también, se incrementaron las necesidades de transporte y comunicación. El ferrocarril no sólo facilitó el transporte terrestre de grandes tonelajes de carga, sino que también generó un brutal incremento de la producción siderúrgica a gran escala, con la consiguiente demanda por minerales de hierro, caliza, madera y carbón. Y también llegó el telégrafo y, más tarde, llegaría el teléfono...

- La división del trabajo se extremó, incrementándose los niveles de productividad en todas las áreas de la industria manufacturera. El modo de producción feudal había dado paso a un capitalismo pujante, que exigía acceso a nuevos mercados, fuentes de materias primas y energía. Un modo de producción basado en la competencia, que exigía innovaciones tecnológicas.

- Los grandes avances científicos que comenzaron a cristalizar durante el siglo XIX, dieron lugar a las aplicaciones del motor de combustión interna y a la electricidad. Ambos hicieron posibles nuevos desarrollos en el transporte, las comunicaciones y en todos los sectores de la industria de manufacturas. El motor de combustión interna, dio origen rápidamente a una demanda de combustibles apropiados a las necesidades de dicho ingenio. Una gran variedad de combustibles orgánicos (líquidos y gaseosos) obtenidos a partir de procesos de fermentación, fueron utilizados en diferentes diseños. El motor de combustión interna encontró primero aplicaciones en sistemas estacionarios, en reemplazo del viejo motor a vapor. Luego, comenzó a aplicarse en sistemas móviles para el transporte de carga y personas. A comienzos del siglo XX, la industria automotriz se establece como la nueva industria de punta, que tiene un gran efecto dinamizador sobre el sector combustibles, siderúrgico y químico. Bajo este alero, la industria del petróleo comienza a florecer, en conjunto con la industria del caucho.

- Por su parte, el desarrollo de ingenios eléctricos, abre un abanico de posibilidades de aplicación industrial y en comunicaciones. A pesar de que el descubrimiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos data de hace más de 2.000 años, sus aplicaciones productivas nacen durante el siglo XIX. Físicos e inventores como Coulomb, Galvani, Volta, Oersted, Ampère, Faraday, Ohm y muchos otros, sentaron las bases para una aplicación masiva de tales principios en todas las esferas del sistema productivo: la batería, el telégrafo, el dínamo, el motor eléctrico. A fines del siglo XIX, la industria eléctrica estaba establecida, produciendo en gran escala sistemas para la generación y la utilización de la corriente eléctrica. Esto acelera el desarrollo de la industria del cobre, elemento que se impone como el conductor eléctrico preferido desde los primeros momentos. Junto a los

conductores, también se desarrolla la producción de materiales aislantes, primero de origen natural y, posteriormente, de origen sintético.

- No es difícil imaginar que la demanda por materiales cada vez más sofisticados, con propiedades físicas y químicas específicas, sirvió de fuerza motriz al desarrollo de la industria química. Durante las primeras décadas del siglo XX, se consolida la industria química orgánica. El petróleo trae consigo una amplísima disponibilidad de compuestos, que sirven de base para la síntesis de nuevos materiales, culminando en la producción de polímeros sintéticos: nace así la industria del plástico.

- Es indudable que, junto a las fuerzas motrices puramente económicas, los desarrollos de la ciencia y la tecnología del siglo XX han sido motivados por los requerimientos militares de las grandes potencias. Junto a la competencia económica, se desarrolló también una carrera armamentista en Europa, EEUU y Japón, que data desde fines del siglo XIX. La necesidad de controlar nuevos mercados y fuentes de materias primas preferenciales, sumada a los conflictos potenciados por los grandes cambios políticos y económicos del último siglo, incrementaron la agresividad de los nuevos y viejos imperios. Ya en el siglo XIX, la demanda por explosivos cada vez más poderosos (para ser justos, ¡también con aplicación en minería y obras civiles mayores!) aceleró el desarrollo de la industria química. A partir de la primera guerra mundial, se produjo una carrera generalizada por explosivos y gases venenosos de mayor potencia letal, sistemas de comunicaciones de mayor alcance, armas más efectivas, vehículos más poderosos, aviones, etc. En las proximidades de la segunda guerra mundial, se había logrado espectaculares avances en aviación, transporte terrestre y marítimo, cohetería, explosivos y comunicaciones. Durante dicha guerra, el esfuerzo científico-tecnológico se orientó totalmente hacia las aplicaciones militares, logrando en menos de 6 años innovaciones que tendrían repercusiones por el resto del siglo XX. A fines de 1945, había tenido su nacimiento oficial la Era Atómica, la Era del Petróleo, la Era de la Química, la Era de la Cohetería, la Era del Jet, la Era de la Electrónica, la Era de la Computación, la Era de la Guerra Fría.....

Lo que viene después es historia conocida y nos trae rápidamente al mundo de hoy, de comienzos del siglo XXI, el mundo donde la ciencia ficción de hace algunas décadas se transforma en realidad [2].

Hoy, los avances científicos y tecnológicos han permitido cristalizar la ficción de los vuelos espaciales a lugares remotos, los microcircuitos integrados están presentes en cada ámbito de la vida y la ingeniería genética ha roto las barreras naturales Estamos en pleno apogeo de la revolución informática y las comunicaciones, venciendo las barreras del espacio y del tiempo, multiplicando en varios órdenes de magnitud el volumen de información accesible por cada individuo. Ya son realidad

[2] Es interesante constatar que, a pesar de estos avances tecnológicos y científicos, persisten algunos procesos que se vienen utilizando desde los tiempos primitivos. La industria alimenticia actual se basa en los mismos principios de preservación y procesamiento establecidos en la antigüedad; este sector industrial sigue siendo uno de los más importantes en todos los países. Una parte significativa de nuestros procesos de generación de energía se basa en la combustión de compuestos orgánicos (ya sea de origen renovable o fósil) para obtener energía calórica....

establecida los megamercados, la globalización, y la apertura de grandes regiones al comercio mundial, procesos los cuales Chile ha estado estrechamente ligado.

La rápida urbanización y crecimiento de las ciudades durante la última mitad del siglo XX ha cambiado la faz de la Tierra. La magnitud de este proceso va de la mano con el crecimiento dramático de la población mundial y el incremento de la capacidad de producción industrial. Estos conglomerados urbano-industriales requieren de energía y materiales para su funcionamiento, llegando a consumir 1.000 veces más que un área rural de la misma extensión. Una ciudad industrial moderna puede requerir, diariamente, un equivalente per cápita de alimentos generados por 2.000 $m^2$ de terreno agrícola, el papel y otros productos forestales de 1.000 $m^2$ de bosques y 5 $m^3$ de agua. Como subproducto de esta actividad, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de material particulado, $SO_2$, $NO_x$ y otros gases, y grandes volúmenes de residuos sólidos y líquidos. Las ciudades modernas "viven" del medio rural ya que dependen de éste como fuente de alimentos y otros materiales orgánicos. A su vez, la ciudad exporta bienes, servicios y desechos, generándose una compleja interrelación entre las diferentes comunidades de una región.

Así, la materia y la energía fluyen constantemente de una zona a otra, en forma creciente, de la mano del "progreso" económico. Existe, por lo tanto, una imperiosa necesidad de armonizar el desarrollo industrial, urbano y rural para hacer posible un crecimiento sustentable, sin hundirnos en el abismo de un planeta estéril incapaz de sostener la vida humana. Es una tarea titánica que se enfrenta a la gran inercia de las fuerzas económicas, pero que debe ser encarada globalmente para que las próximas generaciones puedan disfrutar de un planeta saludable. En tal sentido, debemos recordar que la Agenda 21, acordada por las principales naciones en la Cumbre de Rio de Janeiro de 1992, nos entrega los lineamientos estratégicos para darle sustentabilidad al desarrollo de la Humanidad.

Para comprender mejor la dimensión ambiental de los procesos productivos, a continuación se revisa brevemente los tipos de recursos materiales y energéticos utilizados en la actividad humana.

## 4.2) REQUERIMIENTOS MATERIALES Y ENERGÉTICOS

### 4.2.1) Materias Primas Básicas

En general, las materias primas se pueden clasificar como renovables y no renovables.

#### a) Materias Primas Renovables

Son aquellas cuya regeneración puede ser lograda en un plazo relativamente breve, e incluye todas aquellas materias primas de origen vegetal o animal, no fosilizadas. Estas se obtienen, principalmente, de la explotación de recursos agropecuarios, forestales y marinos, siendo utilizadas directamente como fuente de alimentos o como combustible y materia prima industrial.

Todos estos recursos se obtienen directa o indirectamente a partir de la energía solar, que sustenta la actividad fotosintética primaria. La creciente expansión de la población y del sector productivo, ha obligado a aumentar el rendimiento por unidad de superficie, incorporando energía y materiales adicionales. Las prácticas modernas de producción agrícola y forestal requieren de un adecuado suministro de agua y de nutrientes limitantes (principalmente, nitrógeno, fósforo y potasio), así como de un efectivo control de plagas, enfermedades y otros agentes biológicos destructores. Más aún, se requiere de maquinaria y vehículos pesados que demandan materiales y energía para su fabricación y funcionamiento. Ello puede representar un considerable gasto energético adicional, que debe ser suministrado por fuentes no renovables (ej.: combustibles fósiles, materias primas no renovables). Por ejemplo, estimaciones hechas en EEUU, demuestran que en 1970, la energía adicional utilizada en ese país en la explotación agrícola, fue del orden de $640 \times 10^9$ kWh, lo que equivale al poder calorífico de 76 millones de toneladas de carbón. Más del 60% de la energía consumida por el sector agrario correspondió a combustible para tractores y maquinarias, y a energía para la fabricación de fertilizantes químicos. Estos valores no incluyen la energía utilizada en el procesamiento industrial de los productos agrícolas, ni en su preservación y consumo.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad del desarrollo, interesa mantener una tasa de explotación no mayor que la tasa de regeneración del recurso. En el caso de los recursos de origen forestal y agrícola, es importante tomar en consideración la reducción en la productividad del suelo debido a técnicas de explotación inadecuadas, tal como se discute más adelante. En relación a los recursos marinos, resulta más difícil determinar el balance entre tasa de explotación y tasa de regeneración. Esto es altamente relevante, dados los grandes tonelajes de explotación forestal y marina que se realizan en Chile, por lo que se debe mantener una continua observación de los balances de biomasa, un monitoreo efectivo del "stock" de recursos disponibles y de la evolución de la productividad natural.

**b) Materias Primas No Renovables**

Se definen como aquellas cuya tasa de regeneración natural es demasiado lenta (es decir, en la escala de los ciclos geológicos). Aquí se pueden distinguir materias primas de origen fósil y de origen mineral.

Las primeras incluyen aquellos materiales de origen orgánico que, con el transcurso del tiempo y las altas presiones y temperaturas del subsuelo, han sufrido transformaciones físicas y químicas. Las más importantes en este rubro son el petróleo, el gas natural y el carbón mineral. Las materias primas minerales incluyen todos aquellos compuestos minerales de uso industrial (ej.: mineral de cobre, hierro, nitratos, carbonatos, sulfatos, etc.).

La explotación de estos recursos no renovables debe hacerse tomando en consideración el "stock" disponible. Sin embargo, la velocidad de consumo de estos materiales está estrictamente determinada por factores económicos y tecnológicos.

Las transformaciones químicas que acompañan a la explotación industrial de los recursos fósiles y minerales aceleran los flujos de estos materiales a través de los ciclos geoquímicos. Por ejemplo, los átomos de S y N que se encuentran en los compuestos fosilizados son oxidados y emitidos a la atmósfera como $SO_2$ y $NO_x$, cuando estos recursos son utilizados como combustibles. La explotación de minerales sulfurados constituye otra fuente importante de $SO_2$ de origen antrópico.

### 4.2.2) Requerimientos Energéticos

La historia de la civilización está estrechamente ligada a la disponibilidad de fuentes de energía. Las sociedades primitivas (preneolíticas) de recolectores y cazadores vivieron como parte de las cadenas tróficas en ecosistemas naturales, alcanzando su máxima densidad de población en aquellas regiones donde existía un subsidio energético adicional, tal como en las zonas costeras y en las riberas de los ríos. Al aparecer la agricultura y la acuicultura, la capacidad de producción aumentó en forma significativa, una vez que los seres humanos aprendieron a incorporar nuevas formas de energía a los procesos naturales de producción de alimentos.

Durante siglos, la madera y otros productos fotosintéticos constituyeron la principal fuente de energía, junto con la energía hidráulica, animal y humana, sustentadas a su vez por la energía solar. Más tarde se incorporaron los combustibles fósiles, las máquinas de combustión interna y, durante el último siglo, la energía eléctrica y nuclear.

Se ha logrado tener acceso a fuentes de energía altamente concentradas, que han abierto las puertas a una capacidad de producción jamás soñada hace menos de medio siglo atrás. En esta sección se revisan brevemente las diferentes fuentes de energía disponibles para consumo industrial.

**Fuentes Energéticas para Uso Industrial**

Típicamente, los procesos industriales modernos utilizan tres formas energéticas básicas: energía calórica, energía mecánica y energía eléctrica.

**a) Energía Calórica**

La mayoría de los procesos industriales requieren de temperaturas mayores que la temperatura ambiente, llegando en muchos casos a varios centenares de grados. La energía calórica se utiliza a escala industrial para aumentar la temperatura de los materiales y, como consecuencia de esto, producir cambios físicos y/o químicos de interés. Se necesita energía calórica en procesos de cocción, secado, evaporación, concentración, tostación, fundición, destilación, pirólisis, etc. También se utiliza energía calórica para producir energía mecánica y eléctrica.

La energía calórica para uso industrial puede provenir de varias fuentes:

- De la energía solar directa.
- De la combustión de material orgánico (ej.: carbón, leña, gas, petróleo y derivados).
- De una corriente de fluido caliente (ej.: vapor de agua, gas).
- De la energía geotérmica.

La combustión de un material orgánico representa la fuente de energía calórica más importante en la actualidad. Al quemar el combustible se genera dióxido de carbono y agua. Esta reacción es exotérmica y el calor liberado dependerá del nivel de oxidación del carbono. Si el combustible contiene, además, azufre y/o nitrógeno, éstos se oxidan formando óxidos de azufre ($SO_2$) y/o nitrógeno ($NO_x$), respectivamente. En caso de que el proceso de combustión no sea completo, se generan compuestos intermedios, tales como CO, alquitranes, mercaptanos y otros compuestos orgánicos volátiles. Cuando el combustible contiene minerales (ej.: sodio, fierro, calcio), se forma un residuo sólido (ceniza) que está compuesto, principalmente, de los óxidos de los minerales respectivos. Las cenizas finas escapan, normalmente, con los gases de combustión en forma de material particulado.

En los procesos industriales, el calor liberado por la reacción de combustión se puede utilizar directamente, como por ejemplo, en el caso de un horno con calentamiento directo. El calor liberado por la llama o el alto contenido calórico de los gases provenientes de la combustión se utiliza para llevar a cabo el calentamiento deseado. Alternativamente, el calor de combustión puede ser utilizado para calentar un fluido (ej.: agua) en una caldera y utilizarlo como agente calórico. La gran mayoría de las aplicaciones de este tipo utiliza vapor de agua como agente calórico. En muchas industrias, se aprovecha líneas de fluido caliente que requieren ser enfriadas, para calentar corrientes que necesitan aumentar su temperatura. En el caso de la generación de energía eléctrica a partir de combustión (es decir, termoeléctrica), el proceso consiste en calentar vapor de agua a alta presión, que se utiliza en una turbina para generar electricidad.

La energía solar es la principal fuente de energía calórica existente en la Naturaleza. Esta fuente de energía calórica es "renovable" y la superficie de la Tierra recibe alrededor de 340 $W/m^2$; lo que representa un impresionante potencial energético. La energía calórica solar, sumada a la presencia de gases invernadero, permite mantener las condiciones térmicas en la superficie terrestre apropiadas para la vida, y es la fuente primaria del movimiento de las grandes masas de agua y aire en la Tierra. Más aún, la energía solar es el sostén fundamental de la actividad fosotintética, a partir de la cual se generan todos los recursos orgánicos de la Tierra. Sin embargo, el uso directo de la energía solar para proveer energía calórica a escala industrial, no es significativo a nivel global, comparado con la magnitud de estos procesos naturales. La utilización productiva directa de la energía solar se da en el secado de productos alimenticios, en procesos de evaporación y cristalización, y en el calentamiento de agua de procesos utilizando colectores solares.

**b) Energía Mecánica**

La energía mecánica se requiere para el transporte y transformación física de las materias primas. El transporte de materias primas dentro del circuito productivo constituye un importante consumo de energía mecánica. Todas las instalaciones industriales poseen bombas y/o compresores, para aumentar la presión de los fluidos e impulsarlos a través de los diferentes ductos. A su vez, donde se utilice materias primas sólidas, se encontrará correas transportadoras u otros vehículos para su transporte.

Normalmente, los procesos que utilizan materias primas sólidas requieren de operaciones para reducción de tamaño u otra forma de procesamiento mecánico. Esto se puede ilustrar para el caso de la producción de astillas a partir de troncos; el desfibrado mecánico de astillas de madera; las operaciones de molienda en la industria minera; la producción de harina a partir de trigo, etc.. Todas estas operaciones se caracterizan por su alta demanda de energía mecánica.
La energía mecánica puede provenir de diferentes fuentes, como por ejemplo:

- La tracción animal.
- La energía cinética de un cauce natural de agua o del viento.
- Los motores a vapor, de combustión interna, o eléctricos; estos últimos son las fuentes más utilizadas en la industria moderna.

**c) Energía Eléctrica**

En Chile, el sector generador de energía eléctrica está constituido por un conjunto de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas a lo largo del país, destinado a satisfacer la demanda eléctrica del sector industrial y doméstico. El año 1997 se produjo cerca de 30 millones de MWh, lo que representa un consumo per cápita del orden de 4,5 KWh/persona/día. El incremento anual de la demanda en la última década es del orden de 1-2 millones de MWh, siguiendo estrechamente el incremento del PIB. Como referencia, cabe señalar que una central hidroeléctrica de 400 MW puede generar un máximo de 3,5 millones de MWh/año, operando continuamente a plena capacidad; es decir, estaríamos requiriendo una nueva central cada 3 años.

Otras fuentes de energía incluyen los combustibles derivados del petróleo (gasolina, kerosene, gas licuado), gas natural, carbón (mineral y vegetal) y leña. En 1997, ellos generaron del orden de 60 millones de MWh, de los cuales casi el 50% se debe a la combustión de derivados del petróleo. La creciente importación de gas natural permite proyectar un fuerte incremento de su contribución a la generación de energía en el país.

De acuerdo a datos de 1997, la mayor parte de los combustibles del petróleo se consumen en transporte (51%) y en el sector industrial y minero (23%). El 70% del consumo de leña corresponde al sector doméstico, mientras que la industria consume el 24% (principalmente, la industria forestal).

La energía eléctrica se consume industrialmente en iluminación, motores eléctricos y calefactores. La energía eléctrica se puede obtener a partir de varias fuentes primarias:

- A partir de la energía potencial hidráulica (es decir, hidroeléctrica).
- A partir de la energía química de combustibles fósiles (es decir, termoeléctrica).
- A partir de la energía nuclear.
- A partir de la energía solar (celdas fotovoltaicas).

En muchos casos, la energía eléctrica es producida en las mismas plantas industriales, utilizando sistemas de cogeneración. Por ejemplo, los residuos de la industria forestal pueden ser utilizados como combustible en plantas termoeléctricas, generándose alrededor de 400 kWh por tonelada de residuos.

## 4.3) FUENTES Y TIPOS DE RESIDUOS

Los residuos se pueden clasificar según su estado físico en residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Dichos residuos se generan en todos los ámbitos de la actividad humana, tanto doméstica como industrial. A continuación se revisan brevemente las principales características de los residuos.

### 4.3.1) Residuos Sólidos

Los residuos sólidos se generan tanto en la actividad doméstica como industrial, y constituyen un problema ambiental crítico en la sociedad industrial moderna.

**Residuos Sólidos de Origen Doméstico**

Aquellos residuos generados por la actividad doméstica constituyen uno de los principales problemas ambientales de las grandes ciudades. La tasa diaria de generación de residuos sólidos urbanos (RSU) está en el rango 0,5-1,5 kg/habitante, dependiendo del nivel de desarrollo económico y del grado de urbanización. En general, a mayor nivel económico y mayor urbanización, se tiende a generar una mayor cantidad de RSU por habitantes. La Tabla siguiente muestra los rangos de composición típica:

**TABLA 4.1: COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

| COMPONENTE | % EN PESO, BASE HÚMEDA |
|---|---|
| Material orgánico | 40-50 |
| Papeles y cartones | 15-22 |
| Escorias, cenizas y lozas | 4-6 |
| Plásticos | 10-15 |
| Textiles | 4-6 |
| Metales | 2-3 |
| Vidrios | 1-3 |
| Otros | 6-7 |

**Residuos Sólidos de Origen Industrial**

Por su parte, los residuos sólidos de origen industrial (RSI), pueden generarse a partir de diferentes fuentes, que reflejaran directamente la naturaleza de los materiales utilizados y de los productos derivados del procesamiento:

- Cenizas y escorias de los sistemas de combustión para generación de vapor de procesos. Sus características químicas dependen del tipo de combustible y de las condiciones de combustión.
- Sólidos secundarios generados por los sistemas de tratamiento de efluentes (ej.: lodos de sedimentación, lodos biológicos) y/o de gases (ej.: cenizas y polvos de los filtros, precipitadores electrostáticos o ciclones).
- Insumos químicos gastados no reutilizables (ej. catalizadores agotados, solventes gastados).
- Envases y otros contenedores de materias primas, insumos y equipos. Sus características dependen del tipo de contenedor y de la naturaleza de los compuestos almacenados.
- Materiales residuales de las operaciones de mantención (ej. aceites, grasas y solventes gastados, partes de equipos dañadas, aislantes, escombros, chatarra)
- Materias primas no utilizables, debido a que no poseen características compatibles con el proceso (ie. fuera de especificación) o que no han sido utilizadas debido a problemas con las operaciones (ie. Pérdidas de proceso).
- Partes no utilizables de las materias primas (ej.: cortezas, huesos, vísceras).
- Materiales intermedios y productos fuera de especificación, sin valor comercial, generados debido a problemas operacionales u otras razones.
- Residuos de actividades de construcción, generados durante la construcción e instalación de nuevas facilidades, modificaciones a las instalaciones existentes, etc.

La tasa de generación de RSI varía ampliamente según el tipo de actividad, con

valores típicos en el rango 0,01-0,1(ton RSI/ton producto). En las últimas décadas, se ha puesto mucho énfasis en la gestión racional de los residuos sólidos, ya que se puede lograr una significativa reducción de los volúmenes generados. Tal como se menciona en el Capítulo 5, se puede minimizar las pérdidas de material sólido mediante una cuidadosa gestión, manteniendo una segregación inteligente de los residuos, para su posterior reutilización y revalorización. Más aún, una adecuada gestión de producción puede ayudar a minimizar las pérdidas debidas a materias primas y productos finales fuera de especificación. La recuperación de recursos potenciales durante el proceso de manufactura es una opción factible en muchas actividades industriales, sin que para ello se requieran grandes montos de inversión.

La Tabla 4.2 muestra factores de generación de RSI típicos, para algunos sectores industriales relevantes.

**TABLA 4.2: FACTORES DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES**

| ACTIVIDAD INDUSTRIAL | FACTOR DE GENERACIÓN (ton. RSI / ton. Producto) | TIPOS DE RESIDUOS SOLIDOS |
|---|---|---|
| Industria de productos lácteos | 0,005 – 0,01 | Lodos de tratamiento de efluentes y gases. Productos sólidos y envases fuera de especificación. Filtros y telas gastados, residuos de mantención.. |
| Matanza de ganado y procesamiento de carne | 0,03 – 0,20 | Lodos de tratamiento de efluentes. Cenizas de caldera. Estiercol. Restos de vísceras, huesos, piel, pezuñas. |
| Industria de recursos marinos:<br>a) Conserveras<br>b) Harina y aceite de pescado | <br>0,02 – 0,05<br>0,005 – 0,01 | Lodos de tratamiento de efluentes. Cenizas de caldera. Vísceras y otros restos de pez no procesables. Envases y productos fuera de especificación. Lodos aceitosos. |
| Industria de productos forestales:<br>a) Aserraderos y tableros<br>b) Pulpa y papel | <br>0,05 – 0,30<br>0,02 – 0,06 | Lodos de tratamiento de efluentes y gases. Aserrín, cenizas, residuos contaminados con biocidas, productos fuera de especificación, residuos del sistema de recuperación de reactivos. |

### 4.3.2) Residuos Líquidos

El agua es uno de los principales constituyentes en los procesos tanto naturales como industriales. Es un poderoso solvente, y como tal, un vehículo de transferencia de una amplísima gama de compuestos orgánicos e inorgánicos solubles. A su vez, las propiedades termodinámicas del agua la transforman en un excelente agente térmico para transportar energía calórica de una parte a otra del proceso.

El uso doméstico e industrial de agua resulta en la generación de residuos líquidos, cuya composición y volumen dependen del tipo de uso, de la naturaleza de los procesos, del nivel tecnológico, de los materiales utilizados y de la gestión de producción.

**Residuos Líquidos de Origen Doméstico**

Tal como se muestra en la Tabla 4.3, los residuos líquidos derivados de la actividad doméstica, están constituidos principalmente por las aguas generadas por las actividades de lavado (ropa, utensilios, alimentos, personas) y las aguas sanitarias (fecales). La tasa de generación diaria de residuos líquidos domésticos está en el rango 0,1-0,4 ($m^3$/persona).

**TABLA 4.3: COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS**

| COMPOSICIÓN | CONCENTRACIÓN ($KG/M^3$) | TASA DE GENERACIÓN TÍPICA (G/HAB./DÍA) |
|---|---|---|
| $DBO_5$ | 0,10-0,40 | 18-50 |
| DQO | 0,25-1,00 | 40-115 |
| Sólidos suspendidos | 0,10-0,35 | 18-50 |
| Nitrógeno total | 0,02-0,08 | 5-13 |
| Fósforo | 0,01-0,02 | 0,4-2 |
| Grasas | 0,05-0,15 | 10-25 |
| Coliformes fecales (NMP/100 ml) | $10^6$ - $10^9$ | - |

**Residuos Líquidos de Origen Industrial**

Por su parte, las aguas residuales generadas en la actividad industrial (RIL) incluyen:

- Aguas de enfriamiento
- Aguas de procesos
- Aguas de lavado de equipos
- Aguas servidas

Constituyen un enorme volumen y los efluentes de una planta de tamaño mediano pueden equivaler en volumen a los generados por una gran ciudad. Por ejemplo, una planta celulósica, cuya capacidad de producción es de 1.000 ton pulpa/día y que consume 70 $m^3$ agua/ton pulpa, genera descargas equivalentes a una ciudad de alrededor de 300.000 habitantes.

La composición de las aguas residuales industriales es altamente dependiente del tipo de procesos y de la naturaleza de los materiales utilizados. Más adelante en este capítulo se revisa los residuos líquidos generados en algunas actividades de interés.

### 4.3.3) Residuos Gaseosos

La contaminación atmosférica reviste gran importancia, debido a su enorme impacto directo sobre la salud humana. Cada persona adulta respira 15-28 $m^3$/día de aire y posee una superficie alveolar en sus pulmones de alrededor de 65 $m^2$. La mayoría de los contaminantes presentes en el aire puede encontrar facilmente su camino hacia la sangre, debido a que la transferencia de materia a través de la pared de los capilares pulmonares es muy poco selectiva.

Los contaminantes atmosféricos más comunes incluyen: materiales particulados, aerosoles, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, ozono, oxidantes fotoquímicos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ruido, radiaciones, etc..
Las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en Fuentes Fijas y Fuente Móviles.

- **Fuentes Fijas**

Son aquellas que operan en un punto fijo, es decir, el foco de emisión no se desplaza en forma autónoma en el tiempo (chimeneas industriales y domésticas, calderas, hornos, etc.). Los procesos de combustión típicos de las grandes urbes se pueden clasificar de acuerdo a su objetivo en:
- Sistemas los destinados a la producción de energía calórica con fines domésticos.
- Sistemas utilizados para fines industriales.

Las instalaciones de los primeros se caracterizan por su pequeña potencia y su gran dispersión geográfica dentro del casco urbano. Los segundos, por el contrario, se encuentran concentrados en pequeñas zonas bien definidas. Los combustibles empleados en estas instalaciones pueden presentarse en los tres estados físicos conocidos. Dentro de los más usados están: madera, carbón, gas licuado, petróleo, kerosene y gas natural. La combustión de estas sustancias produce diversos contaminantes en muy diferentes proporciones, tal como se resume en la Tabla 4.4.

Las fuentes fijas se pueden clasificar de acuerdo a la envergadura y distribución espacial de las emisiones:

***Fuentes Fijas Puntuales***: Son aquellas que generan emisiones gaseosas en forma más o menos contínua, a través de una chimenea o punto de descarga concentrado, con flujos significativos (ej.: mayores de 1000 $m^3$/día).

***Fuentes Fijas Difusas***: Son aquellas que generan emisiones en bajas cantidades, distribuídas espacialmente (ej.: purgas de gases a través de válvulas de alivio).

- **Fuentes Móviles**

Son las que pueden desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes en su trayectoria (automóviles, trenes, camiones, buses, aviones, barcos, etc.). La

mayor parte de los sistemas de transporte actual, obtienen su energía por medio de la combustión de diversos productos, lo que origina diferentes compuestos que son emitidos a la atmósfera. Los motores de combustión interna, constituyen una de las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos, tales como monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehidos, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, partículas en suspensión (humos), plomo y derivados. La proporción en que se emiten estos contaminantes depende de una serie de factores, entre ellos: tipo de motor, combustible usado, y estado de mantención del vehículo.

**TABLA 4.4: FACTORES DE EMISIÓN TÍPICOS PARA CALDERAS INDUSTRIALES, SIN DEPURACIÓN DE GASES**

| COMBUSTIBLE | MP | $SO_2$ | $NO_X$ | CO | COT [3] |
|---|---|---|---|---|---|
| Gas natural en calderas industriales ($kg/10^6m^3$) | 20-80 | 10 | 8.800 | 640 | 28 |
| Residuos de madera en calderas industriales (kg/ton) | 7 | 0,04 | 0,2-1 | 1-7 | 0,1 |
| Residuos de madera en calefactores domésticos (kg/ton) | 17 | 0,2 | 1,3 | 126 | 115 |
| Fuel oil Nº6 (1% S) en calderas industriales. (kg/ton) | 2 | 20 | 0,02 | s.i. | 0,2 |
| Carbón bituminoso (kg/ton) | 8 | 19 | s.i. | 1 | s.i. |

## 4.4) TIPOS DE PROCESOS Y TECNOLOGÍAS

Estos tópicos son parte de la ingeniería de procesos y constituyen temas altamente especializados. Por lo tanto, aquí sólo se enumerarán los aspectos básicos, a modo de referencia para aquellos lectores sin formación de ingeniería. En primer lugar, se describen aquellas operaciones que son comunes a una amplia gama de procesos industriales. En seguida, se revisan brevemente algunas actividades industriales relevantes a la economía nacional (ej.: Industrias de alimentos, petróleo, forestal, minera).

### 4.4.1) Operaciones Unitarias Típicas de la Industria de Procesos

Los procesos industriales incluyen un amplio rango de operaciones, tales como:

- Almacenamiento y transporte de materiales.
- Lavado de materiales y equipos.
- Reducción de tamaño (en el caso de sólidos).
- Procesos de separación de componentes.
- Procesos térmicos.
- Reacciones químicas y procesamiento biológico.

[3] COT : carbono orgánico total

- Procesos de generación energética, etc..

Por simplicidad, aquí sólo se enumeran las principales operaciones unitarias, y se clasifican de acuerdo a su naturaleza y al papel que juegan en los procesos industriales.

**a) Operaciones para el Transporte de Materiales**

Aquí se incluye todos aquellos equipos que se utilizan para el transporte de sólidos, líquidos y gases, dentro de una planta industrial. Para el transporte de sólidos se utilizan preferentemente sistemas de correas transportadoras, camiones tolva, carros u otros vehículos, transporte hidráulico, etc. Las industrias forestal, minera y pesquera utilizan materias primas sólidas y el transporte de éstas constituye un importante costo energético.

Los líquidos son transportados a través de cañerías y canales, por gravedad, o a través del uso de bombas. Por su parte, los gases son impulsados utilizando sopladores y compresores, los que permiten incrementar su presión.

Los materiales se almacenan en recipientes abiertos o cerrados, cuyos materiales y especificaciones dependen de la naturaleza de los compuestos a almacenar y de las condiciones de presión y temperatura. Toda planta industrial posee contenedores para sólidos, y estanques para almacenar líquidos y gases.

Los residuos derivados de estas operaciones incluyen: gases de combustión generados por los motores de combustión interna de los sistemas de impulsión, pérdidas de materiales transportados y envases residuales.

**b) Lavado de Materiales y Equipos**

Esta operación es trivial desde el punto de vista operacional. Normalmente, se requiere lavar materias primas (ej.: en la agro-industria) y equipos, para mantener condiciones de higiene apropiadas. Esta operación constituye una de las principales fuentes de aguas residuales de origen industrial. La composición química de las aguas de lavado refleja directamente la naturaleza de los materiales afectados por dicha operación.

**c) Reducción de Tamaño**

Esta operación es muy común en las industrias mineras, forestales y de alimentos. Se requiere reducir el tamaño de la materia prima original, hasta dimensiones que hagan posible su procesamiento posterior. El costo energético de estas operaciones es bastante alto. Se utilizan chancadoras, molinos, cuchillos, sierras, desfibradores y otros sistemas mecánicos para cumplir el objetivo de reducción de tamaño.

Los residuos sólidos que se generan corresponden a pérdidas de los materiales procesados. En el caso de las operaciones de reducción de tamaño en presencia de agua, se generan residuos líquidos con un alto contenido de materiales solubilizados.

**d) Procesos de Separación**

Generalmente, los procesos industriales requieren la separación de uno o más compuestos. Estos procesos de separación dependen de las características físicas y químicas de los compuestos a separar, aprovechando diferencias en tamaño, solubilidad, volatilidad, carga electrostática, densidad, etc. Algunos ejemplos se ilustran a continuación:

- Separaciones líquido-líquido: Si se desea separar dos o más compuestos líquidos, cuyas volatilidades son diferentes, lo más apropiado es utilizar un proceso de destilación. En este sistema, se calienta la mezcla líquida en una columna de destilación y se recoge las diferentes fracciones de acuerdo a su punto de ebullición. Los procesos de refinación del petróleo se basan en separaciones utilizando sistemas de destilación. Si los compuestos líquidos de interés presentan diferente solubilidad frente a un solvente externo, se puede utilizar un proceso de extracción por solvente. En el caso de mezclas de líquidos inmiscibles, es posible utilizar centrifugación para lograr su separación.

- Separaciones de Compuestos en Fase Gas: En el caso de mezclas de gases, éstos se pueden separar utilizando las diferencias en afinidad por un adsorbente (es decir, adsorción) o por un líquido (es decir, absorción).

- Separaciones Líquido-Sólido: Es muy común encontrar una corriente líquida que contiene material sólido. Para separar el sólido del líquido, se pueden utilizar diferentes procesos, dependiendo de las características físicas del sólido. Si el sólido es de alta densidad, puede usarse un proceso de sedimentación. Por otra parte, si el sólido es de menor densidad que el líquido, se puede utilizar un sistema de flotación. Otros sistemas de separación sólido-líquido de amplio uso industrial se basan en la filtración y en la centrifugación.

- Separaciones Sólido-Sólido: En estos sistemas se aprovechan las diferencias de densidad, tamaño o propiedades magnéticas, entre las diferentes fracciones sólidas que se desea separar.

**e) Procesos Térmicos**

En todas las operaciones industriales se requiere calentar y/o enfriar líquidos, gases y/o sólidos. Para ello, se utilizan equipos que permiten transferir el calor de un medio a otro. Una operación común consiste en transferir calor de un fluido a otro, utilizando un intercambiador de calor. El objetivo de dicha transferencia de calor puede ser: aumentar la temperatura de un material, secar un sólido, evaporar un líquido, enfriar un fluido, condensar un vapor, congelar un líquido, etc..

Normalmente, los procesos de calentamiento se realizan utilizando vapor de agua, gases calientes de combustión, aceites calientes, radiación, u otros medios. En el caso de las operaciones de enfriamiento, el medio más utilizado es agua; también se utiliza aire para enfriar grandes volúmenes de agua de procesos. Es frecuente encontrar también sistemas de combustión para generar energía calórica, tales como hornos y calderas.

Debido al alto costo de los combustibles, los diseños modernos incorporan conceptos de integración energética. En su forma más simple, dicha integración consiste en utilizar aquellas corrientes de proceso que se encuentran a alta temperatura y que requieren enfriamiento, como medio para calentar aquellas líneas que se encuentran a baja temperatura y que requieren de calentamiento.

Los residuos producidos por estas operaciones incluyen, principalmente, los gases de combustión derivados de los sistemas de generación de energía calórica y las aguas de enfriamiento.

**f) Reacciones Químicas y Biológicas**

Estos procesos de transformación se realizan en reactores. Existen diferentes configuraciones y diseños. Ellos pueden ser operados continuamente (con entrada de reactivos y salida simultánea de productos) o en forma intermitente (carga de reactivos, reacción, y descarga una vez que se complete el proceso).

Generalmente, los reactores poseen sistemas de mezclado para mantener un buen contacto entre los distintos compuestos. En caso de existir procesos exotérmicos, será necesario implementar intercambiadores de calor para mantener el nivel de temperatura y evitar el sobrecalentamiento.

Los procesos químicos cubren amplios rangos de temperatura y presión. En el caso de los reactores utilizados en la metalurgia del cobre y del acero, ellos involucran procesos de oxidación y/o reducción a altas temperaturas. Por su parte, los procesos que utilizan agentes biológicos (es decir, microorganismos, enzimas) se llevan a cabo a temperaturas menores de $50^{o}$C y a presión cercana a la atmosférica.

Los reactores químicos son frecuentes en la industria química, petroquímica y metalúrgica. Los reactores biológicos se encuentran en las aplicaciones biotecnológicas (ej.: producción de queso, yoghurt, cerveza, penicilina y otros procesos de fermentación). Su aplicación de mayor escala a nivel mundial es en el tratamiento biológico de efluentes.

## 4.5) ACTIVIDADES INDUSTRIALES

### 4.5.1) Industria de Alimentos

La industria alimenticia está constituida por aquellas actividades de origen agrícola, pecuario, y marino, que sirven para generar productos de consumo humano y animal. Este tipo de industria cubre una amplia gama de rubros; los principales se mencionan a continuación:

- Frutos y Vegetales
- Productos lácteos
- Carnes
- Avícolas

- Granos
- Azúcar
- Productos Marinos
- Aceites y Grasas comestibles
- Cervecería, Destilería, Vinícola
- Bebidas Gaseosas, Jugos
- Extractos, Saborizantes
- Alimentos especiales: Bebés, Dietéticos
- Alimentos preparados.
- Alimentos congelados

En Chile, estas industrias están orientadas tanto al mercado interno como externo. Durante la última década del siglo XX, las exportaciones agropecuarias han sido del orden de US$ 1.100 millones anuales, lo que constituye una importante fuente de divisas por exportación de productos básicos y derivados (ej.: vinos), y representa el 10% del Producto Bruto Interno. Sus productos principales incluyen: trigo, cebada, arroz, papas, remolacha, maíz, oleaginosas y frutos diversos. Además, existe una actividad ganadera y avícola limitada, destinada a satisfacer necesidades de consumo interno.

Uno de los principales rubros de la industria de alimentos lo constituye la actividad pesquera, la que se ha incrementado significativamente en las últimas décadas, con un desarrollo acelerado en la producción de harina de pescado, conservas y congelados. Una fracción significativa de su producción se orienta al mercado externo (principalmente, harina de pescado). A fines del siglo XX, las exportaciones anuales del sector pesquero alcanzaron alrededor de US$ 1.400 millones, representando el 11% de las exportaciones nacionales. En el contexto mundial, Chile ocupa el 5$^{o}$ lugar del ranking de desembarque (6% de la producción mundial), con alrededor de 5–7 millones de toneladas. Cabe destacar que el desembarque total promedio de la VIII Región de Chile desde 1994 hasta 1998 es de alrededor de 4 millones de toneladas por año, equivalente a una producción de harina de pescado de 700.000 toneladas.

Es necesario destacar que en la industria de alimentos, se incluye una amplia diversidad de materias primas, productos, niveles de procesamiento y tecnologías. La demanda de productos alimenticios de gran calidad, que mantengan la composición nutritiva y las características organolépticas de la materia prima original, han conducido a mejoras en los métodos de procesamiento.

**Residuos de la Industria de Alimentos**

La composición y el volumen de los residuos generados por la industria de alimentos dependen tanto del tipo de materias primas, como de las técnicas de procesamiento utilizadas. En general, se producen grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos, la mayoría de los cuales son biodegradables. Los residuos gaseosos corresponden a gases de combustión generados en los hornos y calderas. En algunos casos, se generan compuestos volátiles odoríferos (ej.: aminas y mercaptanos), derivados de la descomposición de proteínas u otros

compuestos de origen biológico.

Este tipo de industria consume grandes cantidades de agua, principalmente, en las operaciones de lavado, tanto de equipos como de materias primas y productos. Es importante destacar que la actividad agropecuaria genera bastantes residuos, principalmente sólidos, que pueden ser utilizados como combustibles o forraje. Se ha constatado que los residuos sólidos pueden llegar a constituir más del 50% del peso de las materias primas originales.

A continuación se revisa brevemente algunas industrias alimenticias relevantes.

**a) Generación de Productos Lácteos**

La industria de lácteos involucra una variedad de productos finales que van desde la leche pasteurizada a productos más elaborados como quesos, leche en polvo, leche condensada, yoghurt, helados, etc., en la que se utiliza diferentes insumos, tales como azúcar, frutas, jugos de frutas, nueces, etc. Esto produce residuos con diferentes características dependiendo del producto final deseado. El nivel de procesamiento también es dependiente del producto final, no obstante, existen operaciones básicas involucradas en el procesamiento de estos productos:

- recepción
- almacenamiento en tanques refrigerados
- clarificación
- separación
- pasteurización

De éstas, la operación más importante en la producción de lácteos es la ***pasteurización***, la cual permite eliminar los organismos patógenos causantes de enfermedades e inactivar enzimas, mediante tratamiento térmico. El método más común de pasteurización, es el calentamiento a 73$^{o}$C durante 16 segundos aproximadamente, seguido de un enfriamiento rápido. El producto pasteurizado se debe mantener bajo refrigeración hasta que sea utilizado, ya que este método no destruye todas las bacterias presentes. Si se requiere una mayor duración del producto, es necesario realizar una **esterilización**. Este método elimina completamente todos los microorganismos patógenos y no patógenos, mediante la exposición a temperaturas superiores a 105ºC. La Figura 4.1 ilustra los procesos de producción de leche pasteurizada y queso.

**Residuos de la industria de productos lácteos.**

Los residuos líquidos son el principal problema en la industria de productos lácteos, debido a su alta carga orgánica y grandes volúmenes generados. En la Tabla 4.5 se presenta una caracterización de los efluentes de los principales tipos de industrias lácteas. Los parámetros característicos presentados en dicha tabla son altamente dependientes de la tecnología utilizada y del manejo interno de las aguas.

En general, los residuos líquidos poseen una composición adecuada para el

desarrollo de los microorganismos, por lo que se pueden tratar eficientemente mediante sistemas biológicos, logrando reducir la concentración de material orgánico disuelto en 70-95%. Además, estos efluentes contienen materiales biodegradables de valor comercial potencial, tales como, proteínas, grasas y azúcares.

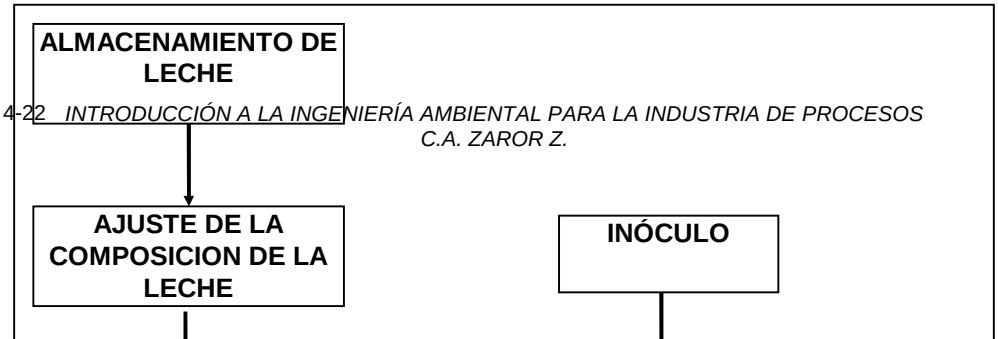
El control de estos efluentes debe orientarse al uso eficiente de las aguas, sobre todo las de lavado de equipos. Es importante realizar una segregación de las líneas residuales, que permita reciclar y reprocesar aquellas que ofrecen un potencial para la generación de sub-productos. Por ejemplo, durante la producción de quesos, se genera un suero que posee una carga contaminante elevada, por lo tanto, es recomendable su recuperación y posterior procesamiento, para obtener sub-productos de valor comercial, tales como: sustituto de alimento animal, grasas lácteas (mantequillas, cremas), concentrado proteico o etanol (ver la Figura 4.2).

**TABLA 4.5: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS LÁCTEOS**

| TIPO DE EFLUENTES | FLUJO ($m^3$/TON PROD.) | $DBO_5$ (KG./TON PROD.) | SÓLIDOS SUSPENDIDOS (KG./TON PROD.) |
|---|---|---|---|
| Lechería | 0,1 – 9 | 0,1 – 17 | 0,1 - 3 |
| Mantequilla | 0,8 – 6 | 0,2 - 2 | 0,4 - 2 |
| Helados | 0,5 – 7 | 0,7 – 21 | 0,2 - 2 |
| Leche condensada | 0,8 – 7 | 0,2 – 13 | 0,2 - 2 |
| Queso | 0,2 – 5 | 0,3 - 4 | 0,1 - 0,3 |
| Suero seco | 0,5 – 7 | 0,1 – 57 | 0,2 - 0,6 |
| Yoghurt | 0,5 - 8 | 0,1- 8 | 0,2 - 11 |
| **OTROS COMPONENTES DE IMPORTANCIA AMBIENTAL** | | | |
| Nitrógeno (mg/l) | 1 - 180 | | |
| Fósforo como $PO_4$ (mg/l) | 9 - 210 | | |
| Cloruros (mg/l) | 46 -1900 | | |
| Temperatura ($^oC$) | 8 - 46 | | |
| pH | 4 - 12 | | |

Los residuos sólidos generados por este tipo de industrias son de menor importancia en cantidad y calidad. Provienen fundamentalmente de las operaciones de envasado y empacado (ej.: cajas, envases plásticos, bolsas plásticas, botellas etc.).

Los residuos gaseosos provienen de las calderas, requeridas para generar el vapor utilizado en las operaciones de pasteurización y secado. La composición de los gases de combustión depende del tipo de combustible utilizado.



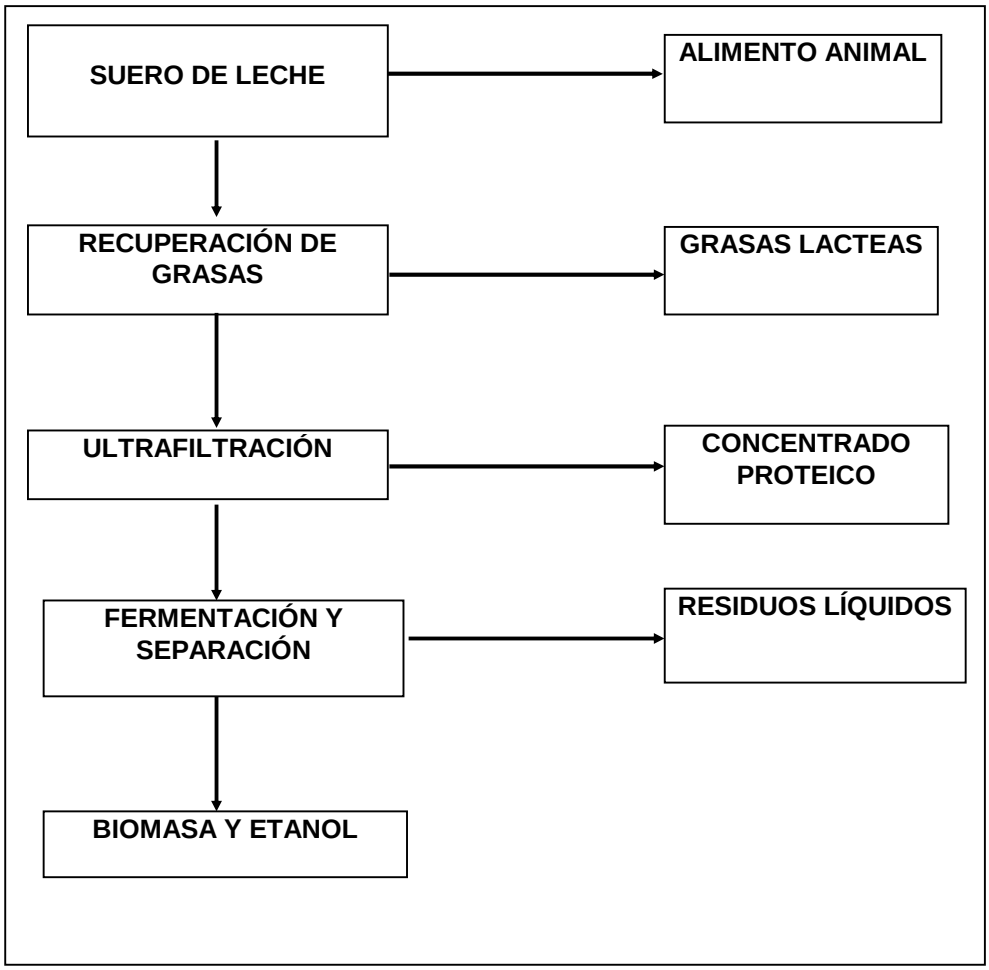



**FIGURA 4.2: PROCESAMIENTO DEL SUERO DE LA LECHE**

**b) Procesamiento de Carnes**

El procesamiento de carnes involucra variadas actividades, que van desde un matadero a una planta de procesamientos de productos más elaborados. Este rubro incluye una amplia gama de productos, tales como: simples cortes de carne para venta directa, carne envasada, cecinas, tocinos, hamburguesas, concentrados, etc.. En estas tareas se emplean distintas operaciones, entre las que se destacan el corte, desvicerado, deshuesado, molienda, cocción etc.. En la Figura 4.3 se muestra un esquema del procesamiento de la carne.

**Residuos de la industria de procesamiento de carne**

El principal problema ambiental para este tipo de industria lo conforman los residuos líquidos, los cuales provienen fundamentalmente de las aguas de sangre (Tabla 4.6). Por lo tanto, se hace necesario realizar un adecuado manejo de estas aguas, de modo que se facilite su recuperación y reprocesamiento. Existen varias opciones de reprocesamiento de la sangre:

- Secado y venta como alimento animal.
- Coagulación de las proteínas de la sangre por calentamiento.
- Procesamiento para preparaciones farmacéuticas, etc.

Las aguas de sangre, pueden ser evaporadas y concentradas para alimento animal o enviadas a una planta de tratamiento de residuos líquidos, antes de su disposición final. La elección de una u otra alternativa va a depender del mercado existente y de la factibilidad técnica y económica de tales opciones.

**TABLA 4.6: RANGOS DE COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE CARNE**

| | **MATADEROS** | **PROCESAMIENTO** |
|---|---|---|
| Flujo ($m^3$/ton m.p.) | 1,3 – 14,6 | 2,0 - 20,3 |
| $DBO_5$ (kg/ton m.p.) | 1,5 – 18,8 | 2,3 - 30,5 |
| Sól. Susp. (kg/ton m.p.) | 0,6 – 20,5 | 0,6 - 22,5 |
| Grasas (kg/ton m.p.) | 0,2 – 16,8 | 0,8 - 27,0 |
| Nitrógeno (kg/ton m.p.) | 0,2 - 2,1 | 0,04 - 2,7 |
| Cloro (kg/ton m.p.) | 0,01- 7,9 | 0,5 - 36,7 |
| Fósforo (kg/ton m.p.) | 0,01 – 1,2 | 0,03-0,63 |

Con respecto a los residuos sólidos generados por esta actividad, estos son altamente dependientes del tipo de procesamiento al que es sometida la materia prima y a la existencia de un mercado para el cuero, huesos, interiores, sangre, y otros subproductos potenciales. En el caso de los mataderos, la mayor parte de los residuos generados están constituidos por estiércol de los animales (84%), puesto que existe un aprovechamiento intensivo de pezuñas, cueros, huesos, etc.

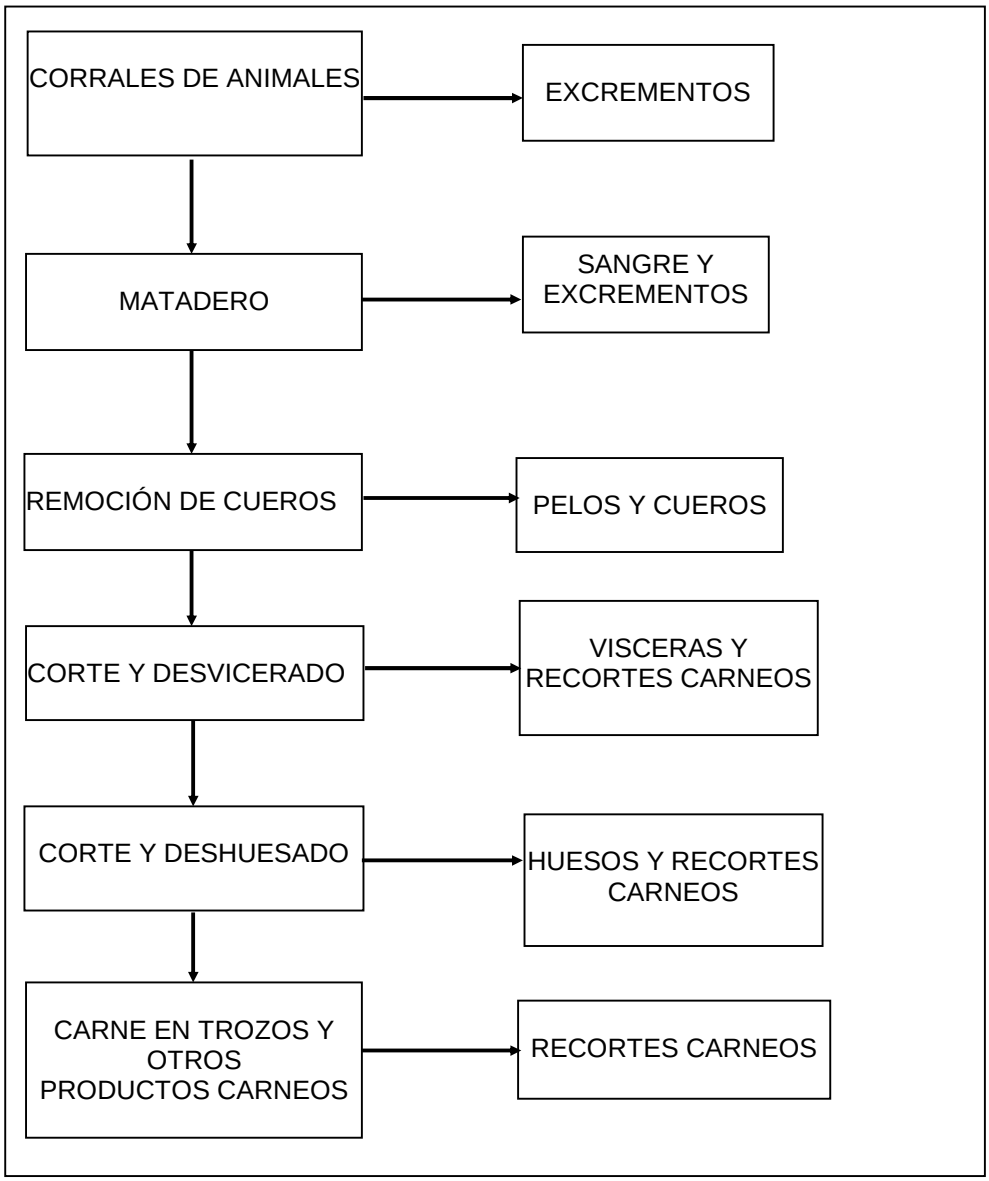



**FIGURA 4.3 PROCESAMIENTO PRIMARIO DE LA CARNE**

## c) Procesamiento de Recursos Marinos

### Producción de Harina de Pescado

La elaboración de harina de pescado utiliza diferentes especies de pescado, dependiendo de su disponibilidad. También se utilizan antioxidantes para estabilizar el producto final. Junto a la producción de harina se obtiene el aceite de pescado, el que se vende como subproducto.

El proceso de elaboración de harina de pescado consta de cuatro etapas principales:

a) ***Pesca y descarga de la materia prima***: Los peces son extraídos en alta mar y transportados al puerto en barcos de diferentes tonelajes. La pesca se descarga utilizando bombas hidráulicas o de vacío. El agua utilizada para el bombeo (5 y 2 $m^3$/ton pesca, en el caso de bombeo hidráulico y de vacío, respectivamente) se vierte directamente al mar, luego de separar los peces en una criba. El agua de descarga contiene una significativa cantidad de sólidos suspendidos y material orgánico disuelto.

b) ***Cocción***: La cocción tiene por finalidad coagular las proteínas presentes, con lo que se libera gran cantidad del agua retenida, así como también los depósitos de lípidos del tejido muscular del pescado. La calefacción se realiza mediante una línea de vapor en contracorriente, con un flujo distribuido a lo largo del cocedor. El control de temperatura es importante, pues ésta influye en la viscosidad del aceite y luego, en la facilidad de eliminación de este último.

c) ***Prensado:*** En la prensa, al pescado cocido se le extrae casi por completo el líquido que aún contiene, el cual está compuesto por agua y aceite. Los productos obtenidos aquí son: Licor de Prensa y la Torta Prensada. El licor se pasa a través de intercambiadores de calor, con la finalidad de alcanzar una temperatura óptima para la separación en los decantadores. El licor del Decantador se vuelve a calentar y se alimenta a las centrífugas, donde se separan el aceite del agua de cola. El agua de cola es llevada hacia los evaporadores para concentrarla y pasarla a secado. Este líquido es rico en proteínas, por lo cual se adiciona a la etapa de prensado para mejorar las características de la harina.

d) ***Secado***: En esta etapa se procesan en forma conjunta los sólidos provenientes de la prensa, del decantador y el concentrado adicionado, los cuales pasan por una etapa anterior de desmenuzado. La humedad de la torta de prensa ( 45 - 60%) se reduce a un 10% o menos, con el propósito de inactivar la actividad microbiana, facilitar la manipulación y conseguir economías por concepto de almacenamiento y transporte ( reducción de un 40% en peso ).

Siguiendo la etapa de secado, se agrega un antioxidante, que tiene la finalidad de evitar la descomposición del aceite que aún contiene producto e inhibir la reacción de las grasas de la harina con el oxígeno, la cual es altamente exotérmica.

**Elaboración de Conservas**

En la fabricación de conservas de recursos marinos se utiliza variadas materias primas, desde mariscos a diferentes tipos de pescado. Generalmente, este tipo de empresas están integradas a las plantas elaboradoras de harina de pescado, en la cual se procesan todos los residuos de pescado generados en la industria conservera. En estas últimas, se procesa la pesca más fresca y de mejor calidad.

El proceso de elaboración de conservas de pescado consta fundamentalmente de cinco etapas principales:

a) ***Pesca y descarga de materia prima:*** Esta etapa es similar al caso de la producción de harina de pescado.

b) ***Corte y desvicerado:*** El pescado se recibe desde los pozos de almacenamiento, en los cuales se mantiene con hielo para conservar la frescura. Luego va hacia la mesa de corte, donde son eliminados la cabeza, cola y vísceras, y el pescado que no cumple con las exigencias de calidad, los cuales son enviados a la planta de harina. El corte se realiza con cuchillos mecánicos o en forma manual. El desvicerado se realiza mediante un sistema de succión especial, el cual limpia completamente el pescado en su interior. En seguida, pasa a la mesa de empaque, donde el pescado es envasado en tarros metálicos previamente lavados.

c) ***Cocción***: Esta se realiza en una cámara con vapor durante 30 minutos, después de los cuales, los tarros se invierten y drenan. Esta cocción tiene como objetivo eliminar el aceite y grasas, y sacar el agua contenida en el pescado.

d) ***Dosificación***: En esta etapa, al pescado se le adiciona el líquido de cobertura, generalmente salsa de tomates concentrada o aceite. Luego, los envases son sellados en forma mecánica.

e) ***Esterilización:*** Este proceso se realiza en una autoclave, en la cual los tarros son tratados a 116$^{o}$C. Desde aquí, los tarros salen calientes y se dejan enfriar para luego etiquetarlos y almacenarlos en bodega.

**Residuos de la industria de procesamiento de recursos marinos**

Los residuos líquidos generados por las actividades involucradas en el procesamiento de los recursos marinos provienen fundamentalmente de:

- Las aguas utilizadas en el transporte hidráulico de la pesca desde el barco a la unidad de descarga. Estas contienen restos de pescado (ej.: tejidos, escamas, sangre, etc.) que se generan durante la operación, los cuales varían según la calidad de la materia prima y las características del sistema de descarga.
- Los efluentes del proceso de producción de harina de pescado son generados principalmente en las operaciones de limpieza de la planta.
- Los efluentes del procesamiento de la pesca para producción de conservas y congelados.

La Tabla 4.7 muestra las características de las aguas residuales de los distintos procesamientos de recursos marinos y de las líneas segregadas de la producción de harina de pescado. En el caso de la producción de harina de pescado se generan 30 – 50 kg DQO/ton de harina y 4 – 8 kg de grasas residuales/ ton de harina.

La industria de harina de pescado moderna genera una cantidad relativamente pequeña de residuos sólidos. Ello se debe al alto grado de aprovechamiento integral de todo el material orgánico. El mayor problema de contaminación por sólidos lo constituye la descarga de pescado desde las bodegas de los barcos de captura. Debido a la naturaleza de la operación de descarga, una fracción de la materia prima puede sufrir deterioro y ser devuelta al mar junto con el agua utilizada para realizar la descarga. En el caso de las bombas hidráulicas, el deterioro es mayor, llegándose a perder entre un 10 a un 15% de la carga original; para el caso de las bombas de vacío, la pérdida se reduce a menos de 3%. La recuperación de sólidos en las operaciones de descarga permite disminuir significativamente los residuos y aumentar la eficiencia de utilización de la materia prima. Otros residuos sólidos de las plantas comprenden las cenizas de caldera, en aquellos casos donde se utiliza carbón mineral para suplir los requerimientos energéticos del proceso.

Los residuos gaseosos provienen de los gases de combustión de los sistemas de generación de vapor para cocción y secado. Además, son frecuentes las emisiones de compuestos orgánicos volátiles odoríferos (aminas) y $H_2S$, derivadas de la descomposición biológica y térmica de las proteínas de pescado durante el almacenamiento en las bodegas de los barcos y de la planta industrial..

**TABLA 4.7: COMPOSICIÓN TÍPICA DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE RECURSOS MARINOS**

| RUBRO | DBO ($kg/m^3$) | Sólidos Suspendidos ($kg/m^3$) | Grasas y aceites ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|
| Pescado Trozado | 0,4-1,1 | 0,1-0,5 | 0,1-0,9 |
| Procesamiento de langosta | 1 | 0,2 | 0,3 |
| Procesamiento de jaivas y cangrejos | 0,7 | 0,3 | 0,3 |
| Harina de Pescado: | | | |
| Agua de sangre | 120-250 | 12-15 | 2,7-3 |
| Agua de cola | 160-200 | 15-66 | 0,3-1,2 |

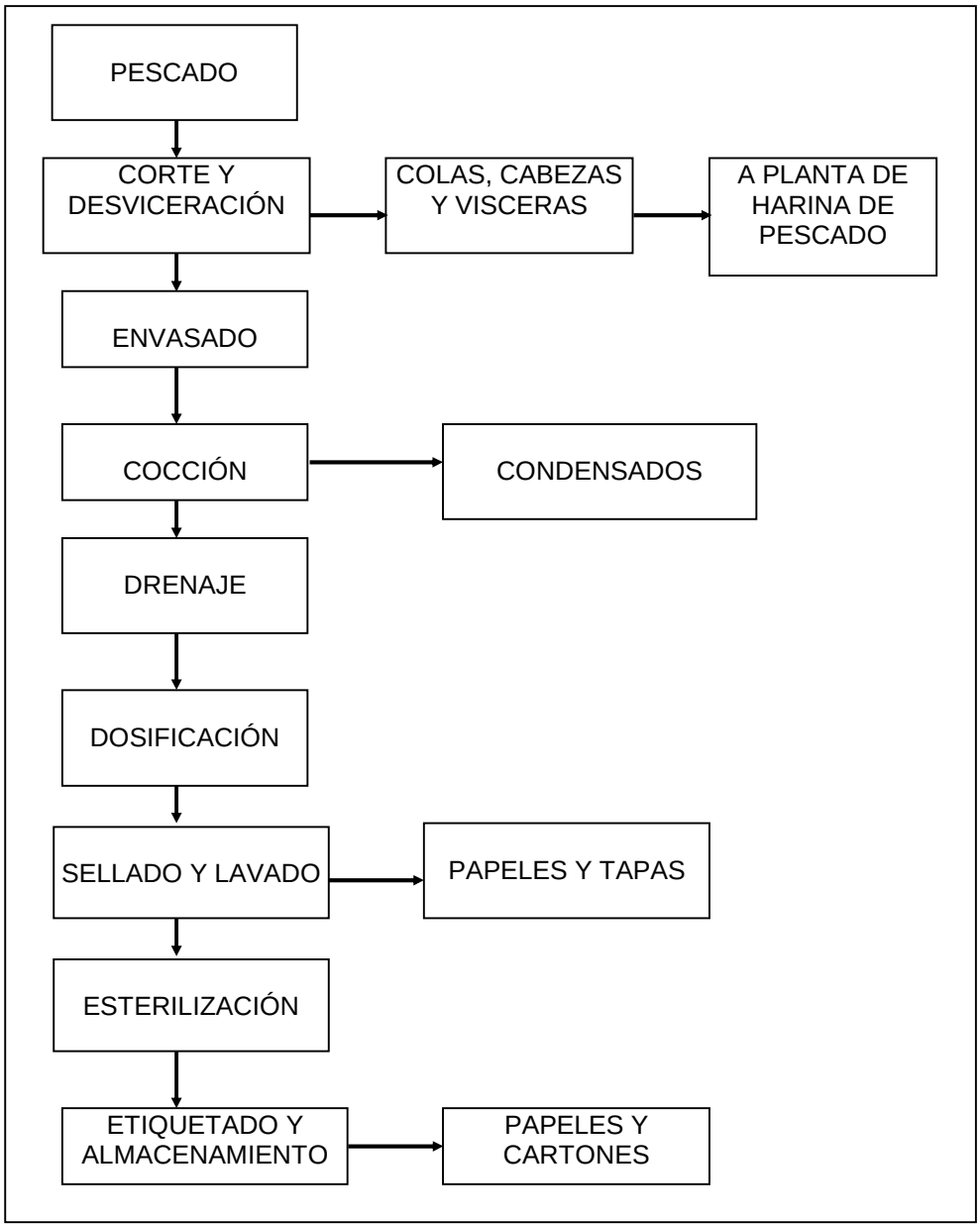



**FIGURA 4.4: ELABORACIÓN DE CONSERVAS**

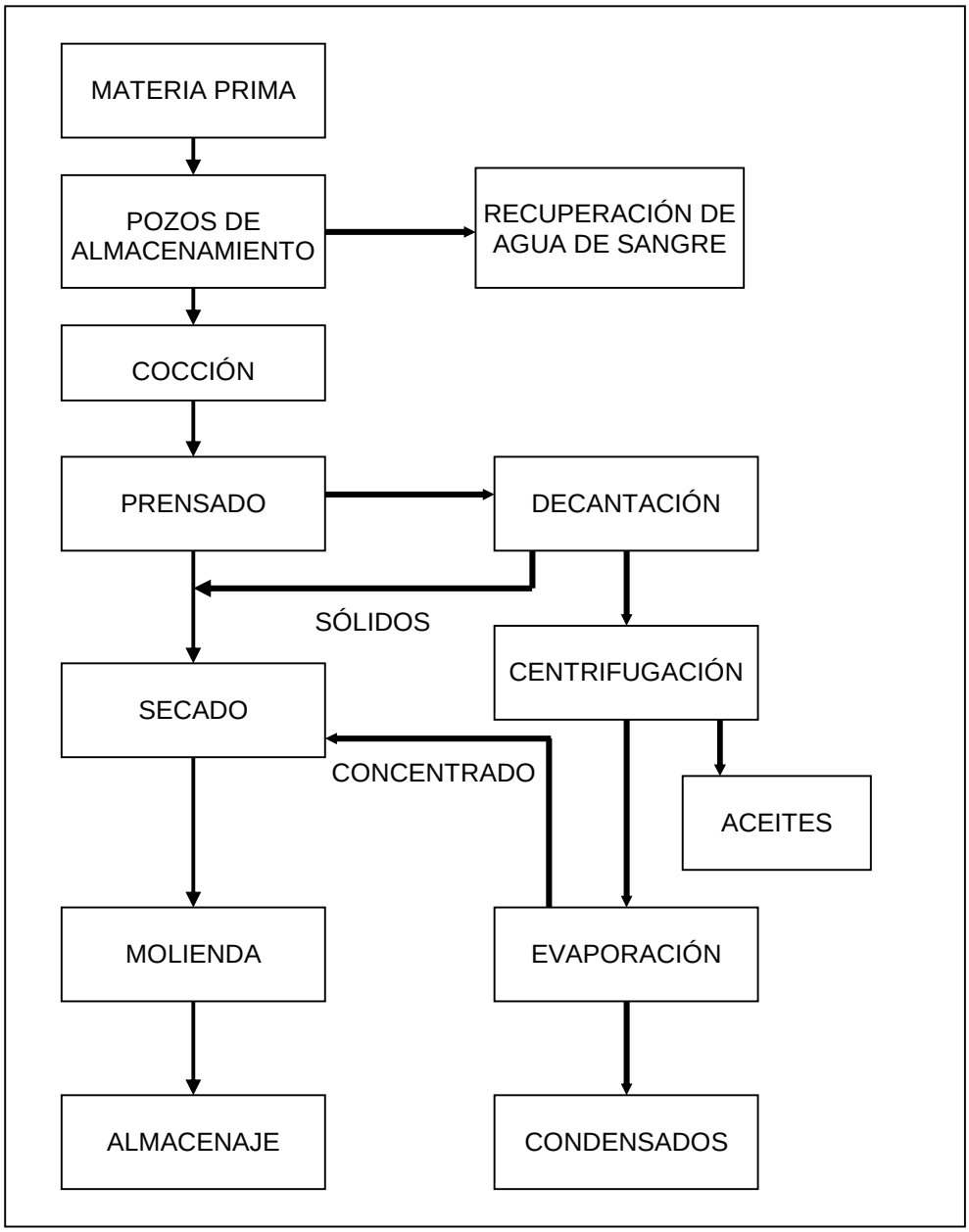



**FIGURA 4.5: ELABORACIÓN DE HARINA Y ACEITE DE PESCADO**

### 4.5.2) Industria de Productos Forestales

La actividad forestal es uno de los sectores productivos que ha mostrado un alto dinamismo desde los años setenta. En Chile, a comienzos del 2000, el consumo anual de materia prima forestal es del orden de 10.000.000 toneladas de madera y los retornos por exportaciones ascienden a US$ 1.200.000.000 por año. Se produce anualmente cerca de 2.500.000 toneladas de celulosa, papeles y cartones; además, se exporta alrededor de 3.500.000 ton. de madera aserrada. En Chile existen alrededor de 1.400.000 hectáreas plantadas con pino radiata, de un total de 1.700.000 hectáreas de plantaciones (incluyendo además, eucalipto y otras especies). Las plantaciones anuales han ido incrementando, llegando a cerca de 120.000 hectáreas plantadas/año en la actualidad. Esto se suma a una reserva de 7.500.000 hectáreas de bosques nativos. Se estima que los terrenos forestales productivos o indirectamente productivos llegarían a alrededor de 34.000.000 hectáreas.

#### a) Industria de Aserrío

Esta actividad industrial, incluye el aserrado de madera y su procesamiento físico para transformarla en madera dimensionada y/o elaborada, la cual es incorporada en forma de partes o piezas en diversos bienes de consumo final.

Las operaciones básicas involucran diferentes tipos de cortes utilizando sierras, para generar el producto en las dimensiones requeridas. Dependiendo del grado de elaboración del producto final, se incluyen operaciones de pulimiento, cepillado, secado y/o impregnación. En el caso de procesadoras con secado incluido, se utiliza parte de la materia prima residual como combustible.

Se genera desechos de madera tales como: aserrín, corteza, viruta, despuntes, etc. En lo últimos años, se ha implementado procesos que permiten un mejor aprovechamiento del recurso forestal, maximizando la producción de los productos principales y reutilizando los desechos en usos alternativos. Los residuos se pueden usar como combustible, internamente en planta, o como subproducto para el mercado local. La mayoría de las plantas procesadoras de gran tamaño están utilizando dichos recursos en reemplazo de los combustibles convencionales. Por otra parte, el aserrín es utilizado como materia prima en la industria de tableros de partículas, aún cuando dicha utilización representa una fracción muy pequeña del total generado. Los trozos residuales de mayor tamaño (ej.: tapas) tienen salida en las plantas astilladoras y en las empresas productoras de pulpa celulósica.

El consumo de agua ocurre principalmente en el riego de la materia prima, para evitar el ataque de hongos y prevenir la ocurrencia de incendios. El agua residual puede arrastrar compuestos solubles de la corteza.

En el caso de aquellos aserraderos donde se trata la madera con aditivos biocidas, se generan aguas residuales con alto contenido de materiales tóxicos (normalmente, de tipo organoclorado) y aserrín contaminado con dichos compuestos. Estos residuos peligrosos deben ser tratados con mucho cuidado, ya que pueden afectar la salud de las personas y contaminar los cuerpos de agua. Igual consideración se

debe tener con los contenedores de los biocidas, una vez que estos se consumen.

**b) Industria de Celulosa y Papel**

Estas industrias utilizan trozos provenientes del raleo, trozos no aprovechables en aserraderos y astillas de la industria de astillados. En Chile, las principales materias primas para la producción de celulosa son el pino radiata (fibra larga) y el Eucalipto (fibra corta). La madera presenta una estructura fibrosa que contiene, principalmente, celulosa, lignina y hemicelulosas. En el caso del pino, la celulosa y la lignina corresponden al 43% y 29% del peso total, respectivamente; mientras que en el eucalipto, el contenido es de 43% y 22%, respectivamente. El proceso de producción de celulosa consiste en remover la lignina y la hemicelulosa, en forma selectiva, utilizando compuestos químicos que permiten disolver estos constituyentes de la madera original. En Chile se utiliza principalmente el proceso "kraft", que permite recuperar los reactivos, obteniéndose además, una completa integración energética. A continuación se describe en forma esquemática las principales operaciones que caracterizan la producción de celulosa kraft blanca en plantas modernas, ilustradas en la Figura 4.6. Además, en el Capítulo 10 se presentan los resultados de los flujos de materiales y energía a través de todas las actividades asociadas a la producción de celulosa kraft blanca.

*Preparación madera:* Los trozos de madera son descortezados y luego reducidos a astillas, que son transportadas a través de correas al reactor donde se realiza la cocción.

*Cocción:* Las astillas se ponen en contacto con una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, llamada licor blanco. Esta operación se lleva a cabo a alta temperatura (160ºC-180ºC) y presión, lo que permite disolver gran parte de la lignina que une a las fibras de madera. Luego, el sólido se somete a un exhaustivo lavado y filtrado. Como resultado se obtiene una pulpa de fibras ricas en celulosa (pulpa cruda) y un residuo líquido ("licor negro") rico en compuestos orgánicos disueltos y reactivos del proceso.

*Recuperación de Reactivos y Energía:* El licor negro posee un alto valor energético, ya que contiene compuestos orgánicos disueltos que equivalen a más del 50% del peso de la madera procesada y la casi totalidad de los reactivos utilizados en el proceso de cocción. Este licor negro se concentra y se quema en una caldera de recuperación, donde se obtiene energía calórica y un fundido inorgánico de carbonato de sodio ($Na_2CO_3$) y sulfuro sódico ($Na_2S$). Estas sales se disuelven y se hacen reaccionar con CaO para generar el licor blanco, el cual se reutiliza en la cocción. La energía calórica liberada por la combustión es utilizada para producir vapor y energía eléctrica.

*Deslignificación con Oxígeno:* La pulpa cruda contiene lignina residual, la que debe ser eliminada a través de oxidación química. En la última década se ha establecido el tratamiento con oxígeno como una primera etapa en la purificación química de la celulosa. La pulpa cruda se hace reaccionar con una corriente gaseosa de oxígeno puro, logrando eliminar casi el 50% de la lignina residual. El líquido residual de este proceso se mezcla con el licor negro y se envía a la unidad

de recuperación de reactivos y energía.
*Blanqueo:* El tratamiento anterior no es suficiente para eliminar la totalidad de la lignina residual presente en la fibra celulósica. Para ello se requiere la acción de agentes oxidantes más selectivos hacia la lignina. En la actualidad, se utiliza una secuencia de blanqueo en base a dióxido de cloro ($ClO_2$) como agente oxidante, en varias etapas sucesivas (D), que incluye etapas de extracción (E) y lavados intermedios. El líquido residual de estas operaciones no se puede enviar a la unidad de recuperación de reactivos, ya que la presencia de cloro podría tener efectos corrosivos desastrosos en la caldera de recuperación. Dichos residuos líquidos deben ser tratados adecuadamente, pues poseen material orgánico disuelto y compuestos organoclorados, derivados de la acción del $ClO_2$ sobre la lignina.

*Tratamiento de Residuos Gaseosos*: Los gases residuales provienen principalmente de la caldera de recuperación, de la caldera de biomasa (que se utiliza para generar vapor y electricidad a partir de los desechos de madera no pulpables) y del horno de cal (que regenera el CaO). Estos gases contienen, principalmente, material particulado y $SO_2$. Para su depuración se utiliza precipitadores electrostáticos y absorbedores. Además, se generan mercaptanos y otros compuestos azufrados (medidos como TRS, sulfuros reducidos totales) en el proceso de cocción y en el sistema de recuperación de reactivos, los que son fuente del mal olor característico. Estos últimos deberán ser recolectados en su fuente e incinerados. En la actualidad, las plantas modernas emiten alrededor de 1-2 (kg $SO_2$/ton pulpa) y 0,5 (kg TRS/ton pulpa).

*Tratamiento de Residuos Líquidos:* Los líquidos residuales provienen, principalmente, de la secuencia de blanqueo y líquidos generados en el lavado de equipos y derrames de pulpa. Se generan 30-90 $m^3$ de residuos líquidos/ton pulpa, que contienen sólidos suspendidos (fibras), material orgánico disuelto generado en la secuencia de blanqueo, reactivos de blanqueo y otros. La presencia de compuestos altamente coloreados y compuestos organoclorados (medidos como AOX), demanda un sistema de tratamiento de gran capacidad depurativa. Generalmente, se incluyen sistemas para eliminar sólidos suspendidos, tales como sedimentadores o flotadores por aire disuelto; además, se requiere de un eficiente sistema de tratamiento secundario para la eliminación de material orgánico disuelto. Los residuos líquidos tratados, generados por una planta de celulosa moderna, contienen alrededor de 0,2-0,5 (kg AOX/ton pulpa) y 20-50 (kg DQO/ton pulpa).

*Tratamiento de Residuos Sólidos:* Los residuos sólidos de madera derivados de las operaciones y otros residuos sólidos combustibles, tales como los lodos generados en la planta de tratamiento de residuos líquidos, se pueden quemar en una caldera de poder, a alta temperatura, para generar vapor y energía eléctrica. Como residuo final se obtienen cenizas estables que deben ser dispuestas en un vertedero controlado. Se generan residuos sólidos en el rango 0,02 – 0,06 kg RSI / ton pulpa.

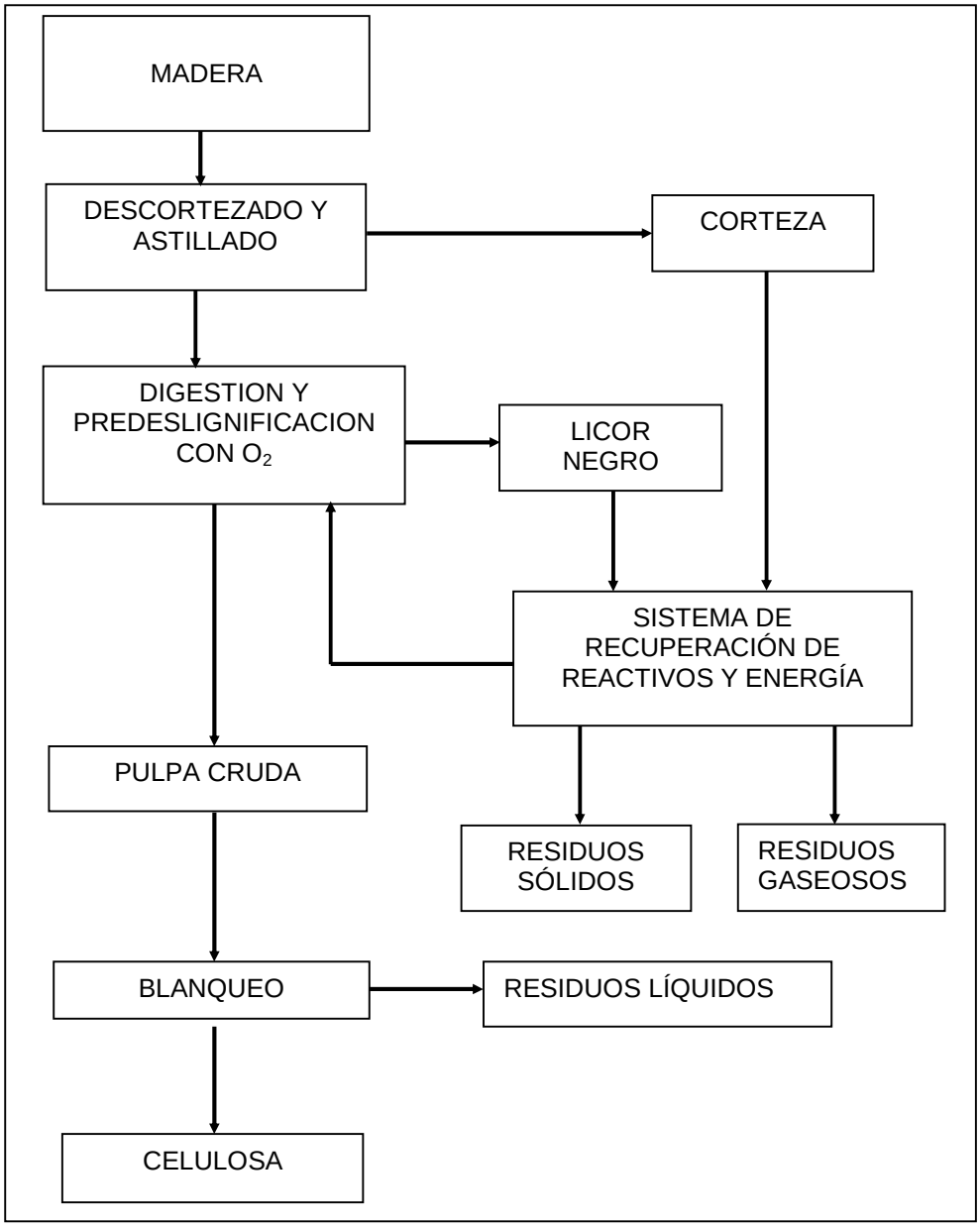



**FIGURA 4.6: PRODUCCIÓN DE CELULOSA BLANCA. PROCESO KRAFT**

### 4.5.3) Refinación de Petróleo

En Chile, la industria de refinación del petróleo procesa cerca 11 millones de $m^3$ de crudo al año, dando origen a un rango de combustibles (gasolina, kerosene, diesel, fuel oil). Además, se produce compuestos orgánicos (ej.: etileno) para la producción de polímeros sintéticos. En los últimos años, se ha desarrollado la producción de metanol a partir de gas natural.

La materia prima básica de una refinería es el petróleo crudo y su composición química es muy variable, dependiendo de su origen. Los productos obtenidos normalmente incluyen:

- Gas de refinería (fuel gas).
- Etileno.
- Gas licuado (propano ($C_3H_8$) o butano ($C_4H_{10}$)).
- Parafina (kerosene).
- Gasolinas (nafta).
- Petróleo diesel (diesel oil).
- Petróleo combustible (fuel oil).

El proceso de refinación o separación de las diferentes fracciones de petróleo crudo en productos combustibles, se basa en las diferencias entre las temperaturas de ebullición de los distintos componentes. La Figura 4.7 muestra esquemáticamente el proceso de refinación de crudo: en una primera etapa, el petróleo es calentado a altas temperaturas y separado en una torre de destilación, a presión atmosférica, obteniéndose por el tope de la torre gases livianos (fuel gas), gas licuado (LPG), gasolina liviana (nafta liviana), gasolina pesada (nafta pesada), parafina (kerosene), petróleo diesel (diesel oil) y gas oil. Por el fondo de dicha torre se obtiene crudo reducido, que pasa a una torre de vacío, en la que se obtiene gas oil liviano y pesado (LCGO y HCGO) y un residuo o fondo de vacío (pitch). Las diferentes fracciones se tratan en distintas unidades donde se hidrogenan, se someten a ruptura térmica catalítica y se separan en diferentes tipos de productos.

Una refinería genera residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Los sólidos residuales incluyen:

- Los catalizadores agotados, proveniente del *cracking* catalítico. Este sólido es inocuo, representa un volumen bajo, y se puede utilizar como material de relleno.
- Las "borras" de los estanques de almacenamiento. Estos son lodos, correspondientes a hidrocarburos pesados que van quedando depositados al fondo de los estanques de almacenamiento de combustibles.

Los residuos líquidos incluyen aguas provenientes de:

- Aguas de enfriamiento.
- Aguas de proceso (del patio de bombas, drenaje de estanques, aguas ácidas de desorción, aguas aceitosas de zona de procesos y laboratorio).

Los efluentes deben ser tratados, utilizando sistemas de tratamiento primario (para retirar los sólidos, grasas, aceites e hidrocarburos residuales) y secundario (para eliminación de los compuestos orgánicos disueltos). La Tabla 4.8 resume los

valores típicos de residuos líquidos de refinería.

En el caso de los residuos gaseosos, la mayor parte de ellos proviene de la combustión de los hidrocarburos en los diferentes hornos y antorchas. Uno de los principales contaminantes gaseosos es el $SO_2$, que se genera debido a la oxidación de los compuestos azufrados presentes. La cantidad de $SO_2$ depende del contenido de azufre del crudo y de las especificaciones de los productos combustibles, así como de la eficiencia de los procesos de recuperación para la generación de sulfidrato de sodio o azufre elemental.

**TABLA 4.8: RESIDUOS LÍQUIDOS REFINERÍA**

| **RESIDUOS LÍQUIDOS** | |
|---|---|
| RIL de Proceso: | 1,3 $m^3/m^3$ crudo |
| Agua de Refrigeración: | 24 $m^3/ m^3$ crudo |
| **COMPOSICIÓN TÍPICA EFLUENTE FINAL COMBINADO** | |
| Temperatura | 28°C |
| pH | 7-8 |
| $DBO_5$ | 0,10 $kg/m^3$ crudo |
| DQO | 0,40 $kg/m^3$ crudo |
| TSS | 3,0 $kg/m^3$ crudo |
| Aceites | 0,05 $kg/m^3$ crudo |
| Fenoles | 0,002 $kg/m^3$ crudo |
| Amonio | 0,05 $kg/m^3$ crudo |
| Sulfuros | 0,01 $kg/m^3$ crudo |

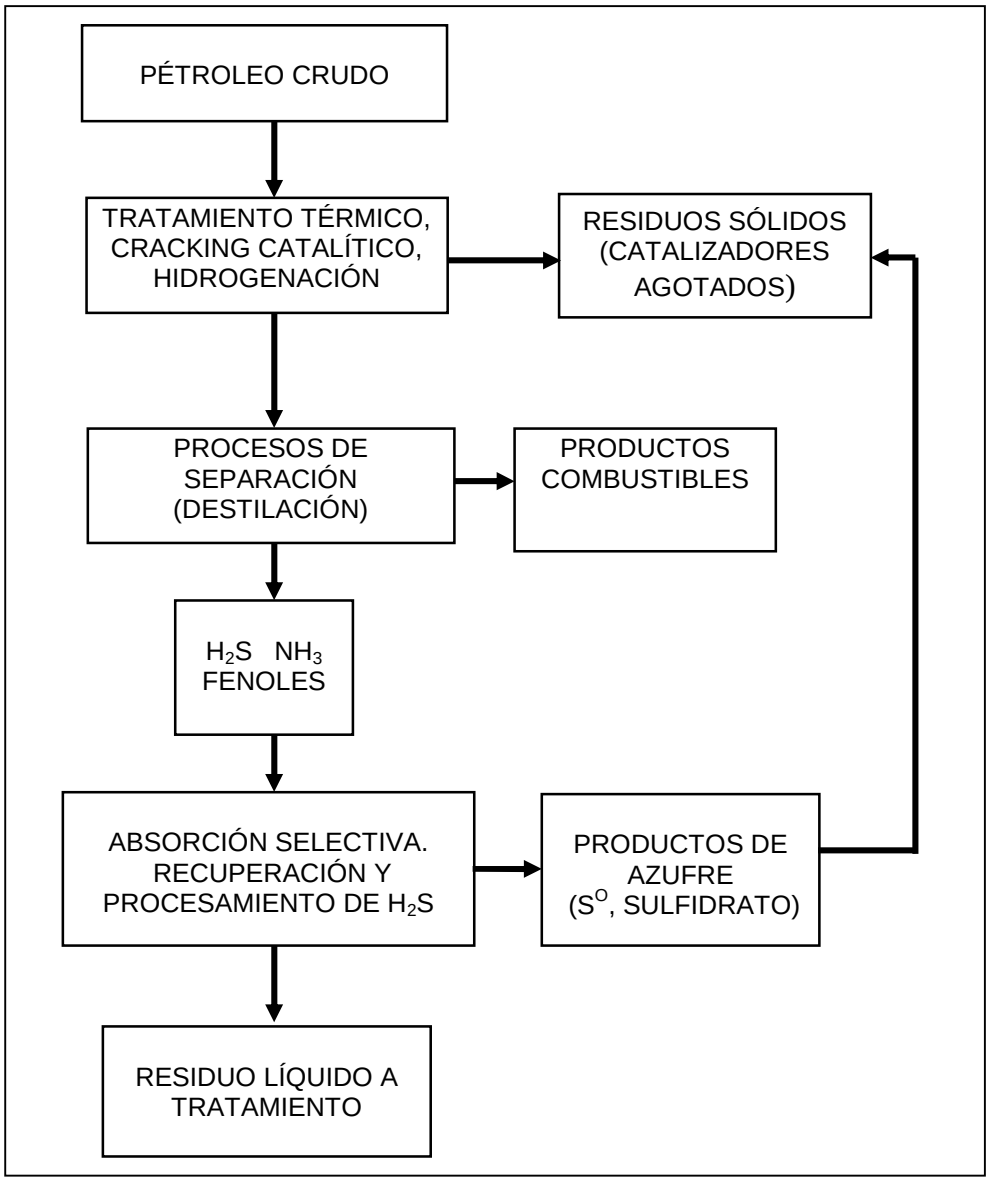



**FIGURA 4.7: REFINACIÓN DEL PÉTROLEO**

### 4.5.4) La Industria del Cobre

En los últimos años, la producción de cobre ha aumentado significativamente y se proyecta una producción de alrededor de 4 millones de toneladas anuales.

Los yacimientos de cobre se pueden clasificar en minerales oxidados y minerales sulfurados. Los óxidos de cobre, tales como la cuprita ($Cu_2O$) la malaquita ($CuCO_3$ $Cu(OH)_2$) y la crisocola ($CuSiO_3$ $2H_2O$), se encuentran generalmente en las capas superficiales. Por otra parte, los minerales sulfurados, como por ejemplo la calcocita ($Cu_2S$), la calcopirita ($CuFeS_2$), la covelita (CuS) y la bornita ($Cu_5FeS_4$), están presentes en las capas más profundas.

Los tipos de procesos, así como los residuos que se generan, dependen en gran medida del tipo de mineral procesado y del producto deseado. La mayor parte del cobre se extrae de minerales sulfurados.

Los óxidos son solubles en medio ácido y su procesamiento incluye, principalmente, operaciones hidrometalúrgicas. En el caso de los minerales oxidados, una de las innovaciones con mayor éxito en las últimas tres décadas ha sido la utilización del proceso SX-EW (lixiviación ácida, seguida de extracción con solvente y posterior *electrowinning*). Este proceso permite una adecuada recuperación de los reactivos. A su vez, el ácido sulfúrico utilizado en la lixiviación es un sub-producto de la electrólisis del cobre. Este proceso ha sido aplicado a minerales sulfurados, previo tratamiento para transformarlo en un compuesto soluble en ácido. Desgraciadamente, las opciones hidrometalúrgicas para el procesamiento de minerales de cobre dificultan la recuperación del oro, ya que éste permanece en el residuo sólido generado por la lixiviación ácida. Para disolverlo es necesario tratar el sólido con cianuro en medio alcalino, lo cual implica costos adicionales y nuevos requerimientos de control ambiental asociados a la utilización del cianuro.

Los minerales sulfurados insolubles en ácido son procesados por vías pirometalúrgicas. Las operaciones pirometalúrgicas típicas incluyen:

*Trituración y molienda:* Los minerales se reducen de tamaño para facilitar la separación de las diferentes fracciones minerales.

*Flotación:* Se separa por flotación selectiva el mineral de cobre de la mayor parte del material inerte, obteniéndose un concentrado con 20-30% de cobre.

*Tostación:* Los sulfuros son oxidados parcialmente a altas temperaturas (500-800ºC), generándose $SO_2$ y óxido de cobre. Esta operación se realiza en hornos (de reverbero o eléctricos).

*Fusión:* Se procesa el concentrado de cobre en presencia de un fundente (sílice) a temperaturas de alrededor de 1200ºC, generándose una fase de sulfuros de cobre y hierro líquidos (mata) y una fase sólida oxidada flotante (escoria). La mata contiene entre 30 y 55% de Cu.

*Conversión:* La mata líquida se oxida con aire a 110ºC, para remover el hierro y el

azufre, generando un cobre metálico (blister) con una pureza de 98%. Este proceso es exotérmico, siendo prácticamente autógeno.

*Refinación térmica:* Permite eliminar las impurezas de azufre, oxígeno y metales. En una primera fase, se agrega aire durante 1-2 hrs, para oxidar el azufre. Luego, se agrega metano, propano u otros hidrocarburos durante 3-4 hrs a 1100ºC, para reducir el contenido de oxígeno. Se puede obtener un cobre refinado de 99,5% de pureza.

*Refinación electrolítica:* La refinación electrolítica (0,2-0,3 V, 250 $V/m^2$) permite obtener un cobre refinado de 99,96% de pureza.

***Residuos generados en la Minería del Cobre***

La extracción, purificación y procesamiento de minerales implica la eliminación de compuestos no deseados que están presentes en la materia prima original. En el caso de la minería del cobre, ello significa eliminar hasta más del 99% en peso del material primario, dependiendo de la concentración del mineral y de los niveles de pureza final requeridos. Gran parte de dichos desechos corresponde a compuestos estables de poco impacto ambiental. Sin embargo, se pueden generar compuestos de azufre y metales pesados que afectan seriamente la salud y cuya emisión debe estar sujeta a estrictos controles.

La búsqueda de alternativas de procesos menos contaminantes ha dominado el escenario mundial de la investigación minera en las últimas dos décadas. Como consecuencia de ello, se ha implementado procesos que derivan en menores emisiones de $SO_2$, arsénico y otros metales pesados que puedan tener un impacto ambiental adverso.

En Chile, la industria del cobre procesa preferentemente minerales sulfurados, con un alto contenido de arsénico y, por lo tanto, la atención ha estado focalizada en las emisiones de compuestos de azufre, arsénico y otros metales. Estos elementos están presentes en la materia prima original y su generación como residuo, es intrínseca al proceso de refinación del producto. Por ejemplo, la enargita ($Cu_3\ AsS_4$) contiene 31% en peso de azufre y 19% de arsénico, mientras que la calcopirita ($CuFeS_2$) tiene un 35% de azufre.

En general, una parte importante de los residuos se elimina en fase sólida, en formas relativamente estables y de bajo impacto ambiental (ej.: ganga, escoria), con una considerable fracción de óxidos metálicos y sulfuros. A pesar del alto volumen que ellos representan (cerca de 100 ton por cada tonelada de cobre), su impacto ambiental está limitado al área local donde se efectúa el proceso de extracción y concentración. El material particulado emitido durante las operaciones de extracción y molienda puede tener efectos significativos si dichos procesos no son llevados a cabo en condiciones adecuadas.

A su vez, los efluentes provenientes de la flotación y otras operaciones hidrometalúrgicas, contienen iones metálicos (cobre, fierro, arsénico, molibdeno, manganeso, níquel, etc.) provenientes de los componentes solubles, cuyo impacto

depende de las concentraciones y del destino de dichos efluentes. Su descarga en cuerpos receptores que eventualmente sean fuente de agua potable, regadío o pesca (ej.: ríos, embalses, lagos, mar) debe ser evaluada críticamente, ya que dichos iones se caracterizan por ser altamente bioacumulables, con altos factores de bioconcentración en peces y productos vegetales.

Por su parte, los residuos gaseosos derivados de la industria del cobre provienen esencialmente de las operaciones pirometalúrgicas. Los componentes de mayor interés son los arsénicos volátiles, el dióxido de azufre y el material partículado. En el caso del $SO_2$, éste se genera en la oxidación del mineral sulfurado y en la combustión de materiales fósiles, constituyendo un problema ambiental crítico en la gran minería nacional, que se caracteriza por procesar mineral con alto contenido de azufre.

Por su parte, el arsénico es uno de los compuestos residuales de reconocida toxicidad y gran capacidad bioacumulativa, por lo cual ha atraído una considerable atención y control regulatorio. Su toxicidad es mayor cuando está como $As^{+3}$ y menor cuando se encuentra como organoarsénico. Parte del As ingerido (por vías oral o respiratoria) es metilizado y transformado en $(CH_3)_2AsO(OH)_2$, el cual es excretable.

Alrededor del 50% del arsénico original se emite a la atmósfera como $As_2O_3$ (el cual es volátil a 380ºC) durante las operaciones de pirometalurgia, mientras que el 30 % se descarga en los relaves en forma iónica.

Las tecnologías para purificación de minerales han sufrido importantes transformaciones en la última década, gracias a las consideraciones ambientales que han motivado dichas innovaciones. La Tabla 4.9 resume las diferentes alternativas para reducir las emisiones de $SO_2$ y As. En el caso de los contaminantes gaseosos (ej. $SO_2$, As volátil) interesa reducir la concentración y exposición en los puntos de máximo impacto y reducir la carga emitida (ton/día). Existen tecnologías establecidas para remover el azufre de las emisiones gaseosas (ej.: absorción alcalina, oxidación a sulfato), transfiriendo el azufre a fase líquida o sólida; además, se puede obtener $H_2SO_4$ para ser utilizado internamente o como subproducto. La implementación industrial de estos procesos puede estar limitada por factores termodinámicos y cinéticos, así como por el costo de las tecnologías y el tamaño de los mercados.

Por su parte, los procesos para reducir las emisiones de arsénico tienen como objetivo general, transformar el As en un sólido de mayor estabilidad y, preferentemente, con potencial comercial. Sin embargo, el mercado del arsénico es relativamente pequeño, llegando a 58.000 ton $As_2O_3$ /año a nivel mundial (comparado con un volumen mundial total de residuos de As del orden de 150.000 ton/año).

En general, los iones metálicos pueden ser eliminados de los efluentes líquidos vía adsorción, precipitación o microfiltración; sin embargo, ello implica trasladar de fase el contaminante, generando un nuevo problema ambiental. La recuperación de los iones metálicos podría ser atractiva, solamente cuando estos tuvieran valor comercial potencial o cuando el costo asociado con su evacuación, fuese mayor

que el costo de transformarlos a una forma más estable y de menor impacto.

**TABLA 4.9: REDUCCIÓN DE EMISIONES DE $SO_2$ Y ARSÉNICO EN LA INDUSTRIA DEL COBRE**

| **OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE $SO_2$** | |
|---|---|
| Conversión a productos comerciales: | • Producción de $H_2SO_4$ a partir de $SO_2$<br>• Reducción a azufre elemental |
| Conversión a Sólidos Inertes y Estables: | • Conversión a sulfatos insolubles: formación de $CaSO_4$ por medio de adición de CaO durante la tostación<br>• Conversión a sulfuros (ej. FeS, $Fe_2S_3$, CaS) Proceso carbotérmico (reducción del Cu en presencia de C y CaO) |
| Reducir el S del Concentrado | • Optimización del proceso de flotación |
| Reducir el Flujo de Gas | • Uso de aire enriquecido con $O_2$ puro: aumenta la concentración de $SO_2$ para un procesamiento posterior más eficiente.<br>• Reducir las fuentes de $SO_2$ : combinar tostación, fundición y conversión. |
| Tratamiento de las Emisiones Gaseosas: | • Absorción alcalina<br>• Adsorción en limonita |
| **OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE ARSÉNICO** | |
| Optimizar las condiciones en tostación/conversión | • Tostación en presencia de CaO (forma $Ca_3(AsO_3)_2$) |
| Precipitación del As en solución | • Formación de arsenato férrico<br>• Formación de arsenito de calcio |
| Remoción del As de los gases | • Precipitación térmica de $As_2O_3$<br>• Adsorción/absorción<br>• Filtración, precipitación electrostática |

**BIBLIOGRAFÍA**


Austin G.T. “Manual de Procesos Químicos en la Industria”. McGraw-Hill (Interamericana de México SA). México (1992)

Davis M., Cornwell D. “Introduction to Environmental Engineering”. 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)

De Nevers N. “Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire”. McGraw-Hill, México (1998)

Nemerow N. L., Dasgupta A. “Industrial and Hazardous Waste Treatment” Van Nostrand Reinhold. New York (1991)

Springer A.M. “Industrial and Environmental Control: Pulp and Paper Industry” 2ªed., TAPPI Press, Atlanta (1993).

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. “Gestión Integral de Residuos Sólidos”. Vol. I y II., McGraw Hill, Madrid (1994).

Young. R., “Handbook of air pollution analysis”, J. Wiley & Sons, New York.(1997).

Wark, K. “Contaminación del aire Origen y Control”. Ed. Limusa. México (1992)

# CAPÍTULO 5

# TRATAMIENTO DE RESIDUOS

El primer objetivo de una estrategia de control ambiental en la industria de procesos es prevenir o reducir la generación de los contaminantes en su fuente, tal como se detalla en el Capítulo 6. Sin embargo, en la práctica, las limitaciones tecnológicas y las restricciones impuestas por los procesos mismos hace casi inevitable la generación de residuos de producción, los cuales deben ser tratados antes de su descarga a los medios receptores.

Las tecnologías de tratamiento de residuos tienen como objetivo disminuir el impacto ambiental de dichas descargas, y generar residuos finales que cumplan con los flujos y concentraciones de contaminantes estipulados en la legislación vigente, o en las políticas de la empresa. En este capítulo, se revisará en forma general los principales procesos de tratamiento de los residuos líquidos, sólidos y gaseosos. En primer lugar, se describe los mecanismos generales presentes en los sistemas de tratamiento de residuos y las consideraciones que se debe tener presentes en la selección de las operaciones unitarias.

## 5.1) MECANISMOS PRESENTES EN LOS TRATAMIENTOS DE RESIDUOS

En general, los tratamientos de residuos se basan en alguno(s) de los siguientes mecanismos:

- **Eliminación física del contaminante**

A través de operaciones de separación, tales como: filtración, sedimentación, adsorción, absorción, extracción, etc..

- **Destrucción o transformación química/biológica del contaminante**

Transformando el contaminante a una forma menos contaminante y/o eliminable de la corriente de descarga. Por ejemplo, a través de un tratamiento aeróbico, combustión del material orgánico, transformación de óxido de azufre a sulfato, etc..

- **Consumo del material contaminante**

Ya sea recuperando y reciclando compuestos reutilizables o generando nuevos sub-productos (ej.: digestión anaeróbica (metano), fertilizantes, combustibles (sólidos), etc.).

Muchas veces los procesos de tratamiento, simplemente cambian la fase en la que se encuentra presente el contaminante, con lo que el problema ambiental puede persistir (ej.: la adsorción de fenoles en carbón activado; en este caso se traslada el problema, a uno de contaminación en fase sólida). A veces, dicho cambio de fase

permite un mejor manejo del material contaminante, disminuyendo su impacto final. Tal es el caso de los tratamientos aeróbicos, donde los compuestos orgánicos disueltos en el efluente son utilizados en los procesos de metabolismo celular e incorporados a la biomasa, la cual puede ser separada y desechada con mayor facilidad. De este modo, el tratamiento sirve como una etapa de concentración de los residuos.

- **Criterios de Selección de Operaciones Unitarias para el Tratamiento de Residuos**

Existe una amplísima gama de tecnologías que sirven para la remoción, destrucción, transformación o utilización de residuos. La Tabla 5.1 muestra una lista de procesos disponibles para la remoción de contaminantes específicos. Casi todas estas operaciones son operaciones unitarias, que están establecidas en la industria de procesos.

La selección de las operaciones unitarias que se requiere incluir en un sistema de tratamiento depende de factores tanto técnicos como económicos. A continuación, se enumera algunos aspectos que deben ser tomados en consideración:

- Tipo de contaminante a eliminar.
- Características del medio receptor (alcantarillado público, aguas superficiales, aguas subterráneas, características de ventilación atmosférica, etc.).
- Normativa legal aplicable.
- Eficiencia de depuración requerida.
- Presencia de otros contaminantes que puedan afectar el tratamiento (ej.: efectos inhibitorios debido a compuestos tóxicos).
- Generación de residuos secundarios; por ejemplo: lodos de tratamiento primario y secundario.
- Requerimientos de tratamiento para los residuos secundarios.
- Cambio de fase de contaminantes peligrosos (ej.: adsorción de metales pesados a los lodos biológicos en el tratamiento secundario).
- Características ambientales del área de la planta (es decir, cercanía de poblaciones, dirección de los vientos predominantes, características climáticas).
- Datos sobre la cinética de los procesos: si no se cuenta con datos propios, se debe utilizar información de literatura o de otras plantas industriales similares.
- Requerimientos energéticos y aditivos químicos.
- Requerimientos de terreno para la instalación de las unidades de tratamiento.
- Complejidad y confiabilidad del sistema de tratamiento.
- Requerimientos de monitoreo y control automático.
- Cantidad y tipo de personal.
- Estabilidad operacional frente a cambios de caudal y concentración.
- Requerimientos de mantención periódica.
- Respuesta frente a parada de planta.
- Tiempo y recursos requeridos para la puesta en marcha (importante para el caso de los sistemas de tratamiento biológicos, donde se necesita generar una gran cantidad de biomasa activa).

La mayoría de las operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de residuos se encuentra ampliamente documentada en la literatura técnica especializada, y se sugiere consultar los textos de Metcalf-Eddy (1991), Ramalho (1983), Kelly (1998), Perry & Green (1998), entre otros, citados en lista de referencias recomendadas.

Generalmente, los diseños se basan en las condiciones de operación promedio, correspondientes a un día típico. Sin embargo, es importante tomar en consideración las variaciones horarias de flujo, particularmente para diseñar los sistemas de impulsión y cañerías, y las operaciones que requieren cortos tiempos de residencia. En el caso de plantas que presenten variaciones estacionales en sus características de producción, y que generen residuos con diferencias muy significativas de flujo y cargas contaminantes, se deberá evaluar la factibilidad de que los requerimientos de depuración puedan ser cubiertos por un sistema de tratamiento único o, alternativamente, incorporar unidades adicionales para cubrir aquellas condiciones de operación extremas.

Una buena base de información sobre las características de los residuos a tratar, debería incluir las proyecciones de aumento (o disminución) de flujo y carga contaminante, debido a posibles ampliaciones de la planta, o modificaciones importantes en los procesos. Cuando se trate de diseñar sistemas de tratamiento para plantas industriales que aún no están en operación, se debe contar con información histórica sobre instalaciones similares. Mientras más completa sea la información con que se cuenta para el diseño del sistema de tratamiento, más acertado será el dimensionamiento de las unidades.

Finalmente, se debe enfatizar que la segregación racional de las distintas líneas residuales facilita el diseño de sistemas de tratamiento de mayor eficiencia y menor costo. Para ello, se debe contar con una completa caracterización de cada línea.

A continuación, se entrega antecedentes generales, con vistas a apoyar el dimensionamiento preliminar de los diferentes sistemas.

**TABLA 5.1: OPERACIONES PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES**

**Contaminante: Grasas y Aceites Libres y Emulsificados:**
Separación por Gravedad
Filtración
Flotación

**Contaminante: Sólidos Suspendidos:**
Sedimentación
Coagulación y Sedimentación
Flotación
Filtración

**Contaminante: Materia Orgánica Disuelta:**
Tratamiento Biológico Aeróbico
Tratamiento Biológico Anaeróbico
Adsorción
Oxidación Química

**Contaminante: Sólidos Inorgánicos Disueltos:**
Evaporación
Intercambio Iónico
Osmósis Reversa
Electrodiálisis

**Contaminante: Ácidos y Álcalis:**
Neutralización

**Contaminante: Gases y Material Particulado:**
Incineración
Absorción
Ciclones
Precipitación Electrostática

**Contaminante: Residuos Sólidos y Lodos de Tratamientos:**
Tratamiento biológico
Incineración
Vertederos controlados
Compostado/ Fertilizante/ Forraje
Utilización Termoquímica (Carbón Activado, Licuefacción, Gasificación)

**TABLA 5.2: DATOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS**

| | | |
|---|---|---|
| **SISTEMAS DE SEPARACION DE SOLIDOS** | | |
| **Sedimentación**: | | |
| Tiempo de Residencia: 2-4 hrs | Remoción de Sólidos: | 50-98% |
| | Remoción de $DBO_5$[1]: | 10-30% |
| **Flotación:** | | |
| Tiempo de Residencia: 5-30 min. | Remoción de Sólidos: | 75-98% |
| | Remoción de $DBO_5$: | 10-30% |
| **SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLOGICO:** | | |
| **Lagunas Facultativas:** | | |
| Tiempo de Residencia: 10-25 días | Remoción de $DBO_5$: | 60-75% |
| **Filtros Biológicos**: | | |
| Tiempo de Residencia: 0,4-2 días | Remoción de $DBO_5$: | 60-85% |
| **Lagunas de Aireación:** | | |
| Tiempo de Residencia: 3-7 días | Remoción de $DBO_5$: | 70-97% |
| **Lodos Activados**: | | |
| Tiempo de Residencia: 0,3-2 días | Remoción de $DBO_5$: | 70-97% |
| **Digestión Anaerobia**: | | |
| Tiempo de Residencia: 0,5-3 días | Remoción de $DBO_5$: | 30-90% |
| **OTROS DATOS:** | | |
| **SISTEMAS AIREADOS:** | | |
| Requerimientos de Energía | 1-3 kg $O_2$ / kWh | |
| Requerimientos de Oxígeno: | 1, 1-1,6 kg $O_2$ / kg $DBO_5$ removido | |
| Generación de Lodos | 0,3-0,6 kg lodos / kg $DBO_5$ removido | |
| **DIGESTION ANAERÓBICA:** | | |
| Generación de Metano: | 0,35 $m^3$ $CH_4$ / kg $DBO_5$ removido | |
| Generación de Lodos | 0,05-0,15 kg lodos / kg $DBO_5$ removido | |

[1] $DBO_5$: demanda biológica de oxígeno en 5 días.

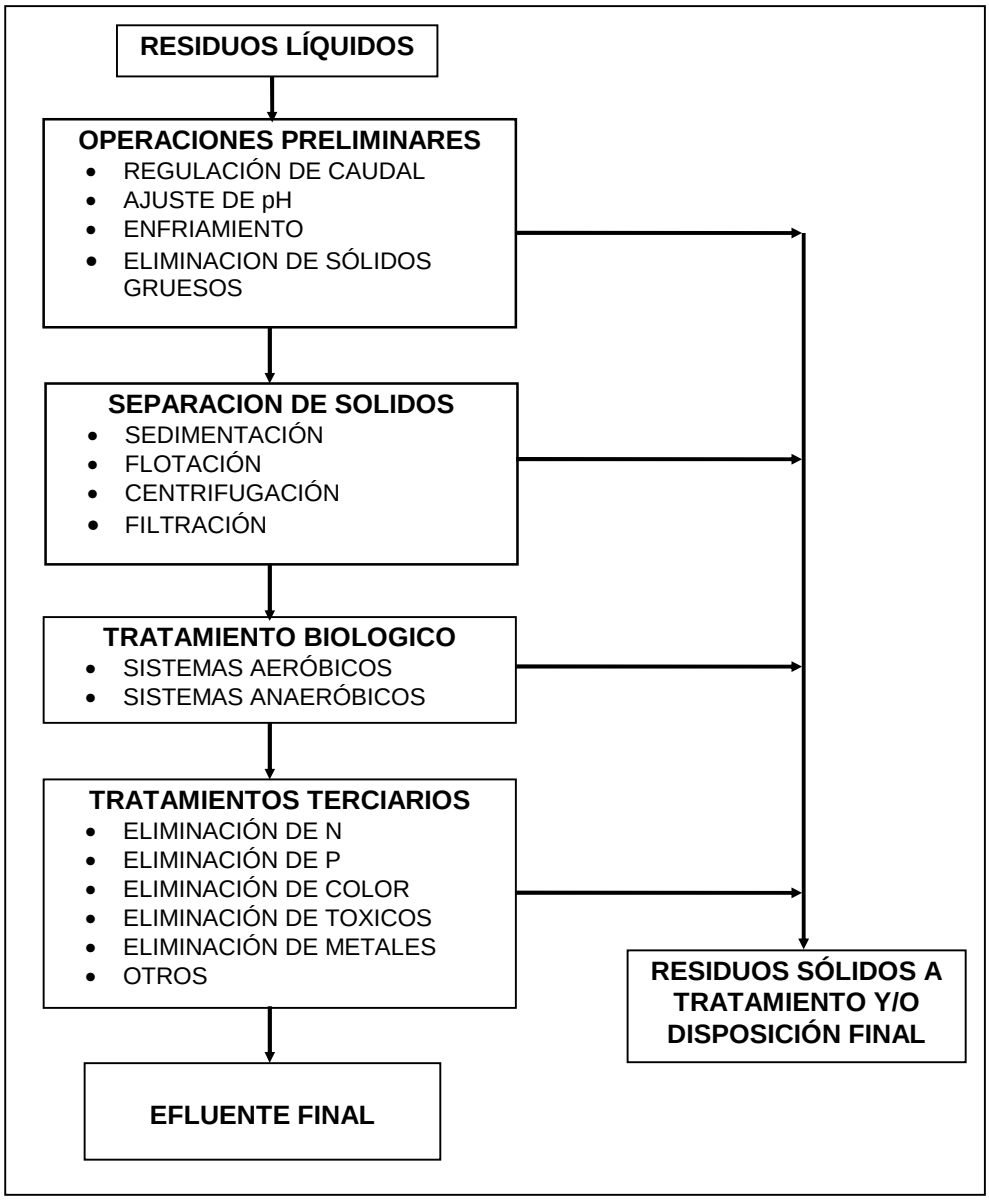



**FIGURA 5.1: SISTEMA TÍPICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS**

## 5.2) TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS

Los sistemas de tratamiento de uso frecuente para residuos líquidos se presentan en la Tabla 5.2, donde se incluyen algunas características operacionales y de diseño básicas. La Figura 5.1 presenta esquemáticamente la secuencia de tratamientos para un sistema convencional de depuración de residuos líquidos.

### 5.2.1) Tratamiento primario

La primera etapa de un sistema de tratamiento de residuos líquidos incluye normalmente, la separación de sólidos y material no disuelto (ej.: grasas, coloides), neutralización de pH, regulación de caudal y estabilización térmica.

La variedad de sistemas disponibles comercialmente es muy amplia para una completa revisión aquí. Los sólidos más gruesos se eliminan a través de cribaje, mientras que aquellos de menor tamaño se eliminan usando mecanismos de sedimentación o flotación. Los principios básicos se revisan a continuación. Primeramente, será necesario neutralizar y estabilizar el flujo y composición del efluente.

#### 5.2.1.1) Neutralización y Regulación de Caudal

**Neutralización de pH**

Se aplica cuando el efluente tiene un pH fuera de los límites aceptables. Normalmente, se usan ácidos (o bases) para llevar el pH a un rango cercano a 7. En aquellos casos donde existan líneas ácidas y básicas de concentraciones similares, será posible neutralizarlas mezclándolas con anterioridad al tratamiento primario.

En la actualidad, se usa sistemas automáticos de control de pH, los que permiten una buena regulación del pH frente a cambios de carga y flujo.

El diseño de los tanques de neutralización es muy sencillo, y no presenta mayores problemas de ingeniería, dado que la reacción de neutralización química es muy rápida. Normalmente, la neutralización y la estabilización de flujo se efectúan en el mismo tanque.

**Estabilización de Flujo**

Normalmente, el flujo y composición de los residuos líquidos presenta enormes variaciones durante la operación rutinaria de la planta, reflejando diferentes operaciones que tienen lugar durante el proceso (ej.: lavado de los reactores). Ello puede presentar serios problemas, particularmente para las operaciones de tratamiento secundario, que se caracterizan por ser procesos muy lentos, cuya eficiencia es muy sensible a las variaciones de flujo y concentración.

Para garantizar un flujo y carga lo más constante posibles se puede usar un tanque de almacenamiento (homogeneizador), con un tiempo de residencia lo

suficientemente largo como para amortiguar las variaciones. El tiempo de residencia (normalmente, entre 4 y 24 horas) está determinado por las características de operación de la planta, la biodegradabilidad del material orgánico y el tipo de tratamiento secundario.

Un tiempo de residencia muy largo, implicará un tanque de mayor volumen (es decir, mayor costo), y puede dar lugar a crecimiento microbiano, malos olores, etc.. Cuando se trate de volúmenes de líquido muy grandes (ej.: miles de $m^3$), se puede usar lagunas de estabilización.

La segregación de las líneas residuales de mayor contenido orgánico (que requieren de tratamiento secundario) puede resultar en una substancial disminución del flujo, con la consiguiente reducción del volumen del tanque de retención.

#### 5.2.1.2) Eliminación de Sólidos Gruesos

Los sólidos gruesos flotantes (ej.: astillas, corteza), pueden ser eliminados a través de cribas o tamices. Se debe especificar la anchura del canal y de las barras de la criba, sobre la base de la velocidad requerida para evitar la sedimentación de los sólidos. Dicha velocidad de flujo a través de la criba debe exceder 0,5 m/s, lo cual requiere de una adecuada selección de la anchura del canal. Los sólidos son removidos mecánicamente (dragas), en forma continua.

La ecuación de diseño es:

$$W = \frac{b\,F}{v\,H}$$

donde:

*W* = ancho del canal (m)
*F* = flujo ($m^3$/s)
*v* = velocidad a través de las barras (m/s)
*H* = profundidad del canal (m)
*b* = factor empírico:
2,0 para espaciamientos de 12 mm;
1,7 para espaciamientos de 18 mm;
1,5 para espaciamientos de 24 mm.

Las arenas y gravas se deben eliminar para evitar la abrasión. Un desarenador bien diseñado debe remover al menos 95% de las partículas con diámetro mayor de 0,2 mm. Para evitar la eliminación de materia orgánica, que puede producir descomposición posterior, se usa una velocidad de 0,3 (m/s), que permite eliminar los sólidos inorgánicos, pero no los orgánicos.

Otros diseños incluyen desarenadores aireados, donde el aire produce corrientes suaves que impiden la sedimentación de materia orgánica, pero no de la inorgánica.

### 5.2.1.3) Sedimentación Primaria

Se debe retirar los sólidos suspendidos (0,05-10 mm en diámetro), cuando estos están presentes en gran cantidad. No es esencial removerlos antes del tratamiento biológico, pero su separación física (primaria), puede conducir a la eliminación de un 30-40% de DBO (dependiendo de la biodegradabilidad de los sólidos).

Así, se puede reducir la carga orgánica para el tratamiento biológico, y reducir la cantidad de lodos biológicos generados. La sedimentación es, por lo tanto, el proceso de tratamiento de aguas más usado.

**Tipos de tanques de sedimentación**

Un tanque ideal debe tener 4 características:

- La zona de entrada debe facilitar la reducción y uniformización de la velocidad del efluente.
- Un canal de salida, para captar el líquido clarificado, con trampas para el material flotante (ej.: aceites).
- Una zona de sedimentación que representa la capacidad del tanque. En esta zona tiene lugar la sedimentación, y no debe presentar cortocircuitos o áreas estancadas.
- Una zona de almacenamiento y eliminación de los sedimentos.

Existen 3 tipos de diseños:

- ***Tanques de flujo horizontal:*** Normalmente son rectangulares (L:A=4:1). Tienen la alimentación por uno de los extremos y la salida por el extremo opuesto.
- ***Tanques de flujo radial:*** De forma circular, con alimentación en el centro, fluyendo hacia el exterior radialmente. La velocidad es más alta al centro, y disminuye hacia la periferia.
- ***Tanques de flujo ascendente:*** Ya sea de forma circular o cuadrada, con un suelo de pendiente fuerte. La alimentación se hace desde el centro del tanque, bajo la superficie, hacia abajo. Debido a la configuración del fondo, el flujo cambia de dirección bruscamente hacia arriba, y los sólidos sedimentan cerca de la periferia. Son muy eficientes.

**Algunos principios generales**

La sedimentación ocurre debido a la acción de la gravedad. El tamaño y la densidad de las partículas son factores importantes en el resultado final de la operación. Algunas partículas mantendrán su identidad durante la sedimentación (discretas), mientras que otras van a flocular (partículas floculantes). En general, la velocidad de sedimentación de partículas, es directamente proporcional al cuadrado del radio, y a la diferencia de densidad entre el sólido y el líquido.

La sedimentación de partículas, se describe convencionalmente a partir de la ecuación de Stokes, la que cuantifica los factores que afectan la velocidad de sedimentación en un líquido quieto:

$$Q = \frac{2 g r^2}{9 \mu} (\rho_1 - \rho_2)$$

donde:

Q = velocidad de sedimentación (m/s),
*r* = radio de la partícula (m)
$\mu$ = viscosidad del fluido (N s/m$^2$)
$\rho_1$ = densidad del sólido (kg/m$^3$)
$\rho_2$ = densidad del fluido (kg/m$^3$)

Esta ecuación no se puede aplicar directamente al diseño de sedimentadores, debido a que ni el diámetro ni la densidad de las partículas se pueden predecir con precisión. Más aún, algunas partículas son irregulares, mientras que otras tienden a aglomerarse o flocular, y a sedimentar más rápidamente, en la medida que la sedimentación progresa.

Existen diferentes tipos de sedimentación:

- Sedimentación Tipo 1: partículas discretas (ej.: sedimentación de arenas y gravas).
- Sedimentación Tipo 2: partículas floculantes sin interacción (ej.: sedimentación primaria).
- Sedimentación Tipo 3: partículas floculadas que interactúan debido a la alta concentración de flóculos. (ej.: sedimentación de lodos biológicos).
- Sedimentación Tipo 4: en este caso existe una alta concentración de partículas, que forman una estructura estable. La sedimentación ocurre debido a la compresión que ejercen las partículas que se agregan a la parte superior de la estructura.

En la sedimentación tipo I, el área del tanque de sedimentación es más importante que la profundidad, ya que la velocidad ascendente está determinada por el área del tanque y el flujo.

La velocidad de sedimentación Q está dada por:

$$Q = \frac{F}{A}$$

donde:

*Q* = es la velocidad de sedimentación(m$^3$ m$^{-2}$ día$^{-1}$), conocida como la velocidad de carga superficial
*A* = es el área superficial del tanque (m$^2$).
*F* = es el flujo volumétrico de afluente (m$^3$/día).

Para dimensionamiento preliminar se puede usar Q = 30-50 (m$^3$ m$^{-2}$ día$^{-1}$).

En el caso de lo sedimentadores circulares, el flujo de líquido clarificado por unidad de perímetro del sedimentador, $Q_P$, es un parámetro importante, cuyo valor de diseño

debería mantenerse inferior a 220 ($m^3$ $m^{-1}$ $día^{-1}$). Las dimensiones del sedimentador deben satisfacer ambos criterios de diseño. Se puede demostrar que el diámetro de sedimentador que satisface ambos criterios es:

$$d = \frac{4Q_P}{Q}$$

Para flujos mayores de 9.000 ($m^3$/día), el diámetro (*d*) de los sedimentadores es del orden de 30-35 m. El número de unidades de sedimentación, N, se estima a partir de:

$$N = \frac{4F}{Q\pi d^2}$$

La profundidad del tanque está determinada por el tiempo de residencia necesario para permitir la sedimentación de la partícula más pequeña. Típicos valores de tiempos de residencia, están en el rango 1 a 4 horas; mientras mayor la concentración de sólidos, mayor el tiempo de residencia necesario. El tiempo de residencia determinado en experimentos de laboratorio se multiplica por un factor de seguridad de 1,5 o 2 (y se reduce la velocidad de carga superficial por 1,25-1,75), para compensar por las corrientes convectivas debidas a gradientes de temperatura, composición variable, efectos hidráulicos, etc.

Se pueden generar malos olores debido a la descomposición anaeróbica de los sólidos sedimentados si el tiempo de residencia es innecesariamente largo.

En el caso de tanques rectangulares, la relación entre longitud y profundidad es 12:1 (para longitudes menores de 90 m), mientras que la relación entre longitud y anchura es 4:1.

| | |
|---|---|
| Profundidad máxima | = 5 m |
| Tiempo de retención | = 1,5-2 h a flujo max. |
| Número mínimo de tanques | = 2 (uno se limpia, mientras el otro opera). |

Los tanques de flujo radial (circulares), normalmente tienen sistemas continuos de recolección y eliminación de lodos (ver Figura 5.2).

Se puede agregar compuestos químicos que ayuden a la sedimentación, tales como agentes precipitantes, coagulantes y floculantes. Los más usados son: $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, $Na_2SO_4$, $FeSO_4$, poliacrilamida, gelatina, almidón. Estos agentes se utilizan en concentraciones en el rango 5-1000 $g/m^3$.

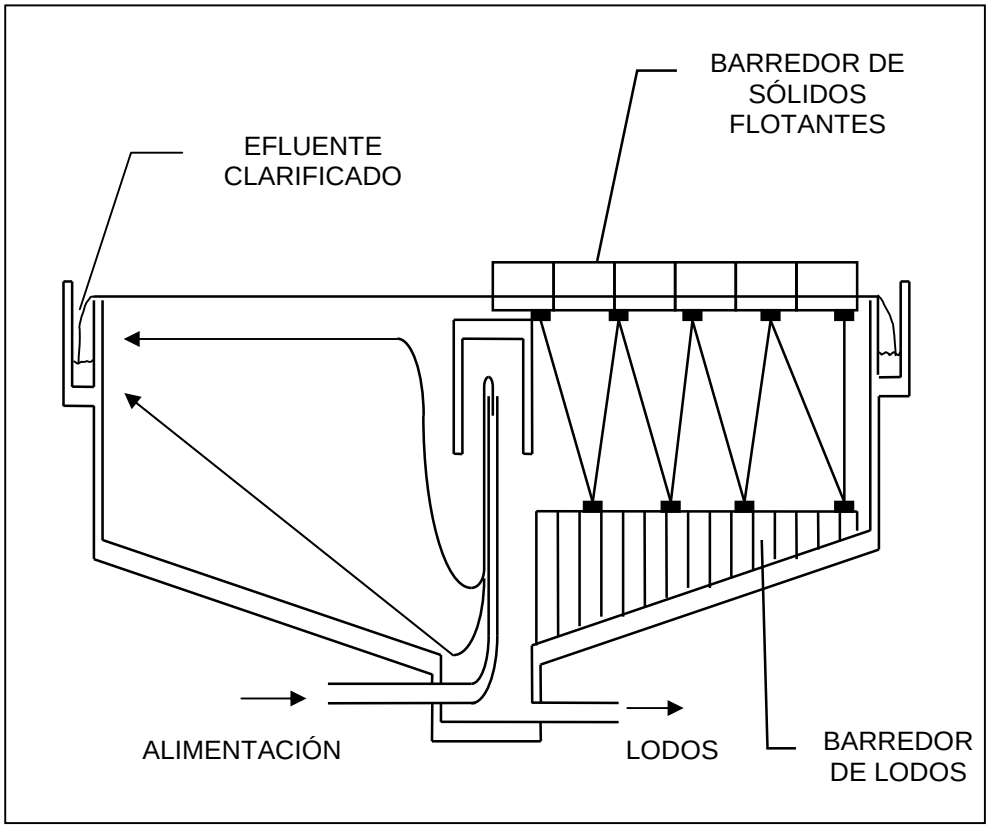



**FIGURA 5.2: TANQUE DE SEDIMENTACIÓN CIRCULAR, DE FLUJO RADIAL**

### 5.2.1.4) Flotación

La flotación se usa para eliminar sólidos y material no disuelto agregando burbujas de aire para lograr una densidad aparente menor que la del líquido. También se utiliza para concentrar los lodos.

**Flotación con aire disuelto (FAD)**

Al agregar aire bajo presión, se forman millones de microburbujas (diámetro 0,02-0,1 mm) que se meten dentro de los flóculos, o se nuclean alrededor de los sólidos suspendidos, o quedan atrapadas en los flóculos durante su formación (especialmente cuando se agregan agentes coagulantes o floculantes). La densidad aparente del conglomerado disminuye, y flota en la superficie.

En algunos diseños, el aire sólo se agrega a una parte de la alimentación; en otros casos, se recicla parte del efluente clarificado, al que se le agrega el aire comprimido. Las principales variables de diseño son: presión, razón de reciclo, tiempo de retención, concentración de sólidos en la alimentación. Ya que la flotación depende del tipo de superficie del material particulado, los parámetros de diseño deben ser obtenidos a partir de datos de laboratorio específicos para el agua residual a tratar. En particular, el volumen de aire por unidad de masa de sólidos, debe ser determinada en base a experimentos, utilizando una celda de flotación. La relación aire:sólidos en sistemas sin reciclo se puede determinar a partir de la expresión:

$$aire : sólidos \quad = \quad \frac{s_A\,(0{,}5P-1)}{S} \qquad (\text{m}^3 \text{ aire / kg sólidos})$$

donde:

$s_A$ = solubilidad del aire (a 20ºC: 0,024 (kg aire / $m^3$ agua))
$P$ = presión absoluta del aire (atm)
$S$ = concentración de sólidos en el líquido (kg/$m^3$)

Una relación aire:sólidos típica, es del orden de 0,01 ($m^3$ aire / kg sólidos). En general, se usan presiones de 5 a 6 atm. En el caso de reciclo, se usa un reciclo del 25-60%.

El área de flotación se determina en base a la velocidad de ascenso de los sólidos:

$$A \quad = \quad \frac{F}{Q_F}$$

donde:

$A$ = es el área superficial del tanque ($m^2$).
$Q_F$ = es la velocidad de flotación ($m^3m^{-2}día^{-1}$).
$F$ = es el caudal del efluente ($m^3día^{-1}$)

La velocidad de flotación varía ampliamente, dependiendo de la concentración de sólidos (11 – 220 ($m^3m^{-2}día^{-1}$)). Para fines de dimensionamiento preliminar, se

puede utilizar un valor de $Q_F$ de 100 ($m^3m^{-2}día^{-1}$ ). El tiempo de retención en la unidad de flotación está dentro del rango 5 - 30 minutos.

La flotación es muy usada en la separación y recuperación de fibra celulósica, grasas, carbohidratos y proteínas. Presenta menos riesgo de malos olores, ya que la aireación evita la descomposición anaeróbica del material biodegradable.

**Electroflotación**

El equipo consiste en un tanque (que actúa como cátodo) y varios ánodos. Se aplica directamente una corriente, usando un voltaje de 10-15 volt. Los cationes formados en el cátodo neutralizan las cargas negativas de las partículas, las que coagulan y luego son flotadas por las microburbujas formadas electrolíticamente. La carga eléctrica de las substancias coloidales y emulsificadas de origen industrial es generalmente negativa. El proceso de electroflotación neutraliza eléctricamente las cargas de las partículas, las que pueden flocular y ser llevadas a la superficie por microburbujas de oxígeno e hidrógeno que se forman por acción electrolítica.

Permite tratar aguas con concentraciones de sólidos flotantes de 9-12%, comparados con 3-5% en el caso de la FAD, sin que se requieren agentes floculantes, ni reciclo. Sin embargo, pueden existir problemas de corrosión en el ánodo.

Típicamente, el tiempo de residencia en la electroflotación está en el rango 7-12 min, con un consumo de electricidad estimado en 0.5 kWh/$m^3$. El tamaño típico de una unidad de electroflotación permite tratar un flujo de 3000 $m^3$/día.

### 5.2.2) Tratamiento secundario

El material orgánico solubilizado o en estado coloidal, puede ser utilizado como fuente de carbono por parte de microorganismos existentes en el medio, transformándolos en subproductos volátiles y en componentes celulares. A su vez, las células microscópicas pueden ser separadas del efluente, utilizando técnicas de separación sólido/líquido.

Estos principios son utilizados en los sistemas de tratamiento biológico de efluentes contaminados con material orgánico bioutilizable. Las diferencias entre los diferentes procesos, se manifiestan en el tipo de microorganismos utilizados, la configuración de los biorreactores, su modo de operación y el tipo de actividad biológica presente.

En estos sistemas, los contaminantes orgánicos son degradados por organismos que los transforman en compuestos más sencillos, de fácil eliminación (ej.: $CO_2$, $CH_4$) o incorporados al proceso de síntesis de material celular y, por lo tanto, concentrados en la biomasa. Esta última puede entonces ser eliminada con más facilidad por procesos de separación sólido-líquido.

Los microorganismos juegan un papel fundamental en los sistemas de tratamiento de residuos líquidos. Algunos antecedentes básicos se presentaron en los capítulos

iniciales. En términos generales, los microorganismos heterótrofos necesitan carbono, nitrógeno, fósforo y trazas de metales para llevar a cabo las reacciones metabólicas y reproducirse. Dichos microorganismos se clasifican en **aeróbicos** *y* **anaerobicos**:

- **Organismos Aeróbicos***:* Son aquellos que requieren oxígeno para llevar a cabo sus reacciones metabólicas. Generan $CO_2$ como subproducto.
- **Organismos Anaeróbicos***:* Son aquellos que crecen en ausencia de oxígeno. Generan $CO_2$, $CH_4$ y compuestos orgánicos de bajo peso molecular como subproductos.
- Aquellos organismos aeróbicos y anaeróbicos que sólo pueden sobrevivir en su respectivo ambiente (es decir, en presencia y ausencia de oxígeno, respectivamente), se denominan **organismos aeróbicos obligados** *y* **organismos anaeróbicos obligados***,* respectivamente.
- Los organismos que pueden sobrevivir en ambos ambientes se denominan **organismos facultativos**.

Antes de abordar la descripción de los sistemas de tratamiento de residuos líquidos, basados en la acción de los microorganismos, es conveniente revisar algunos conceptos básicos sobre el dimensionamiento de reactores y los métodos utilizados para determinar la concentración de material orgánico disuelto en las aguas residuales.

**a) Dimensionamiento de Biorreactores**

El volumen de reactor y el tiempo de residencia requeridos para completar la degradación biológica de los contaminantes orgánicos se estiman a partir de un balance de masa y de la cinética del proceso. En general, el balance de masa para el componente k en el biorreactor considera los siguientes términos:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flujo de entrada del componente k | − | Flujo de salida del componente k | − | Velocidad de consumo del componente k | = | Acumulación del componente k en el biorreactor |

En la práctica, existen diferentes modos de operación, con distintas características, a saber:

***Modo de Operación Discontinuo o por lotes (batch)***

En este caso, se carga el reactor con los microorganismos y el líquido a tratar, manteniéndose en contacto hasta completar el tiempo de reacción para alcanzar el grado de depuración deseado. Al no existir entrada ni salida de biomasa o de líquido, el balance de masa resultante, para el componente C (compuestos orgánicos biodegradables) es:

$$-r_C = \frac{d[C]}{dt}$$

donde

$r_C$ = es la velocidad de consumo del contaminante (M $L^{-3}$ $T^{-1}$).

*[C]* = es la concentración de DBO del efluente en el reactor (M $L^{-3}$).

*t* = tiempo de reacción (T)

Conociendo la cinética y la concentración inicial, $[C]_O$ , la ecuación diferencial puede integrarse para obtener el tiempo de reacción, $t_R$ , necesario para alcanzar una concentración final $[C]_F$

$$t_R = -\int_{C_O}^{C_F} \left[ \frac{d[C]}{r_C} \right]$$

***Modo de Operación Continuo, reactor perfectamente agitado*:**

En este modo de operación, el líquido a tratar se alimenta constantemente al reactor, cuyo contenido está sometido a vigorosa agitación, lográndose una homogeneidad de concentración al interior del reactor. El efluente tratado es retirado continuamente del reactor. El sistema se mantiene en estado estacionario, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- El flujo y las características químicas y físicas de la entrada se mantienen constantes
- El flujo volumétrico de salida es igual al de alimentación
- Las características de la biomasa en el reactor se mantienen constantes
- El pH y la temperatura del reactor se mantienen constantes
- La concentración de oxígeno disuelto en el reactor se mantiene constante (para sistemas aeróbicos)

Bajo tales condiciones, el balance de masa resultante es:

$$F[C]_O - F[C]_F - V r_C = 0$$

Por lo tanto, el tiempo de residencia ($t_R$) en el reactor se puede calcular a partir de:

$$t_R = \frac{V}{F} = \frac{[C]_O - [C]_F}{r_C}$$

***Modo de Operación Continuo, reactor flujo pistón:***

En el caso de reactores tubulares continuos, donde se pueda despreciar el gradiente de velocidad en el sentido radial, se puede suponer que el fluido avanza como un flujo pistón, es decir sin mezcla axial. Bajo condiciones de estado estacionario, se puede demostrar que el tiempo de residencia requerido está definido por la siguiente ecuación:

$$t_R = = \frac{V}{F} = -\int_{C_O}^{C_F} \left[ \frac{d[C]}{r_C} \right]$$

Las ecuaciones resultantes de los balances de masa permiten dimensionar el biorreactor, de acuerdo al modo de operación correspondiente. Se puede observar que, en todos los casos, se requiere conocer la velocidad de consumo del contaminantes ($r_C$). Este aspecto se revisa en los párrafos siguientes.

**b) Cinética de Degradación Biológica del Material Orgánico Disuelto**

La cinética de biodegradación de un substrato orgánicos se expresa, generalmente, en base al modelo de Monod:

$$r_C = \frac{\mu_M [C][X]}{K_S + [C]}$$

donde:

$r_C$ = es la velocidad de consumo del contaminante (M $L^{-3}$ $T^{-1}$).
*[C]* = es la concentración del contaminante orgánico en el reactor (M $L^{-3}$).
*[X]* = es la concentración de microorganismos en el reactor (M $L^{-3}$).
$K_S$ = es la constante de afinidad de Monod (M $L^{-3}$).
$\mu_M$ = es la velocidad máxima de crecimiento celular ($T^{-1}$).

De acuerdo al modelo cinético de Monod, la velocidad de degradación del contaminante depende de la concentración del substrato y de la concentración de biomasa activa. Los valores típicos utilizados en el modelamiento de biorreactores aeróbicos son:

$\mu_M$ = 11 - 14 (día$^{-1}$) para residuos industriales.
2,4 - 7,2 (día$^{-1}$) para residuos domésticos.
$K_s$ = 2 - 30 mg/l para residuos industriales.
50-120 mg/l, para residuos domésticos.

Existen diferentes formas de expresar la concentración de contaminantes orgánicos biodegradables, como se revisa a continuación.

**c) Determinación de Compuestos Orgánicos en Aguas Residuales**

Los materiales orgánicos contenidos en las aguas residuales incluyen una amplia mezcla de compuestos, y resulta difícil su determinación individual. Desde el punto de vista del control ambiental, interesa la demanda de oxígeno que dichos compuestos imponen, ya que ello refleja el efecto que tendrán una vez que se viertan en los cuerpos de agua receptores. Los microorganismos aeróbicos consumen el oxígeno (fuente de electrones) para la producción de energía necesaria para el crecimiento. Por ejemplo, en el caso de la glucosa:

$$C_6 H_{12} O_6 + 6 O_2 \longrightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$$

Este tipo de reacciones es usado para medir la demanda química o biológica de oxígeno. Son análisis no específicos, y los átomos de carbono pueden ser

oxidados química o biológicamente para producir $CO_2$. A continuación, se describe brevemente algunos análisis utilizados en el control ambiental para la determinación de compuestos orgánicos disueltos en agua.

***Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)***

El análisis de DBO usa microorganismos para oxidar los componentes orgánicos, utilizando oxígeno molecular, bajo condiciones controladas. Se mide el oxígeno consumido durante un período especificado (5 días, 7 días o 30 días). La muestra se pone en contacto con una solución saturada de oxígeno, y se incuba en un recipiente cerrado, en la oscuridad a 20ºC. Generalmente, se utiliza un inóculo de microorganismos. Paralelamente, se hace un control como referencia, con agua pura y el inóculo. El test de $DBO_5$ (5 días, 20ºC) ha permanecido inalterado desde 1912. El consumo de oxígeno puede ser descrito en forma simplificada por dos reacciones: degradación (catabolismo) y síntesis (anabolismo), respectivamente:

$C_N H_M N_P O_Q + x\ O_2 \longrightarrow y\ CO_2 + z\ H_2O$ + moléculas pequeñas + Energía

Moléculas pequeñas + m $O_2$ + Energía $\longrightarrow$ p $C_5H_7NO_2$ (biomasa) + $H_2O$

Cuando el período de incubación está a punto de terminar, debido a la baja concentración de material biodegradable presente, los organismos comienzan a oxidar su propio material celular, para obtener la energía necesaria para mantener su viabilidad. Esto es conocido como metabolismo endógeno:

$$C_5H_7NO_2 + 5\ O_2 \longrightarrow 5\ CO_2 + NH_3 + 2\ H_2O + \text{Energía}$$

La demanda última de oxígeno se mide como el consumo total después de 28 días de incubación. En el caso de aguas con alto contenido de N, se experimenta una alta demanda de oxígeno entre los días 5 y 12, debido a la acción de bacterias nitrificantes:

$$NH_3 + 2\ O2 \longrightarrow NO_3^- + H_2O + H^+$$

Para evitar la acción de estas bacterias durante la medición de DBO, éstas se inhiben con aliltiourea (ATU).

***Cinética del test de DBO***

A pesar de la complejidad de las reacciones involucradas, la cinética de consumo de oxígeno se puede aproximar a una reacción de 1er orden:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = -k[O_2]$$

donde *[$O_2$]* es la concentración de oxígeno disuelto y *k* es la constante cinética. Integrando, se obtiene el consumo de oxígeno, es decir, la Demanda Biológica de Oxígeno:

$$DBO_t = [O_2]_0 \left(1 - e^{-kt}\right)$$

Los valores de k a diferentes temperaturas (k(T)) pueden ser calculados a partir del valor a 20ºC ($k_o$ ):

$$k(T) = k_o \, \theta^{(T-20)}$$

donde $\theta$ es aproximadamente 1,047, para T>20ºC y 1,135 para T<20ºC.

***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***

Se refiere al potencial de oxígeno requerido para oxidar químicamente el material orgánico, bajo condiciones controladas. Usa como agente oxidante el dicromato de potasio, en presencia de $H_2SO_4$ y un catalizador de Ag a 150ºC. El dicromato remanente se determina a partir de titulación con $FeSO_4$ usando Ferroína como indicador (1 mol de dicromato corresponde a 1,5 moles de oxígeno). Tiene la ventaja de que el análisis demora dos horas, por lo que puede ser utilizado en control de procesos. Generalmente, entrega valores mayores que la DBO.

***Test Valor de Permanganato (VP)***

La oxidación química se hace usando permanganato de potasio. Es menos riguroso que la oxidación con dicromato. Se usa $H_2SO_4$ diluido, y la muestra se hierve durante 30 min. El permanganato residual se titula con oxalato de amonio. Generalmente, el VP es menor que la DBO.

***Demanda de Oxígeno Total (DOT)***

Es un análisis rápido y automatizado, en el cual una muestra se oxida en presencia de catalizador a 900ºC, en presencia de aire. La demanda de oxígeno se calcula en base al consumo de oxígeno. Este valor incluye también el consumo de oxígeno debido a la oxidación de substancias inorgánicas y orgánicas recalcitrantes (ej.: lignina y plásticos). El valor de DOT es superior al DQO.

Los diferentes métodos de determinación de demanda de oxígeno, entregan valores diferentes, como consecuencia del poder oxidante característico de cada uno. El único de ellos que mide directamente la demanda biológica de oxígeno, es el test de DBO. Sin embargo, para que éste tenga validez, es necesario medir el consumo de oxígeno por un período mínimo de 5 días, lo cual no es adecuado como herramienta de control de procesos. Los otros tests son más rápidos, pero determinan el consumo de oxígeno asociado al efluente no sólo debido a la actividad biológica, sino que también a la oxidación química bajo diferentes condiciones de temperatura, y catalíticas. La relación entre DBO y DQO (o DOT o VP) varía dentro de márgenes relativamente pequeños para un efluente dado, y las mediciones rutinarias de oxidación química pueden ser usadas como indicadores del nivel de DBO existente.

### 5.2.2.1) Sistemas de Tratamiento Aeróbico

Los procesos aeróbicos de tratamiento de efluentes están diseñados para acelerar los procesos de aireación natural y bioxidación del material orgánico. Nos referiremos aquí a las lagunas de aireación, a los sistemas de lodos activados (en sus variaciones más relevantes) y a los filtros biológicos. En cada caso, se mostrarán las características operacionales básicas y los parámetros de diseño de importancia. Ya que la aireación es de primera importancia para los procesos aeróbicos, es necesario comenzar esta sección revisando los conceptos básicos de aireación.

#### a.1) Aireación

Una gran parte de los costos de operación es debide al consumo energético asociado con la aireación. Por lo tanto, es importante diseñar y operar los sistemas eficientemente, para reducir el impacto económico.

La transferencia de oxígeno en los sistemas aeróbicos puede ser llevada a cabo de varias maneras, por ejemplo: mecánicamente, difusores de aire comprimido, alimentación con oxígeno puro, etc. Sin embargo, no importando cual sea el sistema, las leyes físicas que gobiernan la transferencia son comunes a todas ellas. El modelo más usado para explicar la absorción de oxígeno en un líquido supone que la velocidad de transferencia está limitada por la resistencia difusional impuesta por la película líquida estancada, presente en torno a la interfase gas - líquido.

Tal como se ilustra en la Figura 5.3, las moléculas de oxígeno son transferidas por difusión, a través de la película líquida que se forma en torno a la burbuja de aire. La fuerza motriz de dicho proceso es el gradiente de concentración de oxígeno disuelto a través de dicha película líquida. El oxígeno disuelto en el líquido inmediatamente en contacto con el gas tendrá una concentración muy cercana a su valor de saturación ($[O_2]_{SAT}$). Si la concentración de oxígeno disuelto en el seno del líquido, ($[O_2]$) es inferior a la concentración de saturación, se establece un flujo difusional desde la interfase hasta el seno del líquido, a través de la película estancada. El transporte de las moléculas de oxígeno desde el seno del líquido hasta las inmediaciones de los microorganismos es por convección y, posteriormente, cruzan la pared celular dentro del sistema microbiano, de acuerdo a su tasa metabólica (la que a su vez dependerá de la cantidad de nutrientes orgánicos (DBO)).

La velocidad de transferencia de oxígeno ($J$) a través de la película estancada, se puede expresar de acuerdo al modelo de Graham:

$$J = k_L a \ ([O_2]_{SAT} - [O_2])$$

donde:
$a$ = es el área interfacial ($m^2/m^3$).
$k_L$ = es el coeficiente de transferencia de oxígeno en la película líquida (m/s)).

$k_L a$ es un parámetro empírico que depende de la geometría del sistema,

temperatura, tamaño de burbujas, composición química, condiciones hidrodinámicas, etc.. En el caso de los agitadores mecánicos, $k_La$ se correlaciona con la potencia de agitación por unidad de volumen $P_V$ (kW/m$^3$). Por ejemplo, se puede utilizar la ecuación de Penney:

$$k_La = 21.5(P_V)^{0.79}$$

Los principales factores que afectan la Concentración de Saturación son la temperatura y la presión parcial de $O_2$ en el gas. Por ejemplo, a 0$^o$C $[O_2]_{SAT}$ =14.6 mg/l, a 20$^o$C $[O_2]_{SAT}$ = 9.29 mg/l (a 1 atm). El efecto de la presión parcial de $O_2$ en el gas es significativo; por ejemplo, la concentración de saturación en el agua en contacto con aire a 1 atm y 10ºC es $[O_2]_{SAT}$ = 11.3 mg/l, mientras que aquella que se obtiene cuando se usa $O_2$ con una presión parcial de 0.9 atm es: $[O_2]_{SAT}$ = 48.4 mg/l, lo que representa un aumento de 4 veces en la capacidad de oxigenación del líquido.

***Métodos de Aireación***

Existen dos técnicas generales de aireación: mecánica y por difusores.

- **Aireación Mecánica:** La agitación en la interfase aire-líquido produce miles de gotas que entran en contacto con la atmósfera. Existen diversos diseños (ej.: sistemas superficiales, chorros de líquido, y sistemas combinados (agitación y aspersión)). Los aireadores superficiales pueden ser montados verticalmente (en casi todos los casos, de turbina) u horizontalmente (sólo en el caso de zanjas de oxidación, de paletas). La tasa estándar de aireación es del orden de 1 - 3 (kg $O_2$/kWh).
- **Aireación por Difusores:** Los difusores están montados en el fondo del reactor y el aire se alimenta en burbujas. La transferencia de oxígeno tiene lugar durante el ascenso de las burbujas. Las corrientes generadas debido al burbujeo ayudan a agitar la mezcla de líquido y microorganismos. Normalmente, no todo el $O_2$ alimentado es transferido, y la eficiencia de utilización en los sistemas de difusores, es baja (1-15%). Se tiene una capacidad de aireación en el rango 0,5-2 (kg $O_2$ /kWh). Los volúmenes de aire alimentado son del orden de 30-40 (m$^3$/kg DBO).

**a.2) Configuración del Biorreactor**

Tal como se mencionó en secciones anteriores, los sistemas de tratamiento biológico pueden operar en modo de operación discontinuo o continuo.

**Modo Discontinuo (Por lotes o batch):** En este modo de operación, se presentan cuatro etapas sucesivas: alimentación, aireación, sedimentación, vaciado del sobrenadante y comienzo de un nuevo ciclo. El tiempo requerido para completar un lote comprende el tiempo de carga del reactor, el tiempo requerido para la bioreacción y el tiempo para descarga. Los tiempos de carga y descarga pueden ser muy grandes cuando el volumen de líquido a tratar es alto, por lo que el modo discontinuo se prefiere sólo para pequeña escala de operación.

- **Modo Continuo:** Se utiliza cuando la escala de operación es grande.

*Reactores perfectamente agitados*: Su principal ventaja radica en el hecho que el afluente es rápidamente diluido en el reactor, actuando como amortiguación contra la presencia de sustancias tóxicas que pueden estar presentes en la alimentación. La carga es uniforme en todo el reactor, con necesidad uniforme de $O_2$. En la práctica, pueden existir problemas de cortocircuitos hidráulicos, debido a un mal diseño. También se presentan problemas debido a baja sedimentabilidad de los flóculos. En general, esta configuración de reactor requiere un mayor volumen que los reactores tipo flujo pistón.

*Reactores flujo pistón*: Existe un gradiente axial de DBO decreciente a lo largo del reactor, creciente concentración de lodos, y decreciente concentración de $O_2$ disuelto. Usualmente, son zanjas largas y angostas, o se puede aproximar a partir de un gran número de reactores completamente mezclados, en serie. En la práctica, es mejor usar tanques en series, ya que cada uno de ellos puede tener su propio aireador diseñado ad-hoc. Generalmente se utiliza aireación graduada a lo largo del reactor flujo pistón, con una tasa mayor al comienzo, disminuyendo a lo largo del reactor. Los problemas de sedimentabilidad son mucho menores en los reactores de flujo pistón.

**a.3) Lagunas de Aireación**

Son relativamente baratas y, aparentemente, fáciles de operar. Normalmente tienen 2-6 m de profundidad, con una gran superficie. En el caso de las lagunas de maduración, donde se tienen largos tiempos de residencia, la principal fuente de $O_2$ proviene de la actividad fotosintética de las algas, llegándose a niveles de oxígeno disuelto de 20-30 $g/m^3$. En climas con menor disponibilidad de luz solar esto no es muy eficiente.

La estructura de la población microbiana en el reactor depende del tipo de afluente y de las características de aireación. Una buena aireación elimina la presencia de algas y provee una población bacteriana heterotrófica con buenas características de floculación.

Los aireadores cumplen dos roles: oxigenación del efluente y agitación, para evitar la sedimentación de los flóculos en la laguna. Los aireadores mecánicos pueden ser flotantes o fijos. En caso de lagunas más profundas, se usa turbinas sumergidas. La potencia requerida para mezclar el contenido de la laguna, es del orden de 5-20 ($W/m^3$). El requerimiento energético para transferencia de $O_2$ se puede estimar sobre la base de datos de diseño de aireadores comerciales, típicamente entre 1 y 3 (kg $O_2$/kWh). Los aireadores mecánicos deben ser localizados de manera adecuada, para hacer un uso eficiente de ellos, de acuerdo a recomendaciones del fabricante. Normalmente, para aireadores de 75 kW se usa espaciamientos de 20 m o más.

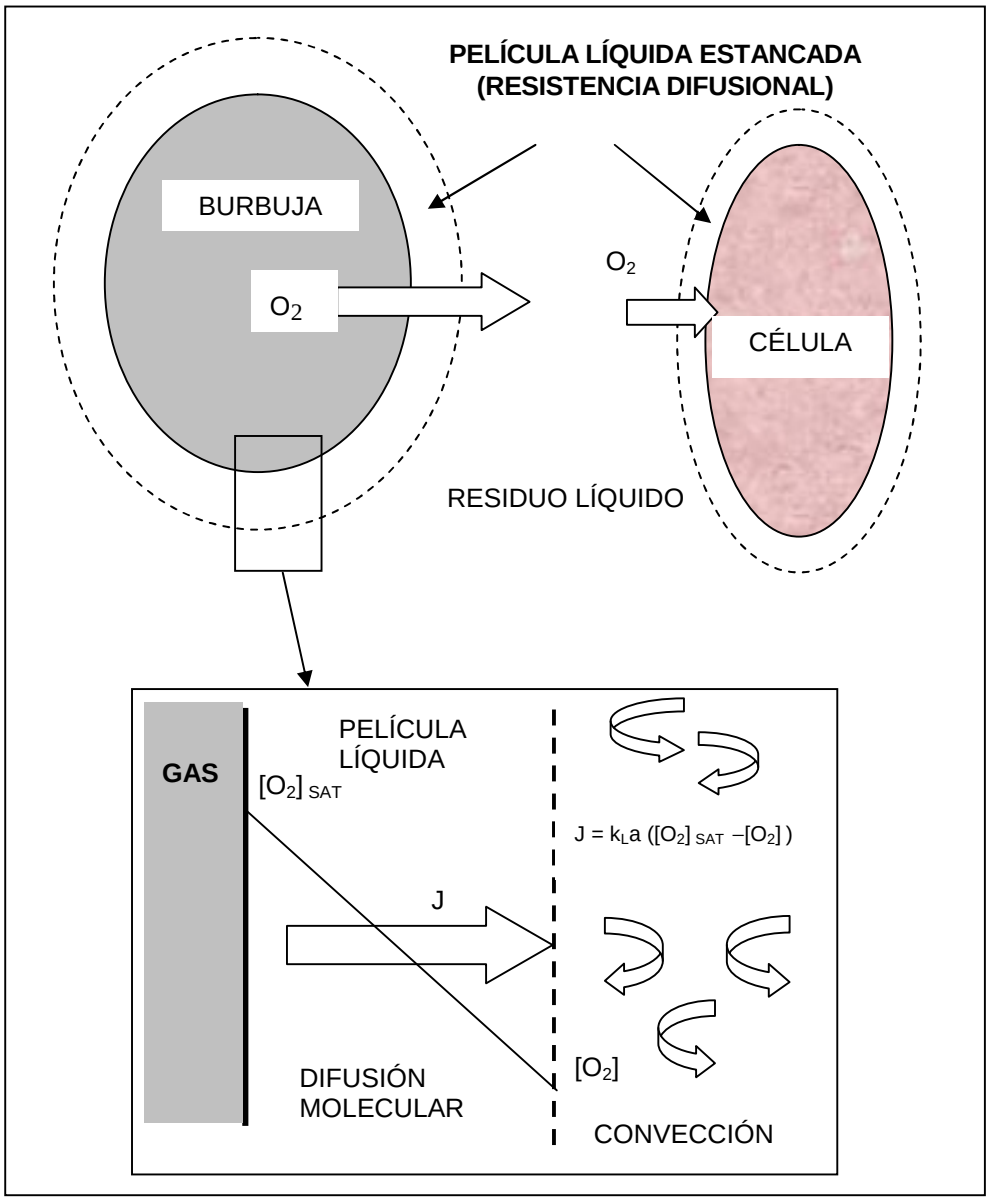
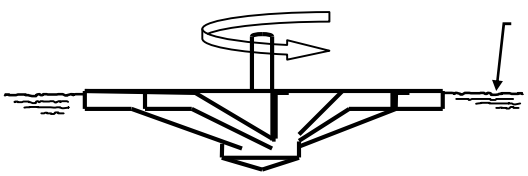
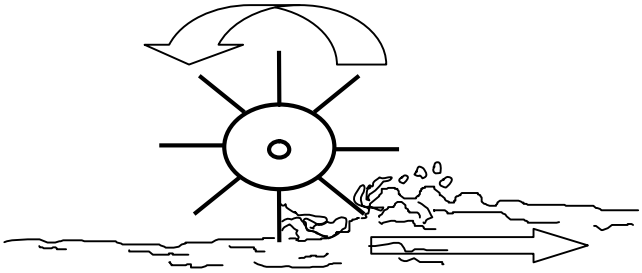



**FIGURA 5.3: TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES.**

**AIREADOR "SIMCAR" (SIMON-HARLEY LTD.)**




**AIREADOR CON CEPILLO DE KESSENER**



**SISTEMA DE AIREACIÓN DE TURBINA "CONO SIMPLEX"**

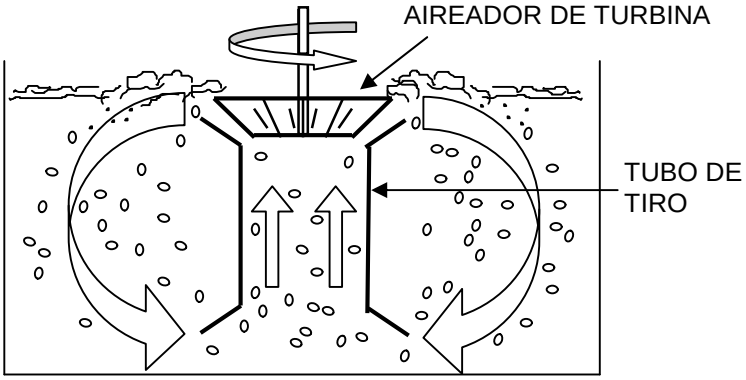



**FIGURA 5.4: AIREADORES MECÁNICOS**

Los sedimentos se pueden digerir naturalmente cuando la temperatura del agua en el fondo excede los $20^oC$ (verano, clima tropical). En climas fríos, los sedimentos se acumulan en el fondo, requiriendo una limpieza periódica.

Para estimaciones preliminares, se puede calcular el área de la laguna aireada sobre la base de un tiempo de residencia dado, por ejemplo 6 días, y una profundidad media de 5 m. También se puede utilizar una carga orgánica de diseño, con valores del orden de 400 (kg DBO alimentación $ha^{-1}día^{-1}$) con eficiencias de remoción de DBO en el rango 70-90%. En el caso de las lagunas con aireación forzada, donde existan condiciones hidrodinámicas de agitación completa, se puede utilizar las ecuaciones de diseño revisadas en secciones anteriores, en base a datos cinéticos de literatura o de experiencias con efluentes similares.

Los problemas típicos asociados a las lagunas de tratamiento son: mala distribución del líquido en la laguna, variaciones estacionales de temperatura, malos olores, generación de lodos en el efluente y baja eliminación de organismos patógenos.

Normalmente, el efluente de la laguna contiene material en suspensión correspondiente a los microorganismos que se han reproducido en la laguna, con una concentración en el rango 0,08 - 0,4 ($kg/m^3$). Estos microorganismos deben ser eliminados del efluente antes de su descarga final, si no cumple con las normas que regulan su vertido.

Las lagunas de aireación se justifican en aquellos casos donde existe una adecuada disponibilidad de terreno a bajo costo. Sin embargo, su implementación no es recomendable en el caso de industrias que contienen contaminantes de baja biodegradabilidad, ya que pueden resultar inadecuadas para cumplir con la legislación ambiental.

Se recomienda utilizar lagunas en serie para permitir una mayor estabilidad operacional, a la vez de que dicho arreglo ayuda a "especializar" cada laguna, de acuerdo a las características del afluente que recibe. Por ejemplo, la primera laguna recibe la mayor concentración de DBO, por lo que tendrá requerimientos de aireación más altos; las lagunas de las etapas finales presentarán bajas concentraciones de DBO y una mayor proporción de N y P, lo que puede generar una mayor actividad fotosintética.

Es interesante usar plantas acuáticas (ej.: jacinto acuático) en la última laguna, ya que ello permite reducir los niveles de nitrógeno en el efluente, así como los sólidos suspendidos y iones que son adsorbidos por las raíces de las plantas. Un aspecto importante de estos sistemas radiculares es que ofrecen condiciones apropiadas para la formación de una rica cadena trófica (rizosfera), lo que facilita la remoción de diversos tipos de contaminantes. Las plantas acuáticas se usan extensivamente en aquellas zonas climáticas donde son abundantes. Su alta capacidad para captar metales pesados de los efluentes las transforma en un valioso agente depurador. Sin embargo, dichas plantas deben ser cosechadas, lo que genera un problema adicional de eliminación de sólidos.

### a.4) Sistema de Lodos Activados

El sistema de lodos activados es un sistema de tratamiento biológico de mayor velocidad de degradación, debido a que se mantiene una alta concentración de biomasa en el reactor (Figura 5.5). El sistema consta de dos etapas básicas:

- **Biorreactor aireado:** Donde la biomasa natural (lodos activados) degrada/metaboliza los componentes orgánicos; se forman flóculos.
- **Sedimentador:** Donde los flóculos (lodos) son separados del líquido clarificado y parcialmente reciclados al biorreactor.

La existencia de reciclo de biomasa, implica mantener una población microbiana más alta en el reactor, alcanzando mayores tasas de conversión, para un volumen y tiempo de residencia (hidráulico) dado.

En un estudio preliminar, interesará determinar el volumen del biorreactor, su configuración básica (flujo pistón vs reactor agitado), las dimensiones del sedimentador, los requerimientos de aireación, y otros datos operacionales básicos (razón de reciclo, concentraciones, etc.).

**Características Generales de los Lodos Activados**

Este tipo de sistemas incluye una amplia gama de diseños, de acuerdo a su configuración, método de aireación y características operacionales. Básicamente, las aguas residuales se ponen en contacto con una población de microorganismos en un biorreactor, bajo condiciones aeróbicas. Los microorganismos consumen el material orgánico disuelto y suspendido. El efluente del reactor se alimenta a un sedimentador (u otro sistema de separación sólido-líquido), donde se obtiene el efluente final clarificado, mientras que los flóculos microbianos (lodos) son concentrados y reciclados parcialmente al biorreactor.
En el reactor, la materia orgánica disuelta se elimina rápidamente, debido a adsorción en los flóculos y aglomeración del material orgánico suspendido. La degradación metabólica del material orgánico tiene lugar más lentamente, por acción de los microorganismos presentes. En este proceso, parte del material orgánico se oxida a $CO_2$ (mineralización) y parte se convierte en nueva masa celular (asimilación). Parte de la masa microbiana muere y se descompone regenerando el material orgánico disuelto. Los lodos desechados representan la cantidad neta de biomasa producida por asimilación.

La naturaleza floculenta de los organismos es un factor fundamental, tanto para la adsorción de materias coloidales, iónicas y en suspensión dentro del agua residual, como para la separación rápida y efectiva de la biomasa del agua tratada.

**Parámetros Operacionales para Lodos Activados**

Existen varios parámetros operacionales claves para el funcionamiento del proceso:

- Nivel de carga de la planta.
- Tiempo de residencia hidráulico.
- Concentración de lodos.

- Tiempo de residencia de los lodos.

A continuación, se revisan los principales conceptos acerca de estos parámetros.

- **Nivel de Carga de la Planta:** Se refiere a la cantidad de material orgánico que se carga al reactor. Los parámetros usados comúnmente para describir la tasa de carga son:

  **i) Carga Orgánica, $Q_O$:** Es la cantidad de DBO alimentada por unidad de volumen de reactor, expresada como (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$):

  $$Q_0 = \frac{F[C]}{V}$$

  donde F es el flujo de afluente a tratar ($m^3$/día), *[C]* es la concentración de DBO del afluente (kg/$m^3$) y V es el volumen del biorreactor($m^3$). La carga orgánica varía con la operación de la planta, tanto en flujo como en concentración de DBO. Típicamente, los valores de diseño son entre 0,25-2,0 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$).

  **ii) Razón Alimento/Microorganismos (A/M):** La A/M o factor de carga de los lodos es uno de los parámetros más útiles; se refiere a la cantidad de DBO alimentado por unidad de lodos presente en el reactor:

  $$A/M = \frac{F[C]}{V X}$$

  donde *[X]* es la concentración de lodos en el reactor (sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM)). Valores típicos para A/M se encuentran en el rango 0,1 - 0,6 [(kg DBO alimentado) $(kg\ lodos)^{-1}$ $día^{-1}$]. Cuando la cantidad de DBO se expresa como DBO *removido* por unidad de lodos por día, la A/M se denomina Factor de Carga del Proceso. La A/M es uno de los únicos parámetros que pueden ser manipulados por el operador de la planta, ya que la concentración de microorganismos en el sistema puede ser modificada aumentando o disminuyendo la purga de lodos.

  **iii) Carga de flóculos:** Se refiere a la relación entre DBO y microorganismos en un instante dado (kg DBO/kg lodos).

- **Tiempo de Residencia Hidráulico:** El tiempo de residencia del líquido (V/F) debe ser suficiente para permitir un tiempo de contacto adecuado entre el material orgánico disuelto y los microorganismos. Los sistemas convencionales presentan tiempos de residencia hidráulicos entre 6 y 10 horas.

- **Concentración de lodos**: Se refiere a la masa de lodos por unidad de volumen de reactor. Cuando la masa de lodos se expresa como peso seco, la concentración se denomina sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM). Cuando la masa de lodos se expresa en términos del peso seco de material

orgánico se habla de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM). La concentración de lodos en el sistema está determinada por la tasa de reciclo de los lodos y por la capacidad del clarificador secundario para concentrar los flóculos. Los valores típicos de concentración de lodos son del orden de 1,2 – 3,5 ($kg/m^3$) (3,5 a 5 ($kg/m^3$) en el caso de aireación extendida).

- **Tiempo de residencia de los lodos, $t_R$ (edad de los lodos)**: La característica esencial de los lodos activados es la recirculación de lodos concentrados al reactor. Por lo tanto, el $t_R$ es uno de los parámetros más importantes de la operación. Se calcula como la cantidad total de lodos dividida por la tasa de pérdida (purga) de lodos (incluyendo la pérdida en el sobrenadante del clarificador; ésta es normalmente despreciable). El $t_R$ típico es 7 días (4-10 días).

- **Consumo de $O_2$ por unidad de DBO removido:** Depende de la naturaleza de la carga orgánica y del $t_R$, entre otros factores. Varía de sistema a sistema, pero normalmente se encuentran valores en el rango 0,6-2,0 (kg $O_2$/kg DBO removido) (1,2 para un $t_R$ de 7 días).

- **Requerimientos de Nutrientes:** La relación DBO:N:P es 100:3:0.6 en los sistemas de lodos activados convencionales.

- **Tasa de remoción de DBO :** Los sistemas de lodos activados bien operados pueden lograr alrededor de 90-95% de eliminación de DBO.

- **Tasa de producción de lodos:** Alrededor de 0.5 kg lodos (peso seco)/kg DBO removido. En cuanto a la sedimentación, normalmente los lodos en el reciclo tienen una concentración del orden de dos veces la concentración en la salida del aireador (<1% peso seco).

**Problemas relacionados con los Lodos**

Lejos de ser un sistema homogéneo, los lodos son un complejísimo sistema ecológico, formado por una mezcla de diferentes clases de organismos, aglomerados, adsorbidos en sedimentos inorgánicos, floculados, etc. Además, contienen compuestos orgánicos e inorgánicos. La composición en cada sistema depende de la composición de los nutrientes, de las condiciones de operación, de las características locales, condiciones climáticas, etc.

Los flóculos microbiales de los lodos son cúmulos de varios millones de células bacterianas, junto a otros organismos y materiales, que se encuentran en un equilibrio dinámico. Los protozoos contribuyen al proceso de floculación y su presencia en alta concentración se considera un signo de buena salud del sistema biológico. Su importancia radica en su capacidad para alimentarse de las bacterias dispersas, las que no serían separables por sedimentación. Algunos protozoos están fijos en los flóculos, mientras que otros nadan libremente. Muchos protozoos segregan una mucosidad que permite acelerar la floculación.

El Índice de Volumen de los Lodos (IVL) es uno de los indicadores más usados para

determinar las características de sedimentación de los lodos, y corresponde al volumen sedimentado en 30 minutos, expresado por unidad de lodos en suspensión.

Cuando la densidad de los lodos es menor que la del agua, estos tienden a flotar (esponjamiento), lo que representa un serio problema operacional. Se cree que esto se debe a la presencia de organismos filamentosos, entre los que se encuentran principalmente algunos hongos y protozoos ciliados. Existe controversia sobre cuales son los factores que favorecen la formación de esponjamiento. Al parecer, las condiciones ácidas, el desbalance de nutrientes, las altas temperaturas (sobre $30^oC$), el descenso de la concentración de $O_2$ bajo 1 ($g/m^3$) y las bajas tasas de carga orgánica (bajo 0,2 [(kg DBO) $(kg\ lodos)^{-1}$ $día^{-1}$]) favorecen el crecimiento de hongos filamentosos.

Otro problema operacional bastante frecuente es la desfloculación que puede ocurrir debido a bajos niveles de $O_2$, bajo pH y presencia de compuestos tóxicos.

Los lodos están compuestos por organismos que se encuentran en distintas etapas de su ciclo biológico, materia orgánica biodegradable y materia inorgánica inerte. La proporción de lodos viables (organismos vivos) es baja. En el proceso convencional, los lodos viables representan entre el 2-3 % (para 4 días de retención de lodos). Mientras más largo el tiempo de residencia, mayor será el número de organismos no viables y viceversa. De ello se deduce que el requerimiento de oxígeno depende de la "edad" de los organismos.

**a.5) Variantes del Sistema de Lodos Activados Convencional**

Existen muchas variaciones, tanto en configuración como en método de aireación.

- **Estabilización por Contacto:** Es apropiado para sistemas completamente mezclados (donde se generan problemas de sedimentabilidad). En ella, el reciclo contiene una alta concentración de lodos, que se mezcla con la alimentación en un tanque pequeño. Ello permite un contacto de alrededor de 1/2 hora para que se adsorba y aglomere gran parte de la DBO. Luego se separan los lodos en el sedimentador y se alimentan a un tanque de estabilización, donde se someten a alta aireación para que se produzca la biodegradación del material adsorbido. El tiempo de residencia en el estabilizador es de aproximadamente 12 horas. Después de la estabilización, los lodos son reciclados al estanque de contacto. La ventaja del proceso es que gran parte de la aireación tiene lugar en el estabilizador, donde sólo están los lodos sedimentados después de la fase de contacto. Este proceso es efectivo solamente en aquellos casos en que gran parte del DBO puede ser rápidamente adsorbido y aglomerado por los flóculos. Es importante desarrollar un intenso trabajo de laboratorio para estudiar las características de adsorción.

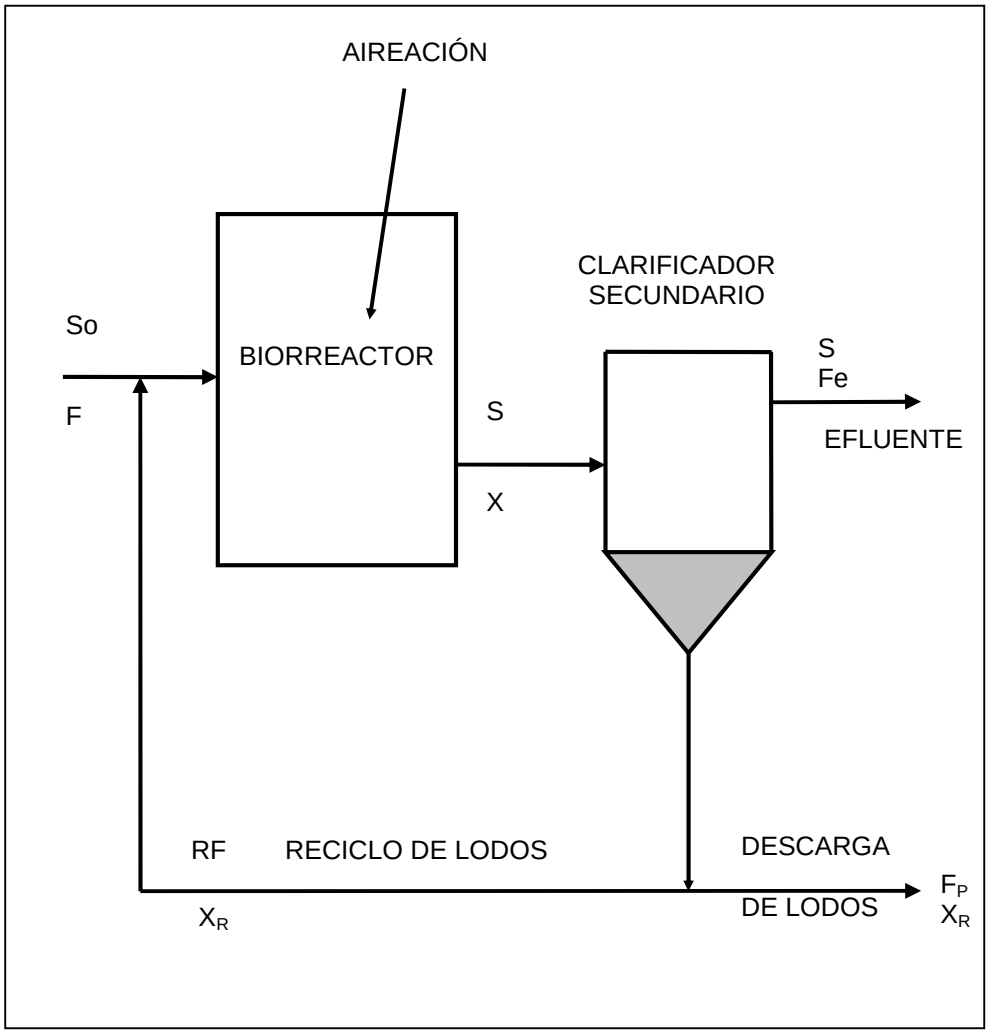



**FIGURA 5.5: SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL**

- **Zanjas de oxidación:** Es un típico ejemplo de flujo pistón. El mezclado y la aireación se efectúan utilizando paletas rotatorias. Es un diseño adecuado para la aireación prolongada, con un alto tiempo de residencia de lodos. Operan con baja carga orgánica, del orden de 0,2 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$).

- **Procesos avanzados:** Permiten una mayor velocidad de transferencia de oxígeno al aumentar la presión parcial del $O_2$ en el gas. De este modo, se tiene una mayor fuerza motriz al aumentar la concentración de saturación en el líquido. Se usa principalmente dos mecanismos:

  1. Aumentar la presión total del sistema, incluyendo la fase gaseosa (por ejemplo, sistema de pozo profundo (*deep shaft*))
  2. Aumentar la proporción de $O_2$ en la fase gaseosa (por ejemplo, procesos que utilizan $O_2$ puro).

  Proceso *Deep Shaft*: Es un proceso intensivo del tipo flujo pistón, en el que se usa la presión hidráulica para efectuar una transferencia eficiente a una alta tasa de $O_2$. Se desarrolló como consecuencia del proceso de fermentación en gran escala para producir proteína unicelular. Dicho proceso requería elevadas concentraciones de biomasa y tasas de alimentación de $O_2$ (10 (kg $O_2$ $m^{-3}$ $h^{-1}$). Debido a que la agitación mecánica convencional implicaba altos costos de operación, se inventó un sistema de fermentador del tipo sifón de aire: el alimentador de aire proporciona no sólo el suministro de $O_2$ sino que también la energía para la agitación del líquido. Los requerimientos en tratamiento de aguas son menos estrictos.

  Los sistemas en operación tienen una profundidad entre 30 y 220 m. Se dividen verticalmente en una sección de flujo ascendente y otra descendente, con diámetros entre 0,8 y 6 m. La presión hidrostática en el fondo, puede alcanzar 5-10 atm, con lo que la solubilidad del $O_2$ aumenta 5 a 10 veces. Otros datos de diseño:

  3-5 (kg $O_2$/kWh); A/M = 0,9 [(kg DBO) (kg lodos)$^{-1}$ $día^{-1}$]
  tiempo de residencia de los lodos = 4-5 días;
  tiempo de residencia hidráulico = 1,5-2 h
  eficiencia de remoción de DBO = 90-95%
  carga orgánica = 3,7-6,6 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$)

  *Sistemas con Oxígeno de Alta Pureza:* Este sistema es atractivo cuando existe disponibilidad de oxígeno barato en la planta. Utilizan gas con alta concentración de $O_2$ en vez de aire. Los métodos de obtención de oxígeno más usados son:

  i) licuefacción del aire a -185$^{o}$C y separación del $N_2$ y $O_2$ a diferentes temperaturas;
  ii) uso de lechos de zeolitas para separar el $N_2$ del $O_2$ debido a la diferente capacidad de adsorción (el $N_2$ es adsorbido preferencialmente) (0,8 kg $O_2$ / kg lecho, 90% de concentración de $O_2$ v/v).

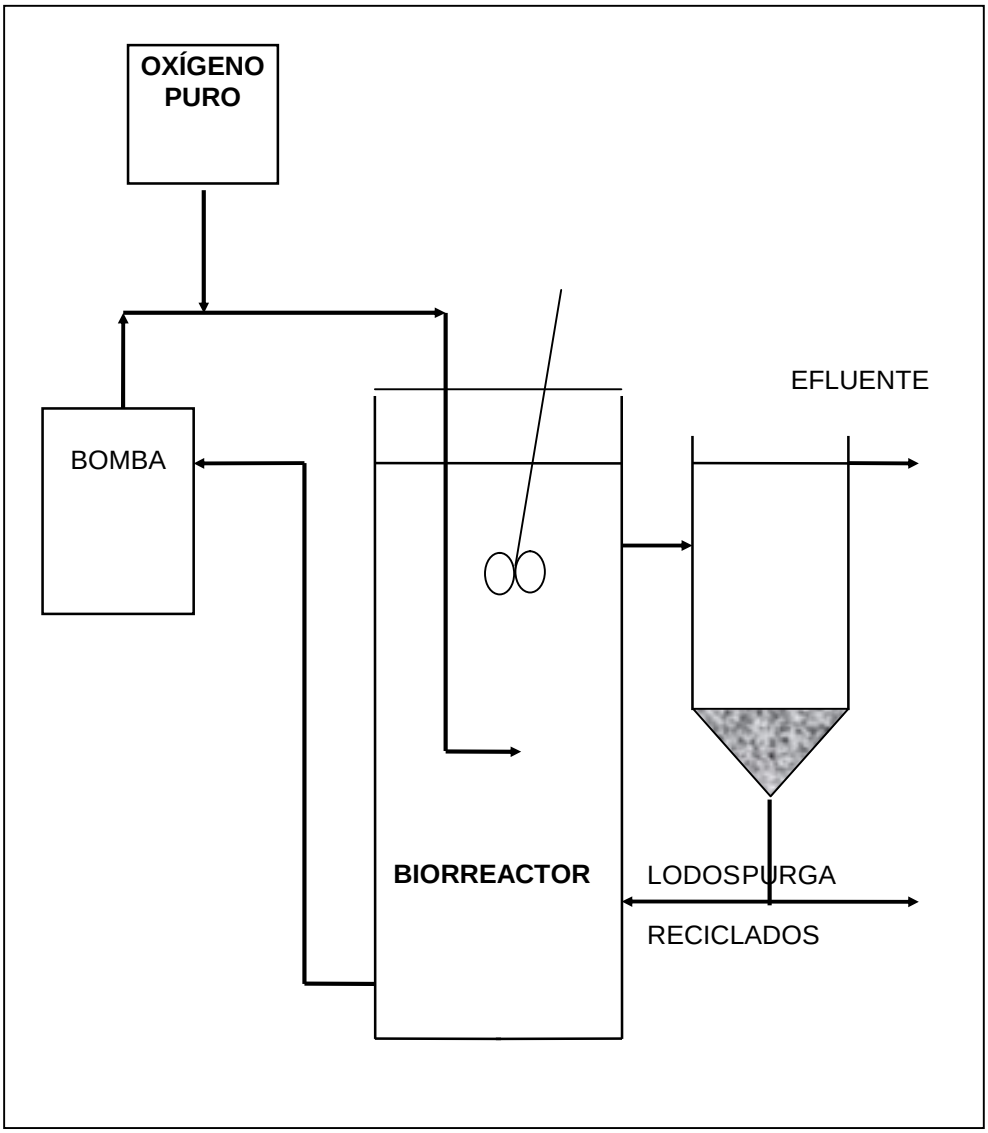



**FIGURA 5.6: SISTEMA DE OXÍGENO DE ALTA PUREZA, PROCESO VITOX**

Algunos ejemplos de sistemas comerciales basados en este principio son:

El proceso UNOX es un sistema cerrado, de oxigenación en etapas múltiples en modo co-corriente. Permite procesar entre 0,4 y 1 [(kg DBO) (kg lodos volátiles)$^{-1}$ día$^{-1}$], lo que es aproximadamente el doble de los sistemas convencionales que utilizan aire. La carga orgánica está en el rango 2,5 - 4 (kg DBO m$^{-3}$ día$^{-1}$) (3 a 4 veces mayor que un sistema convencional) y 1/3 del tiempo de retención que el convencional. El $O_2$ disuelto es aproximadamente 4-8 mg/l, lo que permite obtener lodos con buenas características de sedimentación.

-El proceso VITOX es un sistema abierto y usa oxígeno puro (Figura 5.6). La inyección del gas se hace a través de un Venturi, en una recirculación del líquido del reactor. Se forman burbujas pequeñas y se produce casi un 90% de disolución. Es muy usado para ampliar la capacidad de plantas convencionales en operación. Otros procesos similares son: Proceso MEGOX, Marox, Primox.

**a.6) Filtros Biológicos**

Los sistemas de tratamiento biológico basados en microorganismos inmobilizados en matrices inertes se caracterizan por tener una gran concentración de biomasa y son muy simples de operar (Figura 5.7). Su eficiencia depende de una buena distribución del material orgánico, del estado de la masa microbiana y de la circulación de aire a través del lecho. Generalmente, el aire circula por convección, debido a las diferencias de temperatura que se generan debido a las reacciones bioquímicas exotérmicas.

Los lechos más sencillos son de roca o escoria de 3-10 cm, con filtros de hasta 3 m de profundidad. En la actualidad existen medios sintéticos más livianos, de gran área específica, lo que permite construir biorreactores de alturas de hasta 12 m.

La nueva masa celular formada es arrastrada por el efluente y separada en un sedimentador secundario. En muchos casos, parte del efluente clarificado se recircula. Normalmente, el líquido se introduce mediante brazos de alimentación mecánicos.

Los modelos son difíciles de desarrollar en estos casos. Existen muchas variables: profundidad del lecho, flujo hidráulico, tasa de carga orgánica, tasa de recirculación, tipo de lecho, transferencia de masa de material orgánico y oxígeno desde la fase líquida a la película microbiana.

Para cálculos preliminares, se usan criterios de diseño puramente empíricos:

- La carga de DBO no debe exceder 1,2 (kg DBO m$^{-3}$ día$^{-1}$)
- La carga hidráulica (incluyendo la recirculación) debe ser menor de 30 (m$^3$m$^{-2}$día$^{-1}$)
- La recirculación debería ser tal que la DBO que entra (incluyendo la recirculación) no sea más de 3 veces que la DBO alimentada.

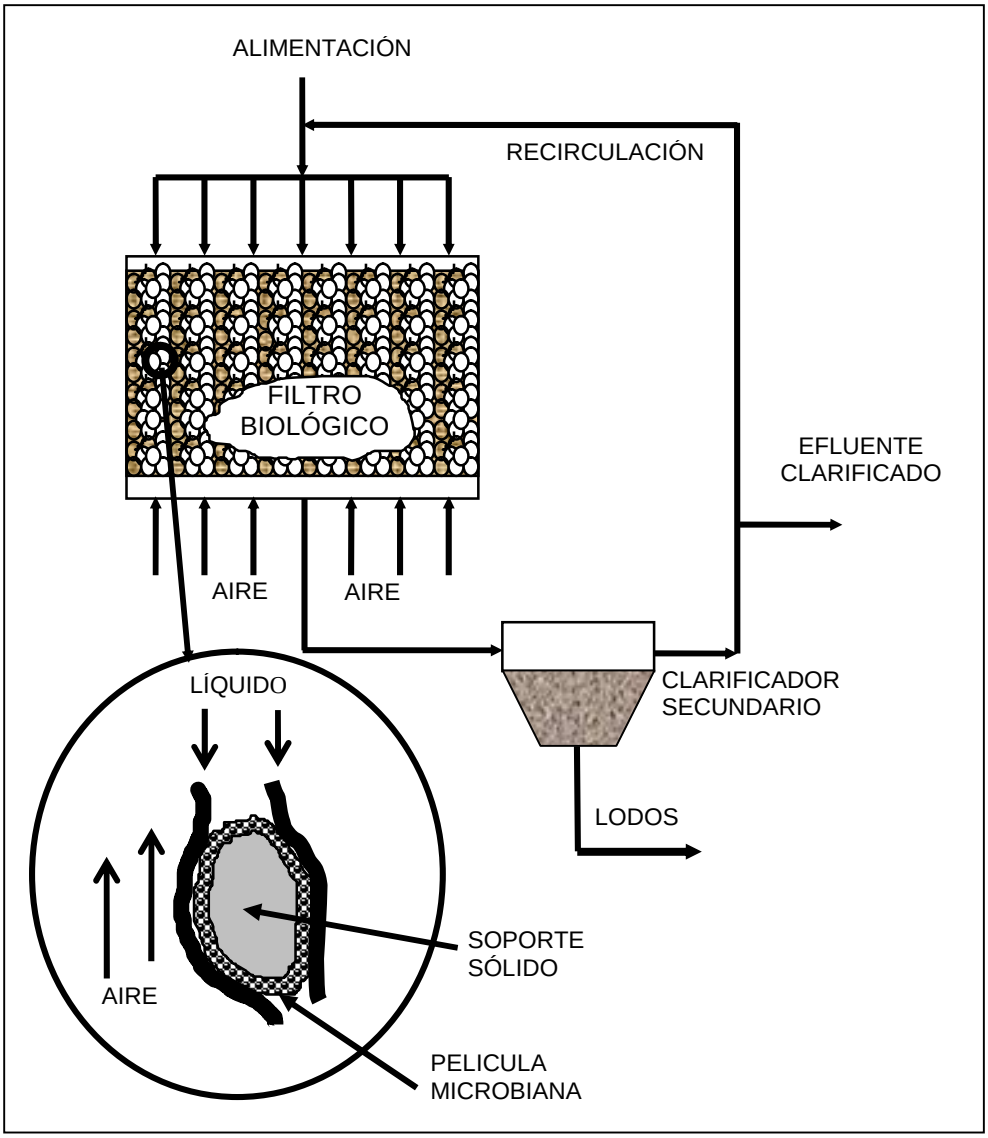



**FIGURA 5.7: FILTRO BIOLÓGICO**

El volumen del filtro se determina dividiendo el total de DBO diario por 1,2 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$) o menos. El área puede ser calculada dividiendo el flujo volumétrico de efluente a tratar, por la carga hidráulica de diseño.

**a.7) Diseño de Clarificadores Secundarios**

Todos los procesos de tratamiento biológico de efluentes generan biomasa, a una tasa de alrededor de 0,5 (kg biomasa/kg DBO removido). Los microorganismos representan la carga orgánica de la corriente original, metabolizada en formas orgánicas más concentradas y de mayor peso molecular. Las bacterias y protozoos floculantes deben ser separados del efluente antes de que éste sea emitido a los medios receptores. Dicha separación normalmente se logra usando sedimentadores (clarificadores) u otras operaciones para la separación sólido-líquido.

El diseño de dichos clarificadores no es sencillo, dado que es una sedimentación Tipo 3. Para lograr una separación satisfactoria es necesario usar procedimientos de diseño basados en datos experimentales sobre las características de sedimentación de los lodos biológicos. Generalmente, los sedimentadores secundarios requieren tiempos de residencia del orden de 4 horas. Se debe evitar que los microorganismos permanezcan mucho tiempo en el clarificador y puedan generar una gran actividad metabólica, ya que ello dificulta su sedimentación.

**5.2.2.2) Procesos Anaeróbicos**

Aún cuando los procesos aeróbicos han monopolizado el tratamiento secundario de las descargas industriales, en la actualidad existe un enorme impulso para aprovechar los avances experimentados en el procesamiento anaeróbico. El proceso anaeróbico se usa masivamente en el tratamiento de los lodos producidos por los procesos aeróbicos; de esta manera se reduce el volumen final de los lodos, se estabilizan biológicamente (eliminación de patógenos) y se aprovecha parte del potencial energético.

Entre las ventajas de los procesos anaeróbicos se puede citar:

- Integración energética (produce $CH_4$, 0,35 ($m^3$ std/kg DBO removido)).
- Menor producción de biomasa (1/3-1/5 de lo que genera un proceso aeróbico).
- Menores requerimientos de nutrientes inorgánicos.
- No se requiere aeración; menores costos energéticos.
- Se pueden dejar sin uso por largos períodos (1-25 año) y se reactivan rápidamente (1-3 días).
- Resistente a choques orgánicos.

Entre sus principales limitaciones, se pueden mencionar:

- Menor tasa de eliminación de DBO por unidad de biomasa.
- La puesta en marcha inicial puede demorar meses (1-6 meses).
- La retención de biosólidos es crítica, debido a la baja tasa de producción de

lodos (0,04-0,08 kg/kg DBO).

- Debido a las condiciones reductoras, se producen también muchos otros compuestos ($H_2S$, mercaptanos, ácidos orgánicos y aldehídos) produciendo corrosión y malos olores.
- Sensible a ciertos inhibidores y compuestos tóxicos (ej.: $O_2$, $H_2O_2$, $Cl_2$, $H_2S$, HCN, $SO_3$-).

Muchos de los problemas experimentados en el pasado (que le generaron una mala reputación) se debieron a la ignorancia sobre los aspectos fundamentales del proceso. Enormes esfuerzos en los 70 y 80 derivaron en nuevos esquemas que presentan atractivo potencial y existen centenares de plantas anaeróbicas operando en gran escala en diferentes rubros industriales en todo el mundo.

La degradación anaeróbica es un proceso de biodegradación en múltiples etapas, que incluye un amplio rango de bacterias, las cuales se pueden agrupar en 3 categorías:

- Los compuestos de alto peso molecular (ej.: proteínas) sufren primero hidrólisis y son transformados en moléculas simples (azúcares, glicerol, etc), las que luego son convertidas en ácidos orgánicos, $H_2$ y $CO_2$ por las bacterias acidificantes.

- Los ácidos mayores son entonces convertidos a ácido acético e $H_2$ por las bacterias acetogénicas.

- La etapa final (metanogénesis) incluye a tres tipos de bacterias que metabolizan $CO_2$, $H_2$, metanol, ácido fórmico y ácido acético a metano.

Cuando se encuentra presente S inorgánico, la bacteria reductora *Desulfovibreo* usa el sulfato o sulfito como receptor de electrones, produciendo $H_2S$ y $CO_2$. La presencia de $SO_4$- y $SO_3$- limita la eficiencia del sistema, ya que las bacterias reductoras de S y las metanogénicas compiten por el mismo tipo de fuente energética (ácido acético). La producción de metano se puede reducir en 0,7 $m^3$ por cada kg de S reducido.

En la mayoría de los casos, el tratamiento anaeróbico se aplica a líneas de residuo segregadas, con alta concentración de DBO. En muchos casos, se ha usado como una primera etapa de tratamiento, antes de un procesamiento final aeróbico. La temperatura es muy importante: los organismos anaeróbicos más eficientes son mesofílicos o termofílicos. El rango 32-36$^oC$ es el más común industrialmente. Las necesidades energéticas se pueden suplir con parte del $CH_4$ generado.

Los requerimientos de N y P son mucho menores que en el proceso aeróbico (en algunos casos, los efluentes no contienen suficiente N y P y se necesita agregarlos). El pH óptimo para maximizar el $CH_4$ es 7-7,5. Bajo pH 6 y sobre 8,5 la producción de $CH_4$ cesa.

### b.1) Configuraciones del Sistema

En la práctica existen 5 configuraciones anaeróbicas en uso: lagunas anaeróbicas,

sistemas de contacto, sistema anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB), biofiltro anaeróbico y lecho fluidizado. Estos sistemas se revisan brevemente a continuación.

- **Lagunas Anaeróbicas:** Son el sistema anaeróbico más antiguo en uso (desde los años 40). La laguna está cubierta con material plástico para mantener condiciones anóxicas, recolectar el $CH_4$ y controlar los malos olores. Las bacterias anaeróbicas se desarrollan y permanecen suspendidas gracias a la convección producida por los gases generados. Se puede mejorar la agitación con agitadores de baja velocidad y reciclo de sólidos. Es importante permitir cierto grado de sedimentación para facilitar la hidrólisis y degradación de los sólidos suspendidos. El $CH_4$ se colecta en varios puntos; se mantiene una presión negativa dentro de la cubierta para mantenerla en contacto con la superficie del agua. Las lagunas anaeróbicas son ideales para tratar efluentes con alta concentración de sólidos suspendidos (como podría ser el caso en muchas plantas celulósicas de pulpa mecánica y semiquímica), ya que los sedimentos pueden permanecer por largos períodos en el reactor, permitiendo su degradación. Las lagunas anaeróbicas permiten tratar los lodos residuales de tratamientos aeróbicos a muy bajo costo. Permite también estabilizar el flujo de los efluentes debido a su gran volumen. Desgraciadamente, las lagunas requieren grandes extensiones de terreno, debido a la baja velocidad de las reacciones anaeróbicas (7-10 días de retención), y se pierde calor debido a la gran superficie externa.

- **Proceso Anaeróbico de Contacto:** Es similar a un proceso de Lodos Activados pero en condiciones anaeróbicas. La reacción tiene lugar en un reactor agitado, donde se incluyen los nutrientes requeridos, con control de T y pH. El efluente pasa a un tanque desgasificador donde se permite flocular a la biomasa antes de entrar a un sedimentador, que permite reciclar parte de la biomasa para mantener una alta concentración de biomasa en el reactor. Una ventaja adicional es que los sólidos adsorbidos en los lodos biológicos tienen largos tiempos de residencia permitiendo su hidrólisis. Se ha medido cargas orgánicas de 1-2 (kg DBO removido $m^{-3}$ $día^{-1}$), a un 90% eliminación y 35$^{o}$C.

- **Sistemas de Flujo Ascendente (UASB):** Desarrollado en Wageningen (Paises Bajos) en los años 70. Es uno de los avances más espectaculares en sistemas anaeróbicos de alta tasa. Las bacterias forman gránulos densos que tienden a sedimentar y se mantienen como un manto en el fondo del reactor. La alimentación entra por la parte inferior del reactor. Sobre el lecho existe una zona de manto más floculado (3-10 kg lodos/$m^3$). En el tope del reactor hay un separador de fases, para separar el biogas de los sólidos atrapados en las burbujas ascendentes. Algunas variantes incluyen reciclo. Las principales ventajas del UASB son:

  - Tiene una puesta en marcha rápida, cuando se usa un inóculo obtenido de una planta existente.
  - Existe una alta retención de sólidos, lo que permite tratar aguas con contenido orgánico bajo 0,4 (kg DBO/$m^3$).
  - Se puede utilizar una carga orgánica de 3,5-5 (kg DBO removido $m^{-3}$ $día^{-1}$), a

$35^oC$.

- **Filtros Anaeróbicos:** Los filtros anaeróbicos no han encontrado gran acogida en la industria, debido al alto costo del empaque sintético, a pesar de que hay casos exitosos en el sector de bebidas alcohólicas (ej.: Bacardi, Puerto Rico, ha operado contínuamente un filtro de 9200 $m^3$, desde 1981). El concepto es similar al de un filtro aeróbico. Puede operar con cargas orgánicas en el rango 4-15 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$).

- **Lechos Fluidizados:** Las bacterias están adheridas a la superficie de partículas de arena, y son mantenidas en suspensión. Es el proceso anaeróbico de alta tasa con mayor carga volumétrica: 17-40 (kg DBO $m^{-3}$ $día^{-1}$) y 80-90% eliminación de DBO.

- **Eliminación de S:** El S inorgánico es uno de los principales problemas en la implementación de sistemas anaeróbicos en la industria de celulosa y otros sectores que producen efluentes con contenidos de azufre. Esto se puede mitigar, ya sea reduciendo su presencia en las aguas antes del tratamiento anaeróbico, o usando sistemas en dos etapas. En la primera etapa se produce principalmente $H_2S$ el cual puede entrar en un ciclo de oxidación posterior a $SO_2$, mientras que en la segunda etapa se produce la metanación.

- **Degradación Anaeróbica de los Lodos de Aireación:** Hasta ahora, el principal uso de los sistemas anaeróbicos es el tratamiento de los lodos generados en los procesos aeróbicos. Esto reduce el impacto ambiental de las descargas de lodos de aireación (ej.: lodos activados), ya que los estabiliza biológicamente, elimina los patógenos y reduce su volumen final. La digestión anaeróbica de los lodos se hace en el rango mesofílico ($35^oC$). Las características de este proceso son:

  Material volátil alimentado: 1-2 (kg material volátil $m^{-3}$ $día^{-1}$)
  Sólidos suspendidos alimentados: 1,5-2,1 (kg sólidos suspendidos $m^{-3}$ $día^{-1}$)
  Destrucción de sólidos: 30-35% del inicial
  Producción de gas: 0,9-1,2 ($m^3$/kg material volátil destruido)
  Poder calorífico del gas: 22.400 (kJ/$m^3$ gas)

Si el diseño es adecuado, se puede lograr que el metano provea la energía no sólo para el control de temperatura en la digestión, sino que también para la aeración en los sistemas aeróbicos presentes en la planta (turbinas de gas), u otros requerimientos energéticos.
Finalmente, los sistemas anaeróbicos ofrecen una serie de ventajas, sobre todo si son usados en combinación con los tratamientos aeróbicos. Existe un gran esfuerzo de investigación para estudiar la acción sobre efluentes recalcitrantes, organoclorados, etc. La utilización de sistemas segregados permite visualizar la implementación de sistemas biológicos adaptados a las características del material orgánico a eliminar.

### 5.2.3) Tratamiento Terciario

En esta categoría se incluye sistemas para eliminar otros contaminantes, tales como: metales, nitrógeno, fósforo, compuestos coloreados, y compuestos no biodegradables. Algunos de estos se describe brevemente a continuación.

- **Sistemas biológicos para la eliminación de nitrógeno:**

El amonio puede ser transformado en nitrato, utilizando bacterias nitrificantes en medio aeróbico; el nitrato puede ser eliminado en una etapa posterior, bajo condiciones anaeróbicas, donde bacterias denitrificantes lo transforman en $N_2$. Los procesos de nitrificación y denitrificación se describen en el Capítulo 2).

- **Oxidación avanzada**:

Permite eliminar compuestos orgánicos tóxicos, compuestos cromóforos u otros compuestos orgánicos no biodegradables: Se pueden utilizar agentes oxidantes tales como ozono o peróxido de hidrógeno, que generan radicales libres $OH^{\bullet}$ altamente reactivos. En la actualidad se han implementado estos agentes oxidantes en presencia de radiación UV o de un catalizar de $TiO_2$ . Un sistema interesante para generar radicales libres se basa en la reacción de Fenton:

Iniciación:

$$H_2O_2 + Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + OH^- + OH^{\bullet}$$

Propagación

$$OH^{\bullet} + H_2O_2 \longrightarrow HO_2^{\bullet} + H_2O$$

$$HO_2^{\bullet} + H_2O_2 \longrightarrow O_2 + H_2O + OH^{\bullet}$$

Terminación

$$OH^{\bullet} + Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + OH^-$$

- **Carbón activado**

La adsorción en carbón activado se utiliza para eliminar metales, compuestos orgánicos, y cromóforos. El contaminante se adsorbe en la superficie del carbón; sin embargo, ello resulta en un residuo sólido que debe ser tratado. Los carbones activados comerciales presentan un área especifica del orden de 1000 $m^2/g$, con capacidades de adsorción en el rango 10-400 (g contaminante / kg de carbón). El carbón se puede reactivar desorbiendo el contaminante utilizando vapor o gases a alta temperatura.

- **Precipitación química:**

La precipitación química en el tratamiento de aguas residuales implica la adición de compuestos químicos para alterar el estado físico de compuestos disueltos y de sólidos suspendidos, y facilitar la separación sólido/líquido. Los agentes químicos precipitantes de mayor uso en tratamiento de efluentes son:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 3CaSO_{4\,(S)} + 2Al(OH)_{3\,(S)} + 6CO_2$$

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CaCO_{3\,(S)} + 2H_2O$$

$$2\,FeCl_3 + 3\,Ca(OH)_2 \longrightarrow 3\,CaCl_2 + 2\,Fe(OH)_{3\,(S)}$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaSO_{4\,(S)} + 2Fe(OH)_{3\,(S)}$$

La formación del precipitado permite adsorber moléculas orgánicas y metales disueltos, y eliminar coloides.

Los coloides ("sols") son partículas suspendidas en agua de pequeño tamaño (inferior a 0,5 μm) que forman dispersiones estables. Los coloides hidrofóbicos son dispersiones de compuestos insolubles, mientras que los hidrofílicos son soluciones de moléculas con dimensiones coloidales (polímeros, macro-moléculas) que presentan grupos funcionales ionizables ( $-COO^-H^+$ , $-SiO^-H^+$ , $-NH_4^+$). Para separar los coloides de una solución acuosa es necesario, por lo tanto, desestabilizar las partículas coloidales e inducir la agregación. Para ello, se requiere neutralizar o superar las cargas superficiales, mediante la adición de cargas iónicas para neutralizar, ajuste de pH, o adición de polielectrolitos que se quemisorben y actúan como puentes entre partículas

- **Precipitación de óxidos metálicos hidratados**

Los iones metálicos ($M^{z+}$) (ej. Ni, Cu, Pb, Al, Zn) en solución acuosa están asociados a las moléculas de agua en diferentes grados de hidratación: La precipitación de los óxidos metálicos hidratados ocurre a través de una secuencia de etapas, a medida que el pH o la actividad del metal aumenta. El precipitado se forma cuando se supera el producto de solubilidad.

Además, las especies metálicas iónicas pueden ser adsorbidas sobre el hidróxido precipitado. Esta adsorción ocurre incluso contra las fuerzas de repulsión electrostáticas, en un rango de pH crítico donde la hidrólisis comienza. Por ejemplo, el Zn, Cu y Cd son fuertemente adsorbidos por $Fe(OH)_3$ precipitado a pH 8-9. A un pH dado, el grado de adsorción depende del tipo de anión, de las concentraciones de las especies y del tipo de metal

- **Hidrólisis ácida y alcalina:**

La degradación hidrolítica de compuestos tóxicos o persistentes puede efectuarse en condiciones ácidas y alcalinas, dependiendo de la naturaleza de tales compuestos. Por ejemplo:

- Hidrólisis de cianato ( $HOCN + H^+ \rightarrow NH_4^+ + CO_2$ )
- Descomposición de pesticidas por hidrólisis ácida y alcalina
- Descomposición de residuos de nylon mediante hidrólisis alcalina
- Hidrólisis de residuos fluoroboratos, por hidrólisis ácida, seguida de hidrólisis alcalina

## 5.3) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos de origen industrial ofrecen una gran oportunidad para implementar una gestión adecuada, con vistas a recuperar recursos materiales y facilitar el vertido de aquellos que no tengan valor comercial. Tal como se discute en el Capítulo 6, los residuos sólidos finales se pueden minimizar a partir de un conjunto de medidas para segregarlos y reutilizarlos, de tal modo que solo una mínima fracción del total deba ser vertida al ambiente. Los residuos industriales inertes o aquellos asimilables a residuos urbanos no requieren mayor tratamiento y se pueden depositar en vertederos controlados. Sin embargo, los residuos sólidos peligrosos deben ser tratados y reducidos a formas inocuas antes de su vertido final.

A continuación, se describen brevemente las principales opciones para la gestión y el tratamiento de los residuos sólidos industriales. Para mayores antecedentes técnicos e información de diseño se recomienda las referencias Perry y Green (1998), Tchobanoglous *et al* (1994) y LaGrega *et al* (1994).

### 5.3.1) Confinamiento de los Residuos Sólidos Industriales

El confinamiento de los residuos sólidos de origen industrial es una de las medidas más comunes a nivel mundial. Los residuos no peligrosos, inertes y asimilables a residuos sólidos urbanos (RSU) generalmente se almacenan en vertederos controlados. Estos son lugares donde los residuos se almacenan, se compactan y se cubren con una capa de material de relleno. Ya que generalmente se genera residuos líquidos secundarios, producto de las transformaciones biológicas y químicas que sufren los sólidos, se debe mantener una adecuada impermeabilización de las paredes del vertedero, particularmente, del fondo. Las medidas preventivas necesarias para reducir los riesgos a la salud de las personas y a la calidad ambiental incluyen: recolección y tratamiento de lixiviados, control de las emisiones gaseosas y mantención de una cobertura permanente con material inerte, para evitar el acceso de roedores, insectos u otros vectores. La ubicación de un vertedero controlado debe ser seleccionada cuidadosamente, tomando en consideración el transporte de los residuos y las características geológicas, hidrogeológicas y climáticas del área. Más aún, se debe realizar una cuidadosa evaluación de los procedimientos de cierre final del vertedero una vez que se alcanza la capacidad de diseño, teniendo en cuenta las características de la zona y los usos que serán asignados a dichos terrenos. Debido a las inadecuadas prácticas que por muchas décadas se han llevado a cabo en nuestro país, existe una desfavorable percepción pública que motiva resistencia de la comunidad local a la instalación de vertederos.

En el caso del confinamiento de residuos sólidos peligrosos, se debe seleccionar un lugar apropiado que garantice una barrera permanente entre dichos residuos y el entorno. En varios países tales residuos se confinan en minas subterráneas (sal, plomo), que presentan una barrera geológica adecuada. En todos los casos, se exige condicionar aquellos residuos que puedan cambiar de fase o que puedan difundir fuera de su lugar de contención, mediante un tratamiento que logre su inertización e inmovilización de los contaminantes peligrosos.

| ATRIBUTOS DE LOS VERTEDEROS CONTROLADOS | |
|---|---|
| VENTAJAS | Bajo costo relativo.<br>Tecnologías establecidas en el mercado<br>Adecuado para residuos asimilables a RSU y no peligrosos |
| DESVENTAJAS | Generación de gases y lixiviados.<br>Debe incluir sistemas de tratamiento para gases y lixiviados<br>No adecuado para residuos peligrosos<br>Costos de transporte (baja densidad, alta humedad).<br>Requerimiento de terreno adecuado.<br>Vida útil limitada. |

### 5.3.2) Tratamiento Biológico de Residuos Biodegradables

Si el contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos es significativo, se puede aprovechar la acción de microorganismos para reducir el volumen y estabilizar el residuo final. De este modo, se utiliza la materia orgánica presente como fuente de carbono para el crecimiento de microorganismos. Al respecto, existen dos opciones alternativas para el tratamiento biológico de residuos sólidos biodegradables:

- ***Biodegradación anaeróbica:*** La biodegradación se realiza en ausencia de oxígeno, para así promover la acción de bacterias anaeróbicas. Estos procesos ocurren naturalmente en los vertederos controlados donde se deposita residuos sólidos biodegradables. El residuo sólido se reduce a formas más estables, de tipo húmico. Además, se genera residuos secundarios, gaseosos y líquidos. Estos residuos secundarios contienen $CH_4$, $CO_2$, mercaptanos y compuestos orgánicos intermedios, los que deben ser tratados para evitar impactos ambientales no deseados. Generalmente, los gases residuales se recolectan y se someten a combustión. Los líquidos secundarios se tratan en sistemas de tratamiento de residuos líquidos diseñados adecuadamente. Cuando existe presencia de compuestos de azufre en los residuos sólidos, se puede generar considerables cantidades de $H_2S$ y compuestos volátiles azufrados, por lo que se debe tener mucha precaución en el tratamiento de los residuos gaseosos secundarios. La utilización del potencial energético del metano para generación de energía eléctrica puede ser rentable en caso de operaciones en gran escala.

- ***Degradación aeróbica:*** Este proceso consiste en promover la biodegradación bajo condiciones aeróbicas a temperaturas en el rango 40-65ºC, lo que permite transformar el residuo biodegradable en un sólido húmico de alto poder nutritivo para uso agrícola (*Compost*). Sin embargo, debe estar libre de metales pesados u otros compuestos que puedan afectar la calidad del suelo. Es muy utilizado para revalorizar los lodos obtenidos del tratamiento biológico de efluentes sanitarios.

| ATRIBUTOS DE LOS TRATAMIENTOS BIOLOGICOS DE RESIDUOS SOLIDOS | |
|---|---|
| VENTAJAS | Recuperación de subproductos.<br>Estabilización del residuo sólido<br>Reducción de volumen<br>Adecuado para residuos asimilables a RSU |
| DESVENTAJAS | Sensible a presencia de compuestos tóxicos o inhibidores.<br>Sensible a condiciones climáticas.<br>Complejidad operacional.<br>No adecuado para residuos peligrosos.<br>Costos de transporte (baja densidad, alta humedad) |

### 5.3.3) Destrucción Térmica de los Residuos Sólidos

Aquellos residuos sólidos que son inestables a altas temperaturas pueden ser destruidos mediante tratamiento térmico. Dicho tratamiento térmico puede ser efectuado en ausencia o en presencia de aire.

- **Proceso térmico en ausencia de oxígeno (Pirólisis)**

Cuando el tratamiento a alta temperatura se realiza en ausencia de oxígeno, los sólidos se destruyen mediante pirólisis, generando un residuo sólido (20%), gases condensables (60%) y no condensables (20%). El residuo sólido es rico en carbono y puede ser utilizado como combustible. La fracción no condensable está compuesta, principalmente, de $CO_2$, CO y $CH_4$ con un poder calorífico aceptable para ser utilizado como combustible. Los compuestos condensables forman una compleja mezcla de ácidos orgánicos y alquitranes y representan un insumo químico potencial. Los sistemas basados en pirólisis se utilizan mayoritariamente en el tratamiento de residuos lignocelulósicos, para producción de carbón vegetal.

- **Proceso térmico con déficit de oxígeno (Gasificación)**

Cuando el tratamiento térmico se realiza con una cantidad de oxígeno insuficiente para lograr una oxidación completa del material sólido, se genera gases con alto contenido de CO y $CH_4$ que pueden ser utilizados como combustible. Los gasificadores han sido empleados desde fines del siglo XIX, pero su uso ha decrecido desde la masificación de los combustibles derivados del petróleo. En la actualidad, existen diseños eficientes para llevar a cabo la gasificación de residuos orgánicos, que son competitivos respecto a otros sistemas térmicos.

- **Proceso térmico en presencia de oxígeno (Combustión)**

Si el proceso térmico se realiza en presencia de oxígeno en cantidades iguales o superiores al nivel estequiométrico ocurre una incineración del sólido, donde la reacción con el oxígeno lo transforma en cenizas inorgánicas y en gases residuales.

La composición de tales gases residuales depende de la composición química de los sólidos combustibles y de las condiciones de operación (ej. temperatura en la cámara de combustión, flujo de oxígeno). Dichos gases contienen $CO_2$, $H_2O$, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, $SO_2$ y otros compuestos derivados de la combustión. Por lo tanto, en la mayoría de los casos se debe incluir sistemas de depuración de gases (ej. ciclones, precipitadores electrostáticos, lavadores, adsorbedores, etc). Es conveniente neutralizar los gases ácidos (ej. HCl, $SO_2$) mediante tratamiento alcalino (ej.: neutralización con cal) para reducir los efectos de corrosión en los equipos de tratamiento de gases.

Es atractivo utilizar sistemas con recuperación de calor, producción de vapor y energía eléctrica, cuando la escala de operación así lo permite. Tal es el caso, por ejemplo, de las plantas de celulosa kraft y de los aserraderos, donde resulta altamente rentable instalar una caldera de poder y electro-generadores para utilizar el poder calorífico de las cortezas, finos de madera y lodos de tratamiento de residuos líquidos, generando vapor y energía eléctrica.

Cuando el poder calorífico de los residuos no es suficiente para lograr las altas temperaturas requeridas es necesario adicionar un combustible de alto poder calorífico (ej. gas natural, petróleo combustible).

En el caso de residuos sólidos orgánicos peligrosos, tales como solventes orgánicos, aceites gastados, hidrocarburos, bifenilos policlorados, residuos hospitalarios orgánicos y biocidas es conveniente llevar a cabo la incineración a altas temperaturas (sobre 950-1.100ºC).

Además del $CO_2$, vapor de agua y cenizas, se puede generar otros residuos gaseosos secundarios peligrosos. Por ejemplo, la incineración de residuos clorados produce ácido clorhídrico y compuestos organo-clorados volátiles. La mayor parte de las dioxinas y furanos emitidos a la atmósfera proviene de la combustión de residuos sólidos clorados. Igualmente, la presencia de residuos organofosfóricos puede originar $P_2O_5$ el que es altamente corrosivo. Por estos motivos, los sistemas de incineración de residuos peligrosos, incluyen estrictos sistemas de control de emisiones gaseosas e incorporan cámaras de combustión secundaria, para destruir los contaminantes formados en la combustión primaria. Con ello, se completa la oxidación de los compuestos orgánicos parcialmente oxidados y se incrementa el tiempo de residencia a alta temperatura. Los incineradores que operan a gran escala incluyen sistemas de depuración de gases de alta eficiencia para abatir los compuestos orgánicos volátiles y material particulado. Se deben utilizar sistemas eficientes para remoción de partículas (ej. filtros, precipitadores electrostáticos) y depuradores de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Los residuos secundarios generados por estos sistemas de tratamiento deben ser tratados como residuos peligrosos ya que pueden contener metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos.

Los sistemas de alimentación de los hornos dependen de las características físicas de los residuos a tratar. Si estos son fluidos (por ejemplo, solventes agotados, lodos) se pueden utilizar sistemas de alimentación por inyección, que permiten atomizar el residuo y facilitar su combustión. Es fundamental mantener un estricto control de la

temperatura y de la alimentación de oxígeno, para evitar la formación de contaminantes secundarios parcialmente oxidados. Los hornos utilizados con mayor frecuencia a escala industrial son los hornos rotatorios y de lecho fluidizado.

- *Hornos Rotatorios:* Este tipo de hornos permite incinerar residuos combustibles, incluyendo aquellos con altos contenido de agua. Su diseño es muy similar a los hornos rotatorios utilizados en las plantas de cemento y de celulosa kraft. En muchos países, se utilizan los hornos de dichas plantas para la destrucción de aceites y solventes orgánicos residuales. Sin embargo, el residuo combustible debe ser tratado previamente para satisfacer los requerimientos de calidad de esos sistemas (ej. eliminar el agua emulsificada, eliminación de impurezas metálicas).

- *Hornos de Lecho Fluidizado:* Estos son utilizados para un amplio rango de residuos sólidos. Se requiere una granulometría lo más homogénea posible para mantener buenas condiciones de operación (es común la utilización de molinos para reducción de tamaño de los residuos). El aire de combustión se inyecta desde el fondo, a la velocidad de fluidización de los sólidos. Se debe diseñar un sistema para recolectar los sólidos que salen con los gases de combustión y retornarlos al horno.

En general, es conveniente separar las fracciones no combustibles (ej. metales, vidrios y otros materiales inorgánicos) previo al tratamiento térmico. De este modo, se facilita la operación y el manejo de los residuos secundarios.

| ATRIBUTOS DE LA DESTRUCCION TERMICA DE RESIDUOS SOLIDOS | |
|---|---|
| VENTAJAS | Potencial integración energética.<br>Destrucción efectiva de los contaminantes.<br>Reducción de volumen.<br>Residuo sólido estable.<br>Tecnologías establecidas en el mercado.<br>Adecuado para residuos orgánicos peligrosos. |
| DESVENTAJAS | Generación de residuos gaseosos que requieren tratamiento.<br>Generación de residuos sólidos secundarios, provenientes del tratamiento de gases residuales.<br>Alta complejidad operacional.<br>Altos costos de operación.<br>Necesidad de monitoreo de emisiones gaseosas.<br>Altos requerimientos de inversión.<br>Requerimiento de combustibles adicionales. |

### 5.3.4) Tratamiento Físico-Químico de Residuos Peligrosos

Algunos residuos sólidos peligrosos que presentan características de toxicidad,

corrosión o reactividad pueden ser neutralizados mediante reacciones químicas ácido-base y oxidación-reducción. Los residuos peligrosos que generalmente se tratan mediante este tipo de procesos son: residuos ácidos o alcalínos, aceites gastados, residuos orgánicos aromáticos emulsionados, lodos metálicos, lodos sulfúricos y clorhídricos, lodos cianurados, lodos con cromato, entre otros.

- *Neutralización Química*: Aquellos residuos peligrosos que presentan niveles de pH extremos (ej. $H_2SO_4$, HCl, $HNO_3$, NaOH) deben ser neutralizados mediante adición de álcalis o ácidos, según corresponda.

- *Oxidación Química:* Se utiliza cuando los componentes peligrosos orgánicos e inorgánicos presentes en el residuo son oxidables a formas inocuas o más susceptibles de ser separadas y destruidas posteriormente. Como agente oxidante se utiliza cloro molecular, hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, ozono u oxígeno. Por ejemplo:
  - Eliminación de cianuro, mediante la oxidación con $Cl_2$ para formar $CO_2$ y $N_2$.
  - Destrucción de compuestos orgánicos aromáticos mediante aplicación de ozono o peróxido
  - Precipitación de metales pesados en forma de óxidos

- *Reducción Química:* En muchos casos, los compuestos peligrosos se pueden transformar en moléculas inocuas mediante reducción química. Por ejemplo, el cromato ($Cr^{+6}$) puede ser reducido a $Cr^{+3}$, que es mucho menos tóxico e insoluble en medio alcalino. Se debe utilizar agentes reductores compatibles con la naturaleza del contaminante peligroso que se desea destruir. Dada las características no selectivas de muchos agentes químicos, se debe prevenir la formación de compuestos secundarios tóxicos.

En algunos casos, se genera un residuo sólido secundario que debe ser manejado adecuadamente (ej. precipitación de óxidos metálicos).

| ATRIBUTOS DE LOS TRATAMIENTOS FISICO QUIMICOS | |
|---|---|
| VENTAJAS | Reducción de la peligrosidad del residuo.<br>Inertización. |
| DESVENTAJAS | Altos costos de operación<br>Complejidad operacional.<br>Es complicado a gran escala de operación. |

### 5.3.5) Estabilización y Solidificación de Residuos Peligrosos

Aquellos residuos sólidos peligrosos que tienen tendencia a disolverse en agua o a volatilizarse (ej. metales pesados solubles en agua, solventes orgánicos volátiles)

deben ser estabilizados adecuadamente.

- ***Estabilización***

Se utiliza aditivos para reducir la movilidad y la toxicidad del residuo. Existe una amplia variedad de métodos para estabilizar los componentes tóxicos y/o con mayor capacidad migratoria, dependiendo de la naturaleza física y química de dichos compuestos. En muchos caso, se utiliza aditivos para reducir la solubilidad o la volatilidad de los compuestos tóxicos.

- ***Solidificación***

Se utiliza agentes solidificantes que se mezclan con el residuo sólido peligrosos en cantidades suficientes como para formar una matriz sólida estable e inerte, que reduce la permeabilidad del residuo. Las matrices sólidas más utilizadas son: cemento, asfalto, vidrio y polímeros plásticos. La inmovilización permite incrementar los niveles de seguridad ya que reduce sustancialmente la capacidad de transporte de los contaminantes fuera del lugar de confinamiento.

| ATRIBUTOS DE LA ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION | |
|---|---|
| VENTAJAS | Reducción de la peligrosidad del residuo.<br>Reduce la movilidad migratoria de los contaminantes.<br>Permite un confinamiento con menor impacto ambiental potencial. |
| DESVENTAJAS | Altos costos de insumos fijadores/solidificantes<br>Complejidad operacional.<br>Es complicado a gran escala de operación. |

## 5.4) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS GASEOSOS

En la industria, los contaminantes atmosféricos se generan a partir de los procesos de combustión, procesamiento químico o biológico, o durante la transformación de las materias primas. Existen dos mecanismos generales para abatir la carga contaminante de las emisiones gaseosas, a saber:

- Separar los contaminantes de aquellos gases inofensivos y transferirlos a fase líquida o sólida

- Convertir los contaminantes en productos inocuos que puedan descargarse en la atmósfera con mínimo impacto ambiental

En el primer caso, se retira el contaminante de la fase gaseosa, mediante procesos físicos y físico-químicos tales como absorción, adsorción, precipitación o sedimentación. De este modo, se genera una nueva linea residual que requiere atención. Tal es el caso de la eliminación de material particulado mediante ciclones o precipitadores electrostáticos, donde se obtiene un sólido residual formado por las partículas retiradas de la fase gaseosa.

Por otra parte, los sistemas de depuración basados en procesos químicos incluyen reacciones de oxidación y reducción para transformar el contaminante original en un compuesto inocuo. El sistema más utilizado se basa en la oxidación del contaminante utilizando aire. Por ejemplo, los compuestos orgánicos volátiles pueden ser transformados en $CO_2$ y $H_2O$ mediante combustión. Si hay presencia de S (por ejemplo, en los mercaptanos) y N (por ejemplo, aminas) en las moléculas orgánicas, se forma también $SO_2$ y $NO_X$ como producto de combustión, respectivamente. En los procesos de transformación química se debe evitar a toda costa la formación de compuestos residuales de mayor impacto que los contaminantes originales. Por ejemplo, la combustión de compuestos clorados puede generar compuestos volátiles tóxicos y corrosivos.

En la práctica, los sistemas de depuración de gases presentan una combinación de operaciones unitarias destinadas a eliminar los diferentes contaminantes de la corriente residual, en forma secuencial. Por ejemplo:

1. Eliminación de material particulado de mayor tamaño, mediante ciclones.
2. Eliminación de material particulado fino, mediante filtros de alta eficiencia o precipitadores electrostáticos.
3. Eliminación de $SO_2$, mediante absorción alcalina o adsorción con limonita.
4. Eliminación de compuestos orgánicos volátiles (por ejemplo, compuestos odoriferos), mediante combustión a alta temperatura.

A continuación, se revisa los principales sistemas de tratamiento de residuos gaseosos de origen industrial.

### 5.4.1) Sistemas Para Remoción de Material Particulado

Si la corriente gaseosa residual contiene material particulado, se puede utilizar métodos de separación de sólidos de las corrientes gaseosas, tales como ciclones, filtros, precipitadores electrostáticos y lavadores.

**a) Ciclones**

Son ampliamente utilizados para capturar cenizas y polvos. Se basan en la acción de la fuerza centrífuga sobre la partícula. Están formados por un cuerpo principal cilíndrico-cónico, donde los gases son alimentados tangencialmente (Figura 5.8). Al interior del equipo se forman dos vórtices: uno periférico (descendente) y otro central (ascendente). Las partículas más pesadas son lanzadas hacia las paredes, depositándose en la parte inferior del cono. El resto del gas forma un vórtice central, que circula hacia arriba y sale por la parte superior del cilindro.

La capacidad de separación del ciclón aumenta con la velocidad tangencial de alimentación. El factor de separación ($S$) depende de la velocidad tangencial ($v_T$) y del diámetro del cilindro ($d$) de acuerdo a:

$$S = \frac{2 v_T^2}{d\ g}$$

Los parámetros típicos para ciclones convencionales son $d$ = 30 cm y $v_T$ = 15 (m/s). En la práctica, el valor de S varía en el rango 10-2.500, siendo menor en aquellos sistemas de mayor diámetro y menor pérdida de carga. Los sistemas de ciclones de alta eficiencia generalmente contienen varios cilindros de diámetro pequeño, normalmente, entre 10 y 25 cm, instalados en paralelo.

La pérdida de carga ($\Delta P$) representa un importante parámetro en el diseño de un ciclón y se puede estimar en base a:

$$\Delta P = \frac{K F_G^2 P \rho_G}{T_G}$$

donde $K$ es un parámetro empírico que depende del diámetro del ciclón, $P$ es la presión absoluta, $F_G$, $\rho_G$ y $T_G$ son el flujo volumétrico, la densidad y la temperatura del gas, respectivamente. Las pérdidas de carga son menores a mayores diámetros. Al duplicar el diámetro del ciclón, la pérdida de carga se reduce en un factor de 10. En la Tabla 5.3 se compara la capacidad de separación de los ciclones convencionales y los de alta eficiencia, para diferentes rangos de tamaño de partículas.

**TABLA 5.3: COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SEPARACIÓN ENTRE**

**CICLONES CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA**

| | SÓLIDOS REMOVIDOS (% EN PESO) | |
|---|---|---|
| ***Tamaño de Partícula*** | **Ciclón Convencional** | **Ciclón de alta eficiencia** |
| < 5 μm | < 10 % | 40-70 % |
| 5-20 μm | 50-60 % | 80-95 % |
| 20-40 μm | 80-95 % | 95-99 % |
| > 40 μm | 95-98 % | > 99% |

La principal ventaja de los ciclones radica en su gran sencillez de construcción y bajos costos de instalación, operación y mantención; además, permiten recuperar los sólidos secos. Sin embargo, pueden sufrir deterioro debido a la circulación de sólidos abrasivos a alta velocidad, y presentan una baja eficiencia de remoción para granulometrías pequeñas (menores de 10 μm).

**b) Filtros**

Son ampliamente utilizados a escala industrial. El gas se hace circular a través de la unidad filtrante, donde los sólidos quedan retenidos. A medida que la operación transcurre, se forma una película de sólidos que incrementa la capacidad de filtración, pero que aumenta progresivamente la pérdida de carga. Por lo tanto, los filtros deben ser limpiados periódicamente, ya que una vez que se colmatan, la pérdida de carga puede ser 10 veces mayor que la del filtro limpio.

Los sistemas de limpieza incluyen: Sistemas mecánicos por vibración, uso de aire en contracorriente y choques de aire comprimido. Generalmente, los filtros se diseñan en módulos separados, de modo que algunos mantengan su operación, mientras otros se someten a limpieza. Como medio filtrante, se utilizan filtros de fibras naturales (lana, algodón) y fibras sintéticas (poliéster, polipropileno, poliamida, PVC, fibra de vidrio). Los factores que determinan su selección son: costos, permeabilidad al aire, resistencia mecánica, resistencia contra ácidos y álcalis, hidrofobicidad y resistencia a altas temperaturas.

Se puede lograr altas eficiencias de depuración, llegando a remover el 100% de las partículas de 1 μm. Además, se recupera el producto seco y no se generan efluentes líquidos. Sin embargo, su uso está restringido por las altas temperaturas (generalmente, hasta un máximo de 250ºC para la fibra de vidrio) y los peligros de explosiones e incendios en el caso de polvos de alta combustibilidad. Son mucho más caros que los ciclones.

**c) Precipitación electrostática**

Se basa en la acción de un campo eléctrico sobre las partículas sólidas cargadas eléctricamente. Las partículas son cargadas mediante una corriente de electrones que circula entre los electrodos por efecto corona, gracias al alto voltaje existente entre ellos (del orden de 60 kvolts DC). Las partículas son atraídas hacia electrodos colectores, donde se depositan y separan del resto de la corriente gaseosa. El gas

fluye en dirección paralela a los electrodos (Figura 5.9).

Son altamente eficientes para remover partículas de tamaño pequeño, incluso menores de 1 μm y presentan mínimas pérdidas de carga. Puede recolectar más del 99% de las cenizas de los gases de combustión.

**TABLA 5.4: EFECTO DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA EFICIENCIA DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS**

| TAMAÑO DE PARTÍCULA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
|---|---|
| < 5 μm | 70-80 % |
| 5-20 μm | 95-99 % |
| 20-40 μm | 100 % |
| > 40 μm | 100 % |

El área total de los electrodos colectores, *A* , se puede estimar a partir de la relación de Deutsch-Anderson:

$$A = \frac{F}{v} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

Donde:

η = es la eficiencia de remoción (expresada como fracción en peso de sólidos recolectados).

*F* = es el flujo volumétrico de gas a través del electrofiltro ($m^3/s$).

*V* = es la velocidad de la partícula hacia el electrodo (se debe obtener empíricamente; generalmente, es del orden de 0,1 (m/s)

Se puede observar que el área de los colectores es muy sensible a la eficiencia requerida. Así, para aumentar la eficiencia de remoción de 90 a 99 % se debe duplicar el área de electrodos colectores, mientras que para aumentar de 90 a 99,9%, se requiere triplicar dicha área. El área transversal de la carcasa debe ser tal que la velocidad media del gas esté dentro del rango 0,7 – 2,5 (m/s). Las principales desventajas de estos equipos radican en su pérdida de eficiencia frente a condiciones variables de temperatura, flujo y composición del gas. Además, la presencia de partículas de alta resistividad afecta negativamente la eficiencia de recolección.

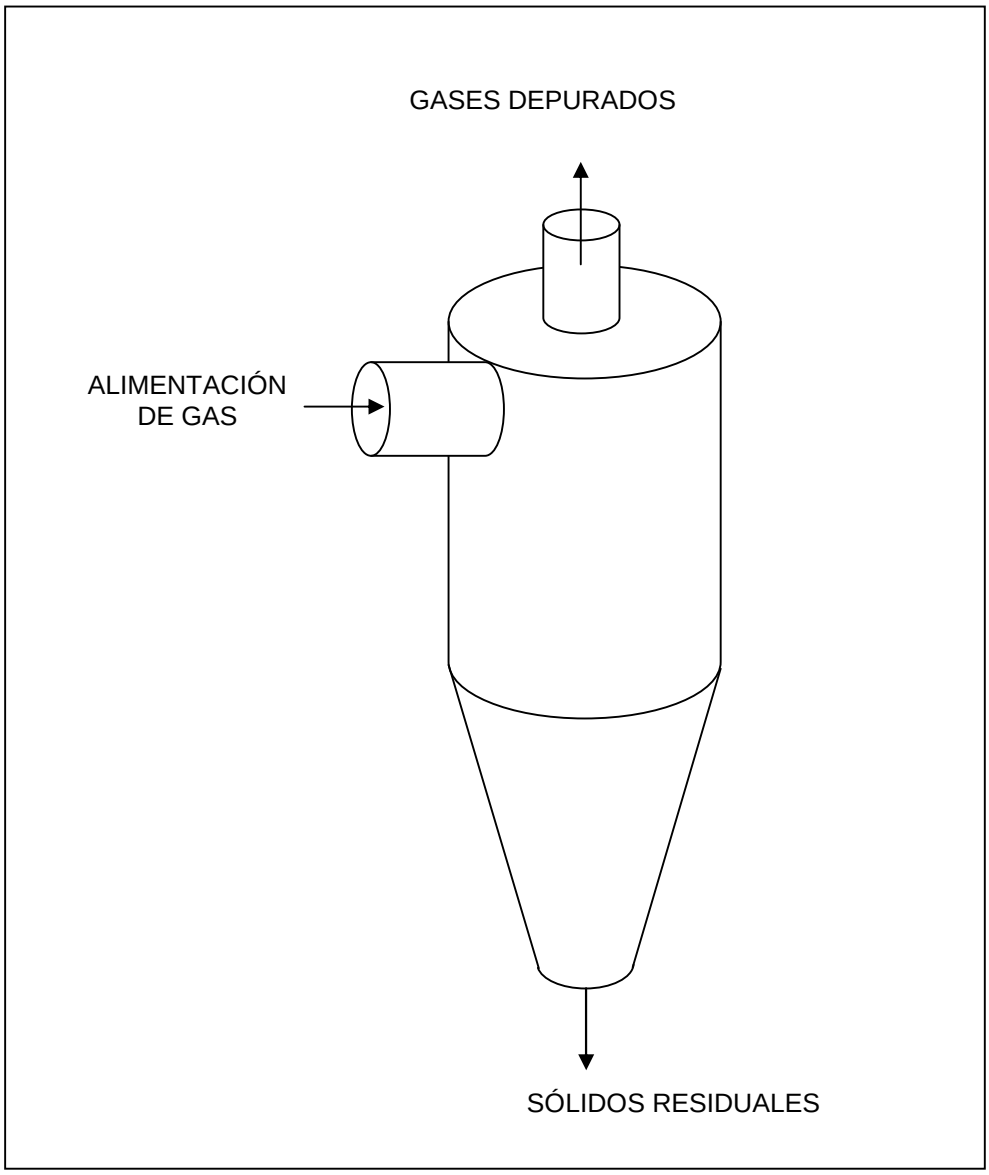



**FIGURA 5.8: CICLÓN PARA ELIMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN GASES**

Si la cantidad de finos es muy grande, es conveniente instalar primero un ciclón antes del precipitador electrostático, para reducir la acumulación de material particulado al interior del equipo. Los precipitadores electrostáticos son muy caros y tienen costos de operación elevados, debido a los altos requerimientos de energía eléctrica. Finalmente, este tipo de equipos no es recomendable cuando se tiene presencia de compuestos combustibles o explosivos.

**d) Lavadores con líquido (*scrubbers*)**

Aquí se incluyen diversos equipos basados en la eliminación del material particulado, mediante el uso de un líquido absorbente. Cualquier compuesto gaseoso que sea soluble en dicho líquido, también puede ser removido de la corriente gaseosa principal. Ello representa una ventaja sobre los sistemas de depuración secos, descritos en secciones anteriores. Además, no presentan limitaciones debido a la presencia de compuestos combustibles y explosivos, y tienen mayor tolerancia a variaciones de la temperatura del gas. Sin embargo, la principal desventaja se debe a la generación de un residuo líquido que contiene el contaminante removido del gas. En general, los costos globales de tratamiento utilizando estos sistemas son altos cuando se requiere una alta eficiencia de depuración.

Los diferentes diseños varían de acuerdo a la forma como se efectúa el contacto entre la corriente gaseosa que contiene el material particulado y el líquido lavador. Entre estos se destacan:

- *Torres de aspersión*: El líquido se alimenta en la parte superior en forma de lluvia, el que entra en contacto en contracorriente con el gas que circula hacia arriba. Generalmente, gran parte del líquido se recircula. Mientras menor sea el tamaño de las gotas de líquidos, mayor es el área de contacto, con una mayor eficiencia de remoción de partículas sólidas. Se puede remover eficientemente partículas de pequeño tamaño, en el rango 1-2 μm.

- *Lavadores ciclónicos:* El gas se alimenta en forma tangencial, en forma similar a los ciclones secos. El agua de lavado se alimenta en forma de pequeñas gotas desde la parte superior del equipo (o desde los lados hacia el centro). De este modo, se combina el efecto de la fuerza centrífuga y el impacto entre el sólido y el líquido.

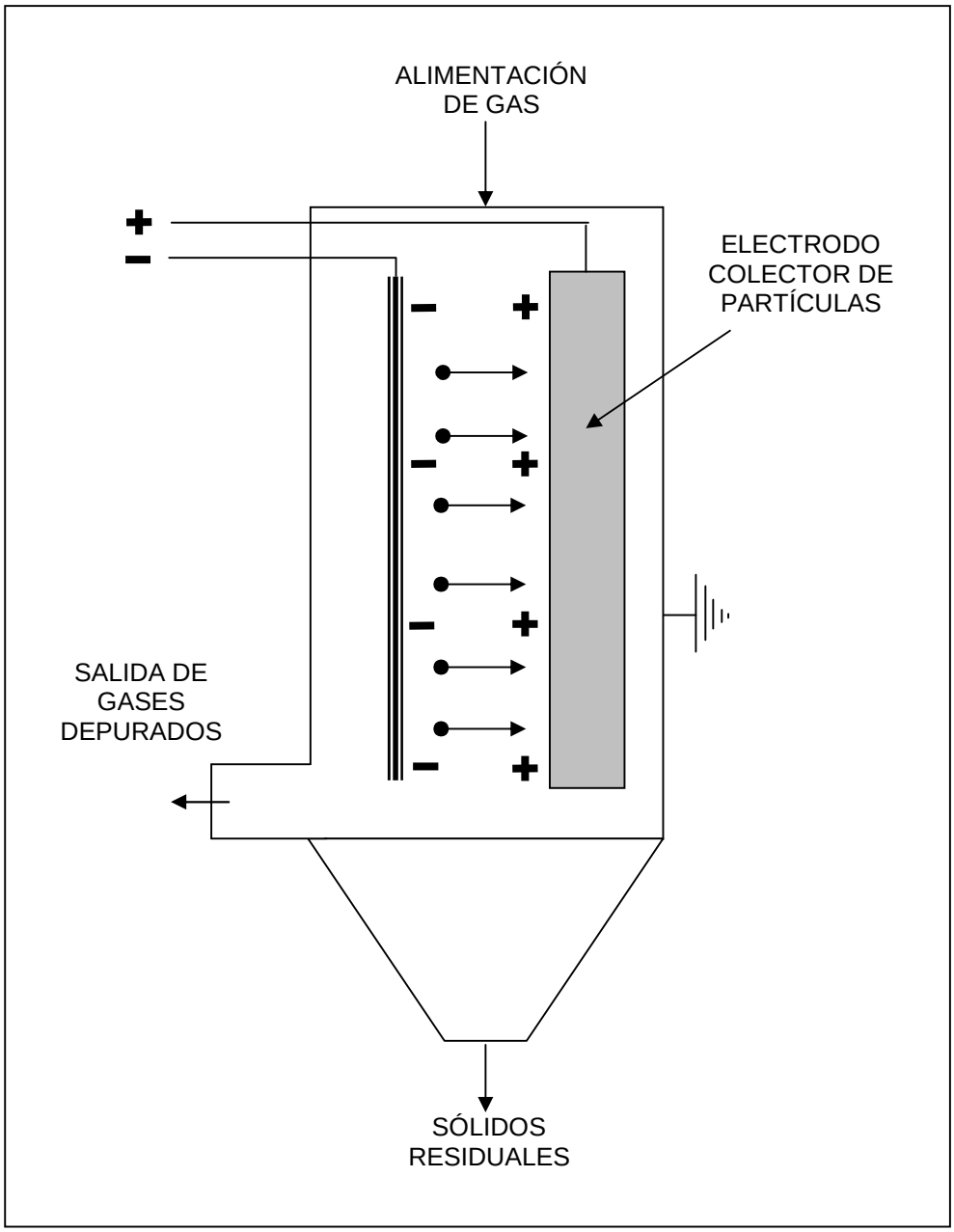



**FIGURA 5.9: ESQUEMA DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO**

*Lavadores inerciales (Venturi):* El gas se hace pasar a través de una contracción donde aumenta su velocidad. En el punto donde la velocidad alcanza un valor máximo, se inyecta agua de lavado, la que se dispersa en múltiples gotas de pequeño tamaño, generando una gran área de contacto. El material particulado choca violentamente con las gotas de agua. La eficiencia de depuración depende directamente de la velocidad del gas, la que se debe mantener al máximo valor posible. Este tipo de lavadores tiene una mayor eficiencia de remoción de material particulado que los otros diseños, alcanzando valores superiores a 99% para partículas de 1 μm y 90-95% para tamaños menores de 1 μm. Debido a la gran pérdida de carga que se produce, los costos de operación son más altos que para los otros tipos de lavadores.

### 5.4.2) Sistemas para la Remoción de Compuestos Gaseosos

Los compuestos gaseosos contenidos en el gas residual, tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, ácido sulfídrico, amoniaco y compuestos odoríferos (mercaptanos y aminas volátiles), pueden ser eliminados en base a diferentes tipos de procesos físicos y químicos. A continuación, se describen los principios y aplicaciones de tales procesos.

#### a) Procesos Basados en Absorción (*scrubbers*)

Si el compuesto gaseoso es soluble en un líquido, se puede absorber y retirarlo en solución líquida. El agua es el medio absorbente más utilizado a escala industrial. En muchos casos, se agrega solutos al medio acuoso, tales como hidróxido de sodio o aminas, para incrementar la solubilidad del gas que se requiere absorber. Generalmente, se utiliza columnas de relleno para aumentar el área de contacto gas-líquido. Alternativamente, se pueden utilizar columnas de platos. El gas se hace circular en contracorriente con el líquido absorbente (Figura 5.10).

Estos procesos son utilizados en la eliminación de $SO_2$, $H_2S$ y compuestos orgánicos volátiles de las corrientes gaseosas residuales. Ya que el contaminante solamente cambia de fase, en muchos casos el líquido residual debe ser tratado antes de su vertido final, para cumplir con las normas de control ambiental.

En algunos casos, los procesos basados en absorción se implementan con vistas a recuperar el contaminante y reprocesarlo. Por ejemplo, la absorción selectiva de $H_2S$ para su utilización en la producción de azufre y sulfidrato de sodio. Ello implica agregar otras unidades para recuperar selectivamente el contaminante de interés.

En aquellos sistemas de absorción para la remoción de $SO_2$ de los gases residuales, se suele agregar CaO al líquido, lo que permite obtener sulfito de calcio de acuerdo a la reacción:

$$SO_2 + CaO + 2\,H_2O \longrightarrow CaSO_3 \cdot 2H_2O$$

Como alternativa, se puede utilizar $CaCO_3$ en vez de CaO. En ambos casos, se obtiene un lodo residual rico en $CaSO_3$, el cual debe ser tratado antes de su vertido

final. Generalmente, el tratamiento consiste en oxidar el $CaSO_3$ a $CaSO_4$ (yeso), ya que éste precipita con mayor facilidad y puede ser separado como residuo sólido o utilizado como materia prima para construcción.

También se puede utilizar $NaSO_3$ como absorbente, el cual forma $NaHSO_3$ en presencia de $SO_2$. Este se puede recuperar en forma concentrada, aplicando calor para producir su desorción, y ser utilizado para producir $H_2SO_4$ :

$$SO_2 + ½\ O_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

Alternativamente, el $SO_2$ reacciona con $H_2S$ para generar azufre en el proceso Claus:

$$2\ H_2S + SO_2 \longrightarrow 3\ S + 2\ H_2O$$

Este proceso es de mucho interés en las refinerías de petróleo ya que ambos compuestos representan un serio problema ambiental.

**b) Procesos Basados en Adsorción**

Se utiliza un sólido con capacidad para adsorber y retener selectivamente los compuestos que se desea retirar de la fase gaseosa. Como agentes adsorbentes se utilizan sólidos con alta superficie específica, como por ejemplo, carbón activado (del orden de 1.000 $m^2/g$). También se pueden utilizar zeolitas, que, a pesar de poseer un área específica menor (aproximadamente, 200 $m^2/g$), presentan una estructura porosa adecuada. Los sistemas basados en adsorción varían de acuerdo al tipo de contacto existente entre la fase gaseosa y la fase sólida:

- *Sistemas de Lecho Fijo:* Se utiliza columnas rellenas con adsorbente y el gas circula continuamente a través del lecho. A medida que los sólidos adsorben los contaminantes, su capacidad de adsorción se reduce gradualmente, hasta alcanzar el punto de saturación. Cuando la eficiencia de depuración alcanza un nivel muy bajo, el adsorbente debe ser cambiado por adsorbente fresco o reconstituído. La reconstitución del adsorbente saturado se logra frecuentemente mediante tratamiento térmico con vapor sobrecalentado; sin embargo, el contaminante desorbido se transfiere al vapor de agua, lo que requiere tratamiento posterior (por ejemplo, incineración). Cuando se requiere mantener una operación continua, se debe tener una torre de reemplazo, de modo que ésta entre en operación mientras se procede a la reposición del adsorbente colmatado.

- *Sistema de Lecho Fluidizado:* Este sistema permite un contacto íntimo entre el sólido adsorbente y el gas. Se debe utilizar un sistema de separación sólido-gas para recuperar las partículas de material adsorbente arrastradas por el gas.

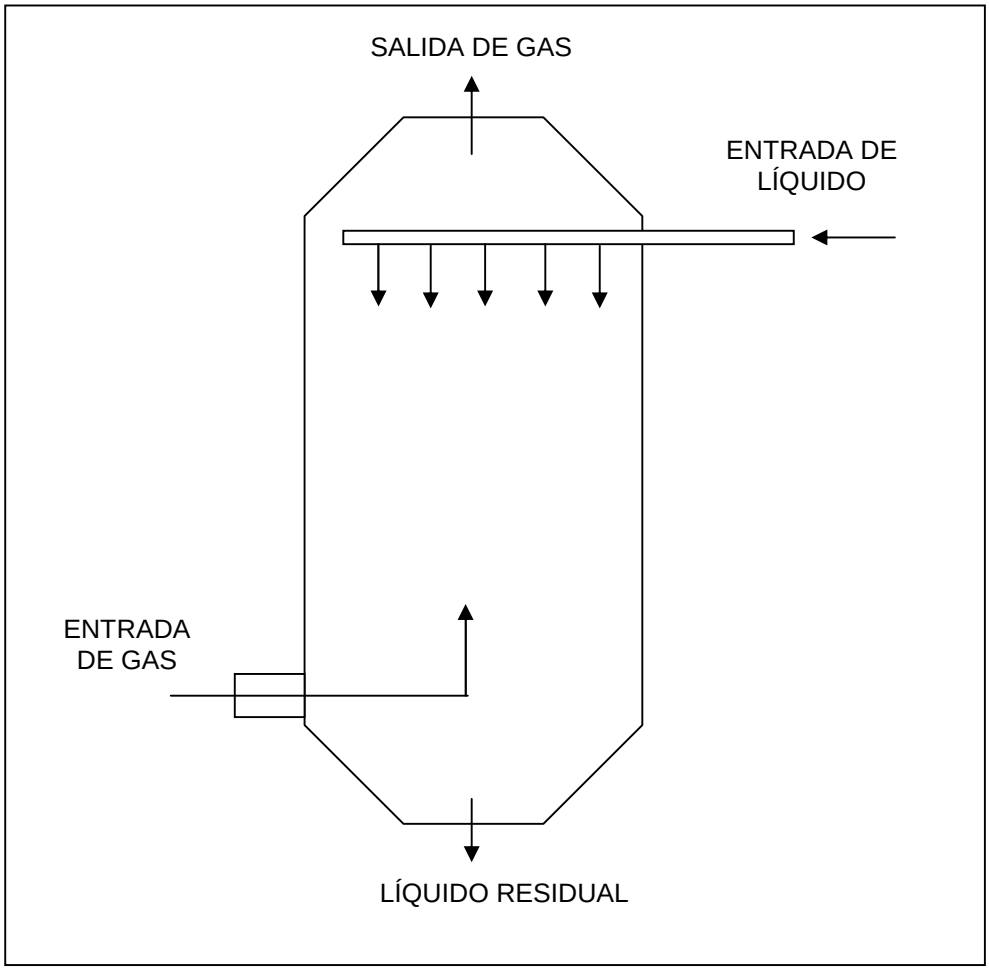



**FIGURA 5.10: SISTEMA DE ABSORCIÓN EN CONTRACORRIENTE**

**c) Sistemas Basados en Oxidación**

Estos sistemas se utilizan para destruir compuestos susceptibles a ser oxidados a formas químicas de menor impacto ambiental, mediante reacciones de oxidación. Generalmente, el agente oxidante es el $O_2$ del aire.

La combustión es uno de los métodos más utilizados para eliminar compuestos orgánicos volátiles presentes en el gas. La oxidación de dichos contaminantes resulta en la formación de $CO_2$, vapor de agua y óxidos de otros precursores oxidables presentes en la corriente gaseosa. En este sentido, se debe prevenir la formación de compuestos nocivos. Por ejemplo, la combustión de compuestos orgánicos clorados puede derivar en la producción de dioxinas, si las condiciones de operación no son controladas cuidadosamente.

Generalmente, el poder calorífico del gas no es suficientemente alto como para mantener una combustión autosustentada, por lo que se debe utilizar un combustible adicional (por ejemplo, propano, gas natural). Algunos de los sistemas más utilizados en la industria incluyen:

- *Antorchas:* Los sistemas de combustión por antorchas se pueden utilizar cuando los contaminantes a destruir se encuentran en concentraciones que están dentro de los límites de inflamabilidad de la mezcla. Se utiliza con frecuencia en las refinerías de petróleo y en plantas petroquímicas. En esos casos, se requiere un buen control de las condiciones de operación, ya que se debe minimizar la generación de humos, debido a la polimerización de hidrocarburos por craqueo a alta temperatura. Para mantener la temperatura de combustión a niveles inferiores a los de la temperatura de craqueo se puede inyectar vapor de agua, o se agrega aire como diluyente de la mezcla de gases.

- *Incineradores:* Son hornos a elevadas temperaturas generalmente calentados por llama directa por donde se hacen circular los gases a tratar. Se utiliza para destruir compuestos orgánicos volátiles. Los factores críticos que determinan la eficiencia de los incineradores son:

  - La temperatura de la cámara de combustión
  - El tiempo de residencia de los gases en la cámara
  - Las características hidrodinámicas del sistema
  - La cantidad de $O_2$ disponible

  Estos factores son difíciles de controlar, sobre todo en situaciones donde la composición de la carga presenta alta variabilidad.

- *Oxidación Catalítica:* Existen hornos o reactores de oxidación que utilizan catalizadores para acelerar las reacciones de oxidación y mejorar la eficiencia del proceso. Normalmente, un reactor tubular contiene un catalizador sólido que adsorbe el gas y facilita su oxidación, a una temperatura más baja que en la combustión convencional. Permite eliminar compuestos orgánicos cuando estos se encuentran en pequeña concentración. Un ejemplo de este tipo de procesos es la oxidación de $SO_2$ a $SO_3$ utilizando $V_2O_5$ como catalizador. El

$SO_3$ puede formar $H_2SO_4$ en presencia de agua. En aquellos procesos que utilizan combustibles que tienen un significativa contenido de azufre, se puede llevar a cabo la combustión en un lecho fluidizado de $CaCO_3$, lo que facilita la oxidación del azufre a $CaSO_4$ (yeso), minimizando así las emisiones de $SO_2$.

**d) Sistemas Basados en Reacciones de Reducción**

Estos se basan en reacciones químicas entre el contaminante y un agente reductor, que lo transforman en una forma química de menor impacto ambiental.
El gas residual se mezcla con una corriente con el gas reductor en un reactor a alta temperatura. Por ejemplo, para eliminar los $NO_X$ se utiliza $NH_3$, $H_2$ o CO como agentes reductores, a temperaturas sobre 900ºC, en presencia de catalizadores. Los $NO_X$ generalmente se encuentran en baja concentración en las corrientes de gas residual, lo que dificulta su separación por absorción.

En el caso de los $NO_X$ generados durante los procesos de combustión, la mayoría de las técnicas para su abatimiento se basan en el control de las condiciones de operación. En los sistemas de combustión, gran parte de los $NO_X$ se forman a partir de la reacción entre el $N_2$ y el $O_2$ del aire a alta temperatura. Generalmente, se opera con un 10-20% de exceso de aire para asegurar una combustión completa y evitar la formación de CO e hidrocarburos volátiles; sin embargo, ello permite la oxidación del $N_2$ que resulta en la formación de $NO_X$. Al reducir dicho exceso de aire, se puede reducir la emisión de $NO_X$. Los sistemas de combustión en dos etapas (con dos cámaras de combustión en serie) también son usados con tales fines, ya que se puede usar una menor cantidad de aire para completar la combustión y, al mismo tiempo, mantener una menor temperatura de llama. La reducción de la temperatura de combustión tiene un gran efecto en prevenir la formación de $NO_X$. El diseño de los quemadores en las calderas modernas privilegia una menor temperatura de llama, con tales fines.

### 5.4.3) Descarga de los Gases Residuales a la Atmósfera

Las descargas gaseosas derivadas de la combustión y de los sistemas de depuración de gases, se hacen a través de chimeneas, las que no solamente ayudan a mantener el flujo de gases, sino que permiten dispersar los gases en la atmósfera. Tales emisiones deben respetar las normas de calidad de aire, por lo que la altura y diámetro de la chimenea deben ser cuidadosamente diseñados, tomando en consideración los factores meteorológicos locales. Para tales efectos, se utilizan modelos de dispersión, tales como aquellos descritos en el Capítulo 3.

**BIBLIOGRAFÍA**


Davis M., Cornwell D., "Introduction to Environmental Engineering". 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)

De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Eilbeck W.J., Mattock G., "Chemical Processes in Waste Water Treatment". Ellis Horwood. New York (1987)

Itsemap Ambiental, "Implicación Ambiental de la Incineración de Residuos Urbanos, Hospitalarios e Industriales", Fundación MAPFRE, Madrid (1994)

Kelly G., "Environmental Engineering". McGraw Hill International Editions., Singapore (1998)

LaGrega M.D., Buckingham P.L., Evans J.C.,"Hazardous Waste Management", McGraw-Hill International Editions, New York (1994).

Metcalf & Eddie, "Waste water Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". 3ªed., McGraw Hill Inc., New York (1991).

Perkins H.C., "Air Pollution", McGraw Hill Book Co., New York. (1974).

Perry R.H., Green D. "Perry's Chemical Engineer's Handbook", 7ªed., McGraw Hill, New York (1998).

Ramahlo R.S., "Tratamiento de Aguas Residuales", Editorial Reverté SA, Barcelona (1991).

Springer A.M., "Industrial and Environmental Control: Pulp and Paper Industry", 2ªed., TAPPI Press, Atlanta (1993).

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., "Gestión Integral de Residuos Sólidos", Vol. I y II., McGraw Hill, Madrid (1994).

Ulrich G.D., "Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química". McGraw Hill, México (1992).

Young., R., "Handbook of air pollution analysis", J. Wiley & Sons, New York. (1997).

# CAPÍTULO 6

# PRINCIPIOS DE DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

## 6.1) EL CONCEPTO DE PROCESOS LIMPIOS

Durante muchos años, gran parte de los esfuerzos de control ambiental en la industria, estuvieron centrados, principalmente, en el tratamiento de los residuos líquidos, gaseosos y sólidos. Sin embargo, las graves crisis ambientales sufridas por muchos países industrializados en las últimas décadas, han modificado drásticamente tales enfoques.

Los problemas ambientales generados por las emisiones de residuos de producción, por el excesivo consumo de recursos naturales y por los accidentes en el transporte y procesamiento de materiales peligrosos, han tenido repercusiones que van más allá de las fronteras de los países individuales. Ello se ha traducido en fuertes presiones económicas y legales, a nivel internacional, para lograr niveles de desempeño ambiental cada vez más exigentes, en todos los sectores industriales.

En particular, los crecientes costos asociados al tratamiento y vertido de residuos, han motivado la elaboración de nuevos enfoques de control ambiental. La Figura 6.1 muestra claramente, que los residuos generados en los procesos productivos son pérdidas netas de recursos materiales y energéticos, que no han sido incorporados en el producto final. Resulta lógico, por lo tanto, llevar a cabo todos los esfuerzos necesarios, ***para reducir tales pérdidas de recursos e incrementar la productividad global del proceso.*** De este modo, se logra una reducción de los residuos generados y también una disminución de los recursos consumidos por unidad de producto.

Este concepto de ***eco-eficiencia*** es uno de los pilares de las estrategias modernas de control ambiental, ya que al incrementar la eficiencia de utilización de los recursos, se reduce el impacto ambiental del proceso de producción:

$$\text{ECO-EFICIENCIA} = \frac{\text{PRODUCTOS}}{\text{RECURSOS CONSUMIDOS}}$$

***Las nuevas estrategias para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial, se basan en un enfoque integral preventivo, que pone énfasis en una mayor eficiencia en la utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad.***

Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión, orientadas a reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos en su fuente misma, reducir los riesgos operacionales y otros posibles aspectos ambientales adversos, a través de todo el proceso de producción.

Esta estrategia preventiva e integral, tiene la ventaja de que considera el control ambiental como parte integral del proceso de producción, que surge como consecuencia de una gestión productiva más eficiente. Efectivamente, el control ambiental coincide con un mejor aprovechamiento de las materias primas y de la energía utilizadas, en base a un eficiente sistema de gestión, donde se aprovecha al máximo el potencial de la tecnología existente y se identifican, permanentemente, oportunidades de mejoramiento en todas las áreas y actividades de la empresa.

Las modificaciones tecnológicas e innovaciones a los procesos industriales aparecen como conclusión de un proceso de búsqueda de un mejor desempeño productivo, que persigue reducir costos e incrementar la eficiencia de dichos procesos, generando un aumento en los beneficios económicos de la empresa.

Todos estos elementos se integran en el concepto de Procesos Limpios[1]. Lo que en la década de los 80 surgió como un nuevo paradigma de los países de mayor desarrollo industrial, se ha constituido en un principio fundamental para el desarrollo de la actividad industrial, en el contexto de una real sustentabilidad económica y ambiental.

***Los Desafíos*:**
La Agenda 21 acordada en Río de Janeiro y las conclusiones del Tercer Foro de Desarrollo Productivo realizado en 1997, han fomentado la producción limpia como componente básico de una política de desarrollo económico-social. Estas políticas tienen como propósito general catalizar, incentivar y facilitar el aumento de la competitividad y el desempeño ambiental de las empresas, apoyando el desarrollo de la gestión ambiental preventiva para generar procesos de producción más limpios, incluyendo el uso eficiente de la energía y el agua. En concreto, ello implica:

- Promover la eficiencia de los procesos productivos, mejorando la competitividad de la empresa.
- Promover la prevención de la contaminación, minimizando la generación de residuos y emisiones lo más cercanamente a la fuente.
- Promover el uso eficiente de la energía y el agua.
- Incentivar la reutilización, la recuperación y el reciclaje de residuos
- Contribuir al desarrollo de tecnologías de abatimiento más eficientes, cuando éstas sean la única opción económicamente viable.

[1] Otros sinónimos utilizados comúnmente para expresar este concepto son : "producción limpia", "tecnologías limpias", "procesos menos contaminantes".

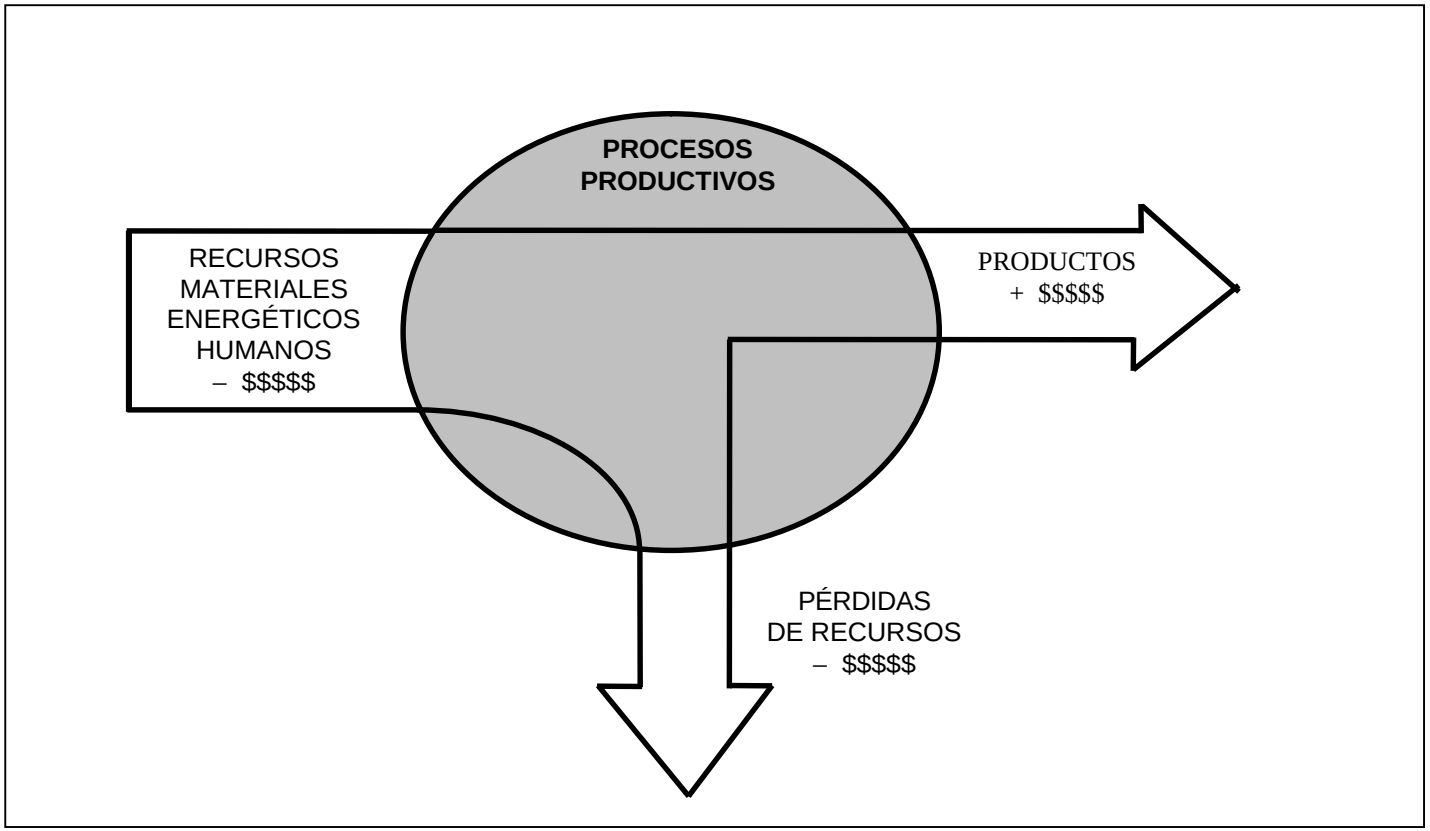



**FIGURA 6.1: BALANCE DE RECURSOS EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS**

Con ello se pretende enviar claras señales al sector industrial acerca de la necesidad de mejorar los procesos para un real aprovechamiento de todos los recursos, actuales y potenciales. Cada residuo debe ser visto como una oportunidad de nuevos negocios, de nuevos subproductos. Cada pérdida debe ser identificada y minimizada, pues atenta directamente contra la competitividad de la empresa. Cada producto fuera de especificación o sub-estándar debe ser visto como una amenaza a la existencia de la empresa.

## 6.2) DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

El diseño de procesos limpios, se basa en el uso de las herramientas clásicas de la ingeniería, para concebir un esquema de producción, que considere tanto los aspectos técnico-económicos como los ambientales.

En este sentido, la experiencia acumulada en las últimas décadas ha permitido establecer algunos principios básicos orientadores, dentro de los cuales, se deben buscar las oportunidades para satisfacer los objetivos económicos y ambientales. La Tabla 6.1 resume tales principios técnicos generales, algunos de los cuales se exponen con mayor detalle en la Sección 6.4.

**TABLA 6.1: PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE PROCESOS LIMPIOS**

| |
|---|
| • Utilizar la evaluación de impacto ambiental como herramienta en todas las fases del diseño. |
| • Considerar los impactos ambientales inducidos por el proyecto, en todo el ciclo de vida del producto |
| • Minimizar la generación de residuos en su fuente, a partir de tecnologías de mayor eficiencia y de una gestión de producción adecuada. |
| • Seleccionar recursos materiales y energéticos con menor impacto ambiental potencial. |
| • Reducir los requerimientos materiales y energéticos, a través de la incorporación extensiva de procesos más eficientes y de sistemas de recuperación de recursos. |
| • Implementar sistemas de control robusto, que minimicen las desviaciones de las condiciones de operación fuera de los rangos aceptables. |
| • Privilegiar la reducción de riesgos de accidentes, durante todas las fases del proyecto. |
| • Implementar sistemas de tratamiento de residuos de alta eficiencia, con menores impactos ambientales secundarios. |
| • Adaptar las especificaciones de los productos, para facilitar la recuperación y el reciclado de los residuos derivados de su consumo. |
| • Segregar los diferentes flujos de materiales, de modo que sea posible la aplicación de los principios anteriores. |
| • Implementar sistemas de gestión integral: medio ambiente, aseguramiento de calidad, seguridad y salud ocupacional. |

Los impactos ambientales asociados a cada alternativa de proceso, deben ser evaluados oportunamente y considerados en la selección de las opciones más atractivas, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Esto se discute brevemente a continuación.

**Importancia de la Gestión Ambiental**

El desarrollo de procesos y tecnologías con menor impacto ambiental, ha ido acompañado de la generación de nuevos conceptos acerca de la gestión de procesos. La importancia de este aspecto ha sido ampliamente reconocida, ya que ninguna tecnología, por muy "limpia" que sea, podrá cumplir con su objetivo de diseño, si no existe una gestión adecuada, que:

- Asegure un alto grado de compromiso, motivación y entrenamiento de todo el personal, en todos los niveles de la empresa,
- Desarrolle e implemente una política integral, que incluya los requerimientos de respeto al medio ambiente, aseguramiento de calidad, y altos estándares de seguridad y salud ocupacional,
- Permita un mejoramiento continuo de su accionar, adaptándose en forma proactiva a los cambios internos y externos.

## 6.3) LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO

***Definiciones:***

***Impacto Ambiental*** [2]***:*** *La alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.*

***Aspecto Ambiental*** [3]***:*** *Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización, que puede interactuar con el ambiente. Representa cualquier tipo de materia, energía u otros recursos, que fluye desde el medio ambiente hacia el proceso industrial y viceversa, y que puede generar impacto ambiental.*

***Evaluación de Impacto Ambiental:*** *Procedimiento que tiene por objetivo identificar, predecir e interpretar, los impactos ambientales que se producirían debido a la ejecución de un proyecto o actividad.*

La evaluación del impacto ambiental (EIA) es uno de los componentes esenciales del diseño de procesos limpios, ya que permite analizar los atributos ambientales, de las diferentes alternativas que surgen en la síntesis de un nuevo proceso.

[2] Definición de acuerdo a la Ley 19.300

[3] Definición de acuerdo a la Norma ISO 14000

Para los fines de diseño de procesos limpios, la EIA debería considerar el ciclo de vida completo, es decir “desde la cuna a la tumba”. Los recursos naturales (materiales y energéticos) son utilizados en una larga cadena de transformaciones, hasta producir un bien o servicio para el mercado de consumo. En cada etapa de este ciclo existen aspectos ambientales que afectan al medio ambiente y pueden producir impactos no deseables. La Figura 6.2 ilustra los principales aspectos ambientales del proceso productivo que pueden generar impactos directos e indirectos sobre el medio ambiente.

La metodología de EIA se presenta con mayor detalle en el Capítulo 7. En términos generales, la aplicación de la EIA en el diseño de procesos implica:

- Identificar los aspectos ambientales del proyecto.
- Identificar los factores ambientales potencialmente afectados.
- Predecir y evaluar los impactos generados.
- Identificar las medidas necesarias para eliminar o minimizar los impactos no deseados.

Ello requiere, conocer las relaciones causa-efecto entre aspectos e impactos ambientales y contar con modelos matemáticos para fines predictivos.

La Tabla 6.2 resume los atributos que deben ser considerados en la evaluación ambiental de un proceso dado, en relación a los recursos materiales y energéticos, a la tecnología y a los productos finales. Es fundamental dar prioridad a la evaluación de impacto ambiental durante la síntesis misma del proceso, para así identificar y cuantificar los impactos ambientales, poniendo énfasis a aquellos aspectos que inciden directamente en la salud y seguridad de la población, y en la sustentabilidad de la actividad económica. La Figura 6.3 ilustra el procedimiento general utilizado para el diseño de procesos limpios.

Al incorporar la dimensión ambiental al ejercicio de diseño, los impactos deberían ser evaluados y valorados monetariamente, para ser incorporados en el análisis técnico-económico del proyecto. En el análisis convencional de los atributos económicos del proyecto, el ingeniero utiliza los costos y beneficios privados, para determinar la rentabilidad privada. La identificación y valoración de los impactos ambientales, permite cuantificar las externalidades asociadas al proyecto. De este modo, se puede estimar el costo (y/o beneficio) externo, para efectos de cálculo del costo/beneficio social del proyecto. Al incrementar la inversión (y/o el costo de producción) debido a la incorporación de tecnologías de abatimiento para reducir el impacto ambiental de los residuos, aumenta el costo privado y se reduce el costo externo. Estos conceptos, revisados brevemente en la sección 6.6, son claves en la toma decisiones sobre el nivel de control ambiental “óptimo”, requerido para minimizar el costo social asociado a los aspectos ambientales del proyecto. Sin embargo, es importante señalar que la valoración económica de los impactos ambientales es un área de gran complejidad, que se encuentra en pleno desarrollo, y no existen procedimientos sencillos para ello. Por ejemplo, la cuantificación económica del impacto debido al uso de recursos naturales y

energéticos se puede hacer en base a los costos de reposición, los costos de oportunidad por usos alternativos, el valor como recurso estratégico, etc.

Para fines de diseño preliminar, es suficiente utilizar criterios relativos para valorar los impactos, de acuerdo a su magnitud e importancia ambiental, o a una valoración económica aproximada indirecta. En algunos casos, tales como en el análisis de los impactos asociados a las emisiones de residuos, se puede utilizar los costos de operación, para tratar los residuos dando cumplimiento a las normas de emisión correspondientes. De manera similar, los impactos potenciales debido a situaciones de emergencia derivadas de accidentes, se pueden estimar en base al daño esperado como consecuencia del evento accidental. Ello puede ser obtenido utilizando los procedimientos de análisis de riesgos presentados en el Capítulo 10.

Generalmente, en las primeras fases de la síntesis de procesos, se genera un alto número de alternativas. Por lo tanto, el objetivo de la evaluación preliminar es seleccionar aquellas que sean más atractivas desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental. Para ello, se puede utilizar un mecanismo sencillo para hacer un "ranking" de opciones, donde se comparen los indicadores de rentabilidad económica (ej.: valor actualizado neto, tasa interna de retorno) con los indicadores de impacto ambiental y se seleccionen aquellas opciones de alto retorno y bajo impacto ambiental. Es necesario tener presente que la EIA de un proceso tiene un alto contenido de incertidumbre y de subjetividad. Debido a ello, es fundamental que todas las opciones sean estudiadas usando criterios comunes de evaluación.

### 6.3.1) Producción Limpia en Procesos Existentes

En muchos casos, los ingenieros enfrentan la tarea de mejorar el desempeño de empresas que llevan años de operación y que no presentan los estándares ambientales requeridos. El mejoramiento del desempeño ambiental de una empresa se logra mediante la implementación de:

- Medidas de gestión
- Modificaciones tecnológicas.

Tal como se observa en la Figura 6.4, en una primera fase se pueden alcanzar beneficios ambientales significativos a través de medidas de muy bajo costo, destinadas a mejorar la capacidad de gestión. Las modificaciones mayores implican grandes inversiones, por lo que sólo se deben implementar una vez que se hayan agotado las medidas de gestión tendientes a obtener el máximo potencial de la base tecnológica existente.

En la gran mayoría de los casos, la implementación de medidas de gestión va acompañada de modificaciones tecnológicas menores relativamente sencillas y de bajo costo, destinadas a:

- Reemplazar y/o reparar aquellas unidades críticas que afectan la eficiencia

operacional, la calidad del producto, la seguridad y el desempeño ambiental.

- Evitar pérdidas obvias de materiales y energía.
- Mejorar la capacidad para medir las principales variables de proceso e implementar sistema de control donde sea necesario.
- Facilitar la gestión y tratamiento de los residuos mediante una segregación racional que privilegie un mejor aprovechamiento de los recursos.

Para llevar a cabo tales medidas, es necesario identificar las principales debilidades y fortalezas de la empresa en materia ambiental, seguridad y salud ocupacional, incluyendo las oportunidades y amenazas que enfrenta.

Típicamente, la revisión (auditoría) inicial puede comprender los siguientes objetivos:

- Identificar los requisitos legales y reglamentarios relacionados con medio ambiente, seguridad y salud ocupacional. Interesan tanto los requisitos actuales, como aquellos que se prevén a mediano plazo, en el país e internacionalmente.
- Identificar los aspectos ambientales significativos asociados a las actividades de la empresa, los principales peligros operacionales y evaluar los niveles de riesgos respectivos. Verificar el cumplimiento con la normativa ambiental.
- Identificar aquellas actividades y/o unidades críticas desde los puntos de vista del ambiente, seguridad y salud ocupacional.
- Evaluar el desempeño ambiental, incluyendo seguridad y salud ocupacional, en base a criterios desarrollados internamente, normas externas, reglamentos, códigos de práctica y conjuntos de principios y guías pertinentes.
- Identificar las prácticas y procedimientos de gestión ambiental, aseguramiento de calidad y seguridad existentes en la empresa.
- Identificar opciones de mejoramiento ambiental, seguridad y salud ocupacional
- Evaluar los puntos de vista de las partes interesadas internas y externas.
- Identificar aquellos elementos dentro de la estructura orgánica de la empresa que pueden ayudar o impedir el mejoramiento en el desempeño ambiental.

En el Capítulo 8 se detalla los componentes de un sistema de gestión moderno y se entrega algunas orientaciones para su implementación, en el contexto de las Normas ISO 14000. La metodología para la realización de auditorías ambientales se revisa en el Capítulo 9.

**TABLA 6.2: ATRIBUTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS**

| **ACERCA DE LAS MATERIAS PRIMAS** |
|---|
| • Abundancia de materias primas en el sistema. Fuentes y tasas de renovación.<br>• Impactos ambientales durante la extracción, transporte y almacenamiento de dichas materias primas.<br>• Niveles de toxicidad, reactividad, inflamabilidad, volatilidad y otras características relevantes para la salud, la seguridad y el ambiente.<br>• Presencia de componentes potencialmente contaminantes que no son consumidos durante el proceso de manufactura y que pueden generar residuos no deseados. Características de dichos componentes.<br>• Potencial reciclable de los residuos. |
| **ACERCA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS** |
| • Requerimientos energéticos del proceso, fuentes primarias de energía y su impacto ambiental.<br>• Disponibilidad local de los recursos energéticos.<br>• Eficiencias de utilización energética.<br>• Impactos ambientales asociados con su generación y consumo, riesgos de accidente, etc..<br>• Valor estratégico de los recursos energéticos requeridos. |
| **ACERCA DE LOS RECURSOS TECNOLÓGICOS** |
| • Eficiencia de utilización de los recursos materiales y energéticos.<br>• Controlabilidad y estabilidad operacional.<br>• Riesgos operacionales; áreas críticas del proceso; factores de seguridad utilizados; materiales peligrosos, etc..<br>• Nivel de complejidad tecnológica. Requerimientos de entrenamiento, mantención y gestión de producción.<br>• Sistemas de tratamiento de residuos gaseosos, líquidos y sólidos; estabilidad operacional; efectos potenciales de compuestos inhibidores en los residuos; residuos secundarios; cambios de fase. |
| **ACERCA DE LOS PRODUCTOS** |
| • Naturaleza del producto; composición, estabilidad, peligrosidad.<br>• Riesgos en el almacenamiento, transporte y consumo de los productos.<br>• Residuos secundarios generados en el consumo. Características, peligrosidad, riesgos asociados a su recolección y vertido. Potencial reciclable. Mercado potencial. Costos de recolección y transporte, incentivos económicos, etc.. |

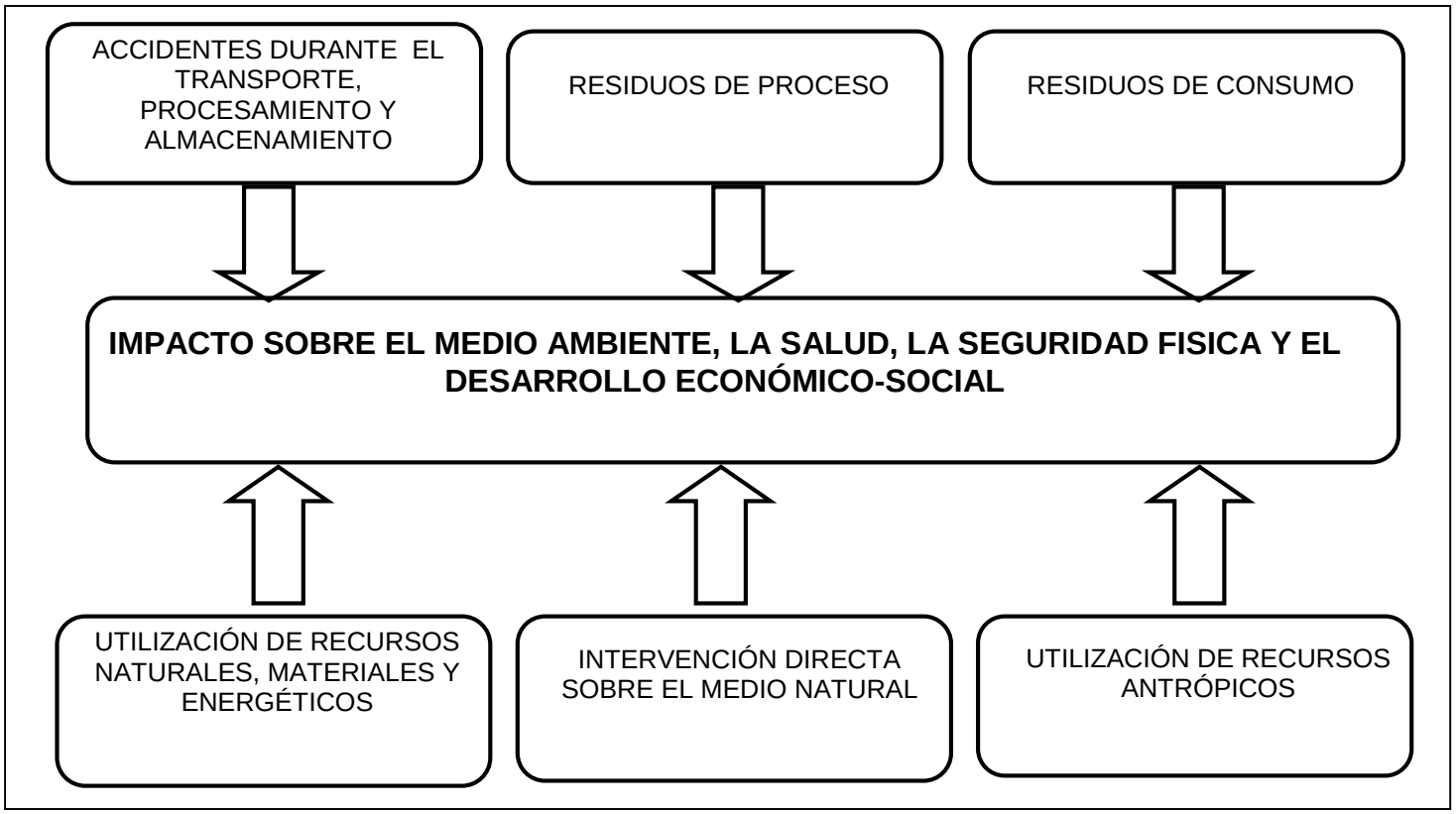



**FIGURA 6.2: PRINCIPALES ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA**

**FIGURA 6.3: DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS**

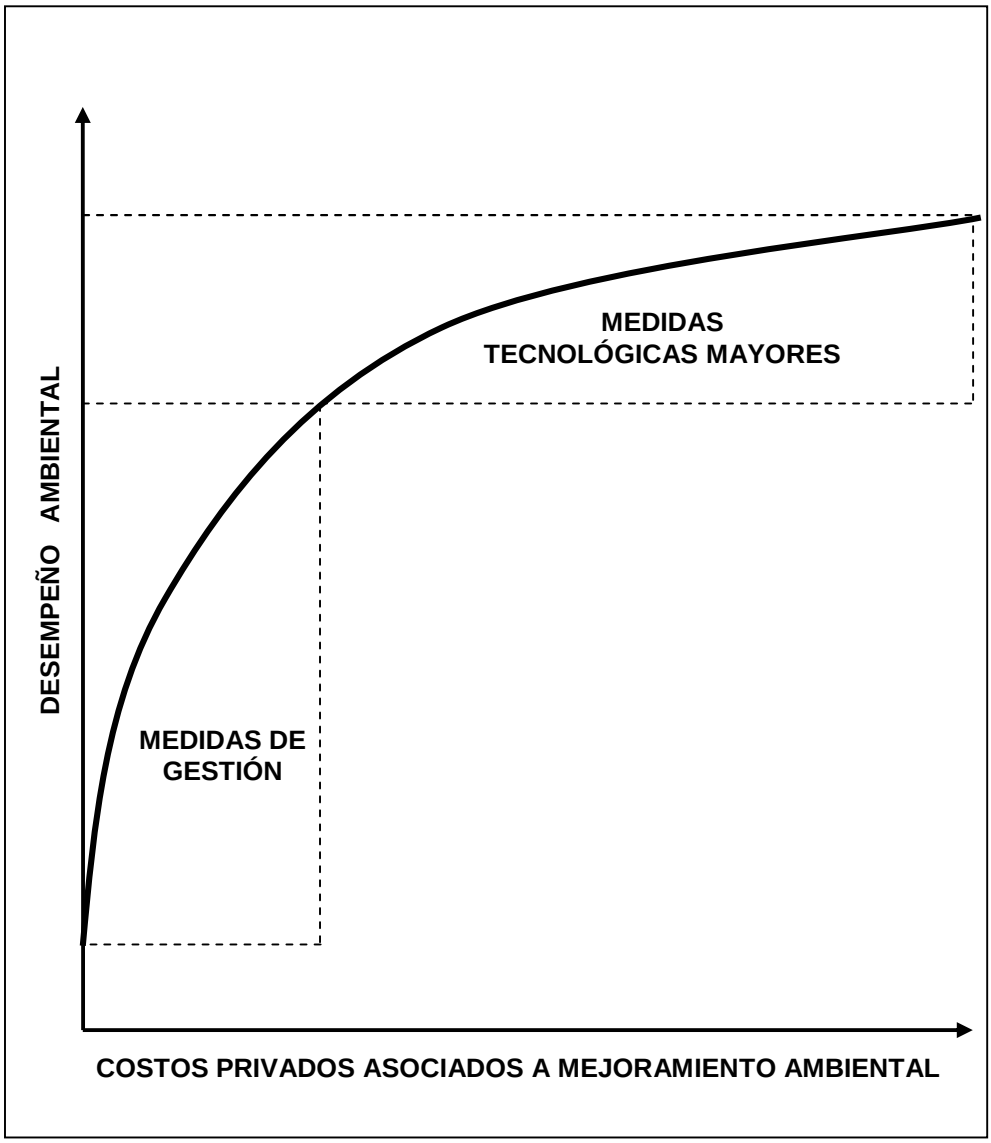



**FIGURA 6.4 : EFECTO DE LAS MEDIDAS DE MEJORAMIENTO AMBIENTAL**

## 6.4) ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Las emisiones de residuos materiales y energéticos se pueden reducir por diferentes vías complementarias, cuyos principios básicos son:

- Prevenir la generación del residuo en su fuente misma.
- Reciclar y reutilizar aquellos residuos inevitables, con valor potencial de uso.
- Conservar energía y agua.
- Segregar los desechos para una mejor reutilización y/o tratamiento.
- Utilizar sistemas de tratamiento de mayor eficiencia de depuración, para líneas residuales segregadas.
- Integrar conceptos ambientales a la gestión de producción.

A continuación se revisará brevemente algunos de los componentes claves de una estrategia moderna de control ambiental basada en estos conceptos, ilustrados en la Figura 6.5.

### 6.4.1) Reducción de Residuos

La reducción del volumen de residuos generados tiene un impacto directo, tanto en el costo de tratamiento final, como en la productividad global del proceso. Las opciones existentes para lograr tal objetivo implican medidas de tipo tecnológico y de gestión.

El primer curso de acción a seguir para reducir las emisiones de residuos consiste en prevenir su generación o minimizarlos en su fuente misma, utilizando algunas de las opciones ilustradas en la Figura 6.5. En seguida, aquellos residuos que no puedan ser prevenidos, deben ser gestionados para facilitar su recuperación y reutilización o reciclado [4]. Finalmente, los residuos que no puedan seguir dicho destino deberán ser tratados para su posterior disposición final, de acuerdo a las normas vigentes. Los residuos segregados pueden ser tratados en sistemas de tratamiento de mayor eficiencia depurativa.

En general, existen dos mecanismos generales a través de los cuales se puede lograr una reducción de las emisiones de residuos:

1. **Medidas de Prevención**: En la mayoría de los casos, el manejo cuidadoso de las operaciones, una buena supervisión, un alto nivel de entrenamiento y motivación, la mantención preventiva y, en general, prácticas adecuadas, pueden conducir a una reducción sustancial de las pérdidas materiales y energéticas. Es

[4] La reutilización y el reciclaje son procesos mecánicos, manuales o automáticos, mediante los cuales se puede recuperar diferentes tipos de residuos. La reutilización es una técnica de reaprovechamiento de un material o producto, sin cambiar su forma o naturaleza original. El reciclaje, por su parte, es la transformación de ciertos materiales en materia prima para procesos productivos. Ambos procesos se presentan como una alternativa para reducir los volúmenes de residuos a ser dispuestos, transformándolos en un insumo más dentro de la cadena productiva que los generó. Estos procesos no son aplicables a todos los residuos, debido a que algunos no son recuperables, otros no tienen demanda, o porque no existe la tecnología necesaria para su tratamiento.

importante recalcar la importancia que tiene la mantención preventiva de los equipos clave y la ejecución de auditorías ambientales periódicas. Estas últimas permiten identificar claramente aquellas operaciones y procedimientos causantes de pérdidas de recursos.

2. **Modificaciones al Proceso**: Durante el diseño de los procesos y equipos, se debe tener presente minimizar las pérdidas de materiales y energía, y la carga contaminante de las emisiones finales al ambiente. Cuando se trata de instalaciones industriales que ya están en su fase operacional, se debe identificar las modificaciones necesarias para lograr dichos objetivos. Normalmente, dichas modificaciones son técnicamente sencillas y de bajo costo.

Es muy importante recuperar todo recurso potencialmente utilizable, presente en los residuos, mediante medidas de segregación y separación apropiadas. Los residuos recuperados pueden ser reutilizados en el proceso o transformados para producir nuevos productos. Por ejemplo:

- En la industria láctea, se puede recuperar en forma higiénica el suero de leche para su posterior comercialización como concentrado o producto seco. La proteína del suero de leche puede comercializarse como suplemento alimenticio de alto valor. La lactosa del suero puede ser fermentada para producir enzimas (ej.: pectinasa)
- Las grasas del procesamiento de animales pueden tener mercado como materia prima para la industria química.
- Las levaduras y granos residuales de la industria cervecera pueden ser usados como alimento animal.
- Las cáscaras de coco u otros residuos lignocelulósicos pueden ser transformados en carbón activado de alta calidad a través de procesos termoquímicos.
- Los lodos de tratamiento biológico pueden ser transformados en abono agrícola, mediante compostado.
- Los residuos de madera pueden ser utilizados como materia prima para producción de fibra, o como combustible para generación de vapor y energía eléctrica.
- La fibra recuperada de los efluentes de la máquina papelera puede ser reciclada, utilizada como combustible o para fabricación de cartones.
- El $H_2S$ generado en los procesos de hidrogenación catalítica del petróleo, puede ser separado del resto de los gases y utilizado para producir sulfidrato de sodio, azufre elemental o sulfatos.
- Los residuos líquidos de curtiembre que contienen cromo pueden ser segregados y procesados para recuperarlo.
- Los residuos de pescado de la industria conservera pueden ser utilizados como materia prima para la producción de harina de pescado.
- El $SO_2$ de los residuos gaseosos de las plantas refinadoras de mineral de cobre sulfurado puede ser separado y utilizado para producción de $H_2SO_4$.

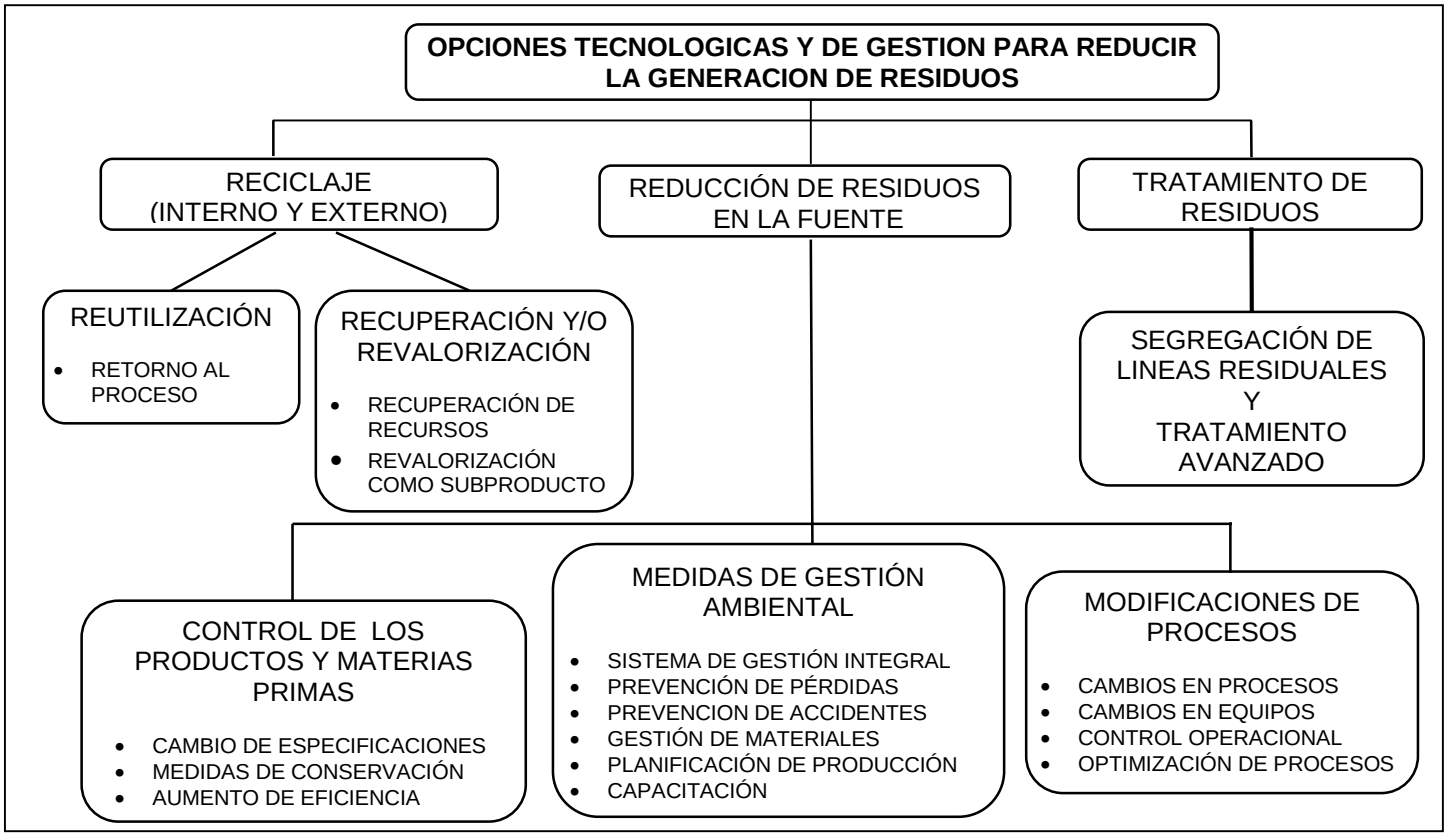



**FIGURA 6.5: ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE RESIDUOS**

En el caso de la industria de alimentos, es importante mantener prácticas de segregación adecuadas, para asegurar los estándares de higiene y la alta concentración requeridos para posibilitar la recuperación de los materiales de valor.

La factibilidad de estos procesos está determinada por consideraciones técnicas y económicas, tales como, escala de producción, costos de recuperación y procesamiento secundario, precios, etc.. Los dos primeros juegan un papel determinante. Además, se debe considerar la reducción de los costos de tratamiento, debido a la eliminación de parte de la carga contaminante original. Este aspecto se discute brevemente en la sección 6.6, al final de este capítulo.

### 6.4.2) Medidas Prácticas para la Reducción de los Residuos

Existen innumerables ejemplos de modificaciones a procesos industriales que han generado significativos incrementos en la productividad y una drástica reducción en la generación de residuos. Algunas de las medidas de interés, implementadas en la industria de procesos, se enumeran a continuación:

#### a) Reducción de Pérdidas Innecesarias de Materiales

- Mejorar los sistemas de carga y almacenamiento (tanques con control de nivel; uso de cañerías, válvulas y bombas que no presenten pérdidas de líquidos).
- Instalar sistemas más efectivos de control de calidad de materias primas e insumos, para evitar el uso de materiales que no cumplan con las especificaciones del proceso (composición, propiedades físico-químicas, presencia de contaminantes potenciales, etc.).
- Establecer procedimientos de mantención para evitar el deterioro de los controladores, y equipos de almacenamiento y transporte de materiales que pueden ser fuente de pérdidas
- Implementar sistemas eficientes de control de inventarios, para coordinar el volumen de las adquisiciones con los requerimientos de producción, teniendo en cuenta la vida útil de los recursos (muy importante en el caso de materiales biodegradables y/o químicamente inestables); además, se debe contar con sistemas de identificación de materiales y sistemas de adquisición y procesamiento de datos que faciliten la gestión.
- Reducir las pérdidas entre lotes (en operaciones discontinuas), recuperando los materiales antes de las operaciones de lavado, después de la descarga del producto.
- Seleccionar sistemas de válvulas y cañerías con baja retención de líquido durante el drenaje.
- Reducir las pérdidas durante las operaciones transitorias de la planta (puesta en marcha y detención, cambios de niveles de producción, cambios en las materias primas y condiciones de operación, etc.).

#### b) Reducción de los Requerimientos Energéticos

- Implementar una mejor integración energética (ej. precalentamiento de las corrientes de alimentación, utilizando corrientes de alta temperatura que

requieren ser enfriadas, diseño mejorado de los sistemas de intercambiadores de calor).

- Utilizar los desechos combustibles para generar energía *in-situ.* No incinerar materiales con contenido halogénico o alto contenido de compuestos de azufre. Mantener sistemas eficientes para controlar las emisiones de combustión.
- Usar aislación adecuada en cañerías y estanques de almacenamiento de fluidos a temperaturas extremas.

**c) Selección de Materiales de Menor Impacto Ambiental**

- Usar materias primas e insumos que no generen residuos no deseados (ej. combustibles con bajo contenido de azufre y cenizas).
- Seleccionar solventes que sean recuperables o que no contaminen las corrientes residuales no recuperables.
- Seleccionar materiales que, debido a sus propiedades, puedan ser utilizados con mayor eficiencia o ser recuperados económicamente.

**d) Modificaciones al Proceso de Transformación**

- Mejorar el diseño de los reactores, para permitir una mayor productividad y utilización de los recursos materiales y energéticos.
- Uso de herramientas de modelación y optimización, para seleccionar las condiciones de operación, con vistas a minimizar las pérdidas.
- Implementar controladores que permitan mantener las condiciones de operación óptimas.

**e) Implementar Sistemas de Separación y Purificación Eficientes**

- Reducir las pérdidas de materiales en los sistemas de lavado de los productos intermedios (ej. lavadores de difusión radial de alta eficiencia).
- Evitar la generación y emisión de componentes orgánicos volátiles durante las operaciones de secado y/o eliminación de solventes (ej.: usando secado indirecto con sistemas de depuración de los gases residuales).
- Eliminar agua u otros solventes, usando sistemas que faciliten su recuperación y reduzcan las emisiones.
- Recuperar los solventes en los procesos de extracción líquido-líquido.
- Reducir el contenido de agua de los residuos sólidos.

**f) Reducción del Consumo de Aguas y del Volumen de Efluentes Líquidos**

- Implementar sistemas de uso de agua en contracorriente, usando las aguas limpias sólo en áreas donde sea estrictamente necesario.
- Reducir el consumo de agua de lavado, usando sistemas de alta presión, selección adecuada de detergentes, pre-lavado en seco, etc..
- Reciclar y reutilizar el agua; recuperar las aguas de enfriamiento y condensados.
- Segregar las corrientes de aguas limpias (reutilizables) de aquellas contaminadas.

**g) Segregación de Líneas Residuales**

- Separar corrientes que contengan materiales que sean recuperables, de aquellas que no lo sean. Ello permite recuperar recursos.
- Separar corrientes con materiales tóxicos, patogénicos o explosivos, para una gestión efectiva.
- Separar líneas de alto volumen y baja concentración, para reutilización de aguas.
- Separar los residuos biodegradables, para facilitar su tratamiento biológico en sistemas de menor volumen.
- Separar las líneas que contengan material combustible, sin contenido halogénico y con bajo contenido de azufre, para aprovechar su contenido energético.

**h) Sistemas de Tratamiento de Residuos**

- Implementar sistemas de tratamiento adecuados a la naturaleza de los desechos.
- Considerar el tratamiento de residuos al mismo nivel de importancia que las operaciones del proceso principal. Usar herramientas avanzadas de diseño, modelamiento, simulación, optimización y control. Mantener una operación óptima y estable, con alta eficiencia de remoción.
- Control efectivo de las emisiones gaseosas y líquidas.
- Tratamiento y disposición de sólidos, con mínimo impacto ambiental.
- Identificar residuos secundarios generados durante el tratamiento. Diseñar sistemas para su manejo y tratamiento posterior.

**i) Reducir los Riesgos de Accidentes**

- Gestión segura de los materiales peligrosos presentes en el proceso.
- Realizar análisis de riesgos periódicos.
- Contar con planes de prevención, medidas para afrontar emergencias, planes de contingencia.
- Sistemas eficientes de entrenamiento de personal en todos los aspectos operacionales asociados a medio ambiente y seguridad.
- Implementar un programa sistemático de mantención preventiva de equipos y controladores críticos.
- Privilegiar aquellos diseños que minimicen los riesgos de accidentes (incendio, explosión o emanaciones tóxicas).

**j) Implementar un Sistema de Gestión Integral**

- Implementar un sistema de gestión que tenga como objetivo llevar a cabo las políticas de la empresa en materias de medio ambiente, calidad, seguridad y salud ocupacional.
- Entrenamiento e información.
- Mantener procedimientos documentados y actualizados.

- Mantener niveles de instrumentación adecuados para una gestión efectiva.
- Evaluación de desempeño ambiental periódica.
- Mantener actualizada la información sobre tendencias en la legislación.
- Sugerir cambios en los procesos y especificaciones de las materias primas y productos, para un mejoramiento del desempeño ambiental.
- Mantención preventiva de los equipos e instrumentos críticos.
- Mejoramiento continuo.

### 6.4.3) Segregación de Residuos

Como se mencionó anteriormente, la segregación de las líneas residuales facilita un manejo más racional y permite diseñar sistemas de tratamiento, de acuerdo a las características específicas de cada línea. La segregación de residuos permite reducir los costos de capital de los sistemas de tratamiento y vertido, debido a la disminución del volumen de desechos que requieren atención.

A continuación se presenta algunas categorías generales para residuos líquidos, sólidos y gaseosos, en el contexto de establecer medidas de segregación.

***Residuos Líquidos**:*

En general, las categorías generales de residuos líquidos, aplicables a toda industria, corresponden a:

- **Aguas de Lavado de Equipos e Instalaciones**: Constituyen una fracción significativa de la demanda de agua en la industria de procesos. En particular, el sector agro-alimenticio es un importante consumidor de aguas de lavado, ya que se requiere un alto nivel de higiene en sus operaciones. Las aguas residuales del lavado contienen compuestos disueltos y sólidos suspendidos que reflejan la naturaleza de los materiales utilizados en los procesos. En muchos casos, se incluyen detergentes y compuestos químicos biocidas, utilizados para mantener condiciones de higiene en el equipamiento. Por su naturaleza, dichas aguas constituyen la mayor fuente de contaminación del efluente final y deben ser tratadas antes de su vertido a los cuerpos receptores.

- **Aguas de Lavado de Materias Primas y Productos**: Las operaciones de lavado de materias primas y productos son muy frecuentes en la industria de alimentos sólidos de origen agrícola, donde es necesario limpiar la materia prima previo a su procesamiento y asegurar las condiciones de higiene del producto final. En otros casos, la materia prima se trata con agua para mantener un alto contenido de humedad, como por ejemplo el riego de trozas de madera en la industria forestal. Las aguas residuales de estas operaciones contienen compuestos solubles y sólidos suspendidos provenientes de los materiales sometidos a lavado.

- **Aguas de Limpieza de Derrames:** Esta fuente de residuos líquidos es muy importante en aquellos casos donde los derrames corresponden a compuestos químicos tóxicos, reactivos, inflamables o corrosivos. Esta fuente de agua

residual está asociada a fallas en el funcionamiento de los equipos involucrados en el almacenamiento, transporte y procesamiento de materiales (ej.: cañerías, bombas, correas transportadoras, estanques, reactores, etc.). Se debe priorizar la recuperación de estos materiales, estableciendo las medidas de contención apropiadas y evitando que se mezclen con otras líneas líquidas. Estos eventos se pueden prevenir, mediante un correcto dimensionamiento de los equipos, un efectivo control operacional y una adecuada mantención preventiva.

- **Aguas de Lavado de Gases**: Estas son frecuentes en aquellas industrias que generan gases solubles o condensables, los que pueden ser recuperados a través de absorción en medio acuoso. Las aguas residuales de este proceso contienen parte de los compuestos absorbidos, además de aditivos que se haya utilizado para incrementar la solubilidad.

- **Aguas de Procesamiento:** Aquí se incluyen aquellas aguas utilizadas en procesos de cocción, escaldado, impregnación, transporte hidráulico, reacción en medio acuoso, flotación y lixiviación de minerales, u otras que implican un contacto directo con las materias primas, insumos y productos intermedios. Las aguas residuales de estas operaciones son fuente de pérdidas de materiales y son altamente atractivas para la recuperación de tales recursos. Se incluyen aquí las aguas provenientes de los laboratorios de investigación y desarrollo, control de calidad u otros que pueden generar residuos líquidos con alta carga de reactivos químicos.

- **Aguas de Enfriamiento / Calentamiento:** Debido a su alto calor específico y calor latente de vaporización, el agua es el principal medio de transporte de energía calórica en la industria de procesos. Estas aguas no deberían contener materiales disueltos provenientes del proceso, ya que el intercambio de calor se efectúa, normalmente, a través de paredes que separan el agua del medio a enfriar o calentar. Sin embargo, en muchos casos, ellas presentan un nivel de temperatura demasiado alto para su vertido directo en los medios receptores, debiendo ser enfriadas previamente mediante torres o lagunas de enfriamiento. Por otra parte, estas aguas contienen un potencial energético que puede ser recuperado a través de una adecuada integración en el proceso. Esto es particularmente relevante, para aquellas industrias que utilizan extensivamente el agua como agente térmico (por ejemplo, refinación del petróleo, producción de celulosa y papel).

- **Aguas Sanitarias:** Estas aguas son las que provienen de los servicios sanitarios de la planta, casino, cafetería, etc.. Normalmente, son descargadas a los sistemas de alcantarillado locales o tratadas internamente. Contienen organismos fecales y pueden constituir un riesgo de infección en la planta si son manejadas en forma inadecuada. En la mayoría de las plantas modernas, estos efluentes se mantienen totalmente segregados de aquellas líneas residuales que presentan un potencial para recirculación, reutilización y/o recuperación de recursos.

- **Aguas para el Control de Incendios:** Aquellas industrias que procesan materiales combustibles se encuentran expuestas al peligro de incendio. En caso de producirse dicha emergencia, se consumirán importantes cantidades de agua para combatir el fuego, generando aguas residuales con alta carga contaminante. Dichas aguas no se producen como parte de la operación normal de la planta y se debe contar con planes de contingencia para su adecuada gestión.

***Residuos Sólidos:***

Los residuos sólidos de origen industrial pueden generarse a partir de diferentes fuentes:

- **Materias primas no utilizables:** Generalmente, ello es debido a que están fuera de especificación o constituyen pérdidas durante el procesamiento. Son un objetivo primario de gestión, ya que son un claro indicativo de fallas en el sistema de aseguramiento de calidad y en el control de procesos.

- **Residuos provenientes de partes no utilizables de las materias primas:** Son componentes de la material prima que no pueden ser incorporados directamente en el producto final; por ejemplo, la corteza en la industria forestal. En algunos casos, pueden ser usados como recurso en otros procesos o, cuando sea posible, reducidos mediante una selección apropiada de la materia prima.

- **Productos elaborados o semielaborados, fuera de especificación:** En general reflejan fallas en los sistemas de control de procesos y en los procedimientos operacionales. Si no tienen valor comercial, se deben reducir mediante un buen control de las condiciones de operación.

- **Residuos finales de los procesos**: Son residuos generados en los procesos, tales como, escorias y cenizas de combustión, adsorbentes agotados, catalizadores desactivados, compuestos sólidos intermedios sin valor.

- **Sólidos residuales secundarios**: Se generan en los sistemas de tratamiento de residuos líquidos (ej.: lodos de sedimentación, lodos biológicos) y/o gaseosos (ej. cenizas y polvos de los filtros, precipitadores o ciclones).

- **Envases y otros contenedores de materias primas e insumos**. Se debe privilegiar el reciclado de los envases a los proveedores. En muchos casos, son la principal fuente de residuos sólidos peligrosos (ej.: envases de solventes orgánicos, de compuestos biocidas, de soluciones con metales pesados, etc.).

***Residuos Gaseosos***

- **Gases de combustión:** La mayor parte de los residuos gaseosos de origen industrial son gases de combustión, generados en hornos, calderas y motores de combustión interna, donde se utilizan combustibles orgánicos (ej. gas natural, leña, petróleo, diesel, carbón, biomasa, etc). Dichos gases son emitidos a la

atmósfera a través de chimeneas, previo tratamiento depurativo para cumplir con las normas respectivas.

- **Gases de Proceso:** En otros casos, los gases residuales se derivan directamente del procesamiento de las materias primas, ofreciendo interesantes oportunidades para su segregación y tratamiento diferenciado. Por ejemplo:

    - Mercaptanos y otros sulfuros reducidos (TRS) generados en los procesos de producción de celulosa kraft. Se pueden recolectar de las diferentes fuentes e incinerar en hornos especiales.
    - Aminas volátiles, generadas durante la pirólisis de proteínas en el tratamiento térmico de harina de pescado. Pueden ser recolectadas e incineradas.
    - Acido sulfídrico generado en el hidrotratamiento del petróleo. Su recuperación permite su utilización como materia prima para fabricación de sulfhidrato de sodio, azufre, o sulfato.
    - Dióxido de azufre generado en la piro-refinación de cobre. La opción más utilizada es producir ácido sulfúrico a partir de dichos óxidos.

Todas estas categorías de residuos constituyen opciones de segregación que pueden facilitar su manejo. Es importante identificar y segregar aquellos residuos peligrosos, es decir, aquellos que sean tóxicos, inflamables, corrosivos o reactivos. Su separación del resto de los residuos, tanto sólidos como líquidos, permite una mejor gestión a más bajo costo. Además, facilita la identificación de opciones para reducir su tasa de generación en la fuente misma.

La naturaleza de la segregación depende también de factores económicos y técnicos, los cuales deben ser tomados en consideración en etapas preliminares del ejercicio de diseño.

La Tabla 6.3 enumera algunos criterios para segregar los residuos:

**TABLA 6.3: CRITERIOS PARA LA SEGREGACIÓN DE RESIDUOS**

| **CRITERIOS PARA SEGREGACIÓN** |
|---|
| Componentes Tóxicos |
| Solventes Orgánicos |
| Grasas/Aceites |
| Iones Metálicos Pesados |
| Material Orgánico Biodegradable |
| Materiales Recalcitrantes (no-biodegradables) |
| Acidos/bases Fuertes |
| Residuos Líquidos con Alto Contenido de Sólidos Suspendidos |
| Proteínas y otros materiales valiosos |
| Compuestos con Alto Poder Calorífico |

En general, se pueden identificar 3 objetivos en la segregación de líneas residuales, los que se revisan brevemente a continuación:

**a) Recuperación de Recursos Materiales**

Es frecuente encontrar que algunas líneas residuales contienen una considerable carga de compuestos que pueden ser recuperados para su reutilización en el proceso, comercialización como subproductos o procesamiento para generar nuevos productos de mayor valor agregado. La recuperación de dichos recursos materiales resulta atractiva en aquellos casos donde los costos asociados a los procesos de separación y purificación son inferiores a los beneficios por concepto de ahorro de recursos e ingresos por comercialización.

Los procesos de separación se encuentran ampliamente implementados a nivel industrial y aprovechan las diferencias de tamaño, solubilidad, volatilidad, carga electrostática, densidad, u otras propiedades físico-químicas de los compuestos a separar. En general, a medida que aumenta la concentración de los compuestos a recuperar, los procesos de separación presentan menores dificultades técnicas, con costos de operación más bajos. La segregación de las líneas residuales de interés permite mantener una concentración más alta de los compuestos de valor y, a su vez, evitar la contaminación de dichas corrientes con compuestos no deseados provenientes de otras operaciones de la planta.

**b) Recirculación y Reutilización de Agua**

Es frecuente encontrar líneas residuales cuyas características físico-químicas les permiten ser utilizadas en otras áreas del proceso. En muchos casos, dichas aguas pueden ser reutilizadas directamente, mientras que en otras situaciones se requiere su condicionamiento a través de una operación relativamente simple y de bajo costo (ej.: eliminación de sólidos gruesos, neutralización, enfriamiento).

Por ejemplo, en la industria de envasado de frutas, se puede usar agua fresca en las etapas finales del proceso (ej.: lavado de los productos), y luego reutilizarla en las operaciones precedentes (ej.: transporte hidráulico y lavado de materias primas). Así mismo, el lavado preliminar de los equipos e instalaciones de proceso se puede llevar a cabo usando agua de enfriamiento y otras líneas residuales con baja carga contaminante. Estos aspectos se presentan con más detalle en la siguiente sección.

Finalmente, se debe tener en consideración que el cierre de los circuitos de agua se encuentra limitado por la acumulación de materia y energía térmica. Se debe extraer parte de los materiales y energía acumulados para mantener niveles aceptables, compatibles con los requerimientos de calidad de las operaciones donde dicha agua se reutilizará. La purga debe ser calculada en base a un balance de materia y energía en torno al sistema de recirculación.

### c) Tratamiento Depurativo de Mayor Efectividad

Las mayores exigencias impuestas a las emisiones de residuos, en términos tanto de la carga contaminante como de su concentración en el residuo final, han tenido como consecuencia un incremento significativo en los costos de tratamiento. En este sentido, la segregación de las líneas residuales permite reducir los flujos volumétricos a tratar, requiriendo equipos de menor tamaño y de más bajo costo.

El diseño conceptual de sistemas de tratamiento para corrientes segregadas debe tomar en consideración los aspectos económicos del proceso, ya que la segregación implica una mayor complejidad en el sistema de almacenamiento y transporte de aguas residuales. A su vez, se abre una gran oportunidad para introducir operaciones unitarias de mayor nivel de sofisticación y efectividad, como por ejemplo:

- Tratamientos físicos y químicos avanzados.
- Procesos biológicos de alta eficiencia.
- Oxidación catalítica de compuestos orgánicos
- Destrucción térmica a alta temperatura.
- Estabilización y solidificación, etc.

Ello obliga a introducir herramientas de diseño y optimización de procesos comúnmente utilizadas en ingeniería de reactores.

***Ejemplo: Tratamiento segregado de residuos líquidos:***

La Tabla 6.4 muestra el resultado de un estudio preliminar de líneas residuales en una industria de fibra. Las corrientes rotuladas A, B y C representan los efluentes de aguas de enfriamiento, aguas de lavado de materias primas y aguas de destintado, respectivamente. En la Tabla aparecen los flujos volumétricos y las concentraciones y flujos másicos promedio de materia orgánica biodegradable (medida como $DBO_5$) y sólidos suspendidos (SS). Además, se incluyen los valores límites establecidos de acuerdo a las normas locales.

**TABLA 6.4: CARACTERIZACION DE LINEAS RESIDUALES**

| | Flujo | $DBO_5$ | | S.S. | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $m^3/h$ | $kg/m^3$ | kg/h | $kg/m^3$ | kg/h |
| Efluente A | 60 | 0,10 | 6,0 | 0,02 | 1,2 |
| Efluente B | 30 | 1,00 | 30,0 | 1,00 | 30,0 |
| Efluente C | 50 | 1,00 | 50,0 | 0,10 | 5,0 |
| Efluente General A+B+C | 140 | 0,61 | 86,0 | 0,26 | 36,2 |
| Valores Límites Aceptados | - | 0,10 | 14,0 | 0,10 | 14,0 |

La Figura 6.6 presenta dos alternativas de tratamiento. La primera, considera el tratamiento del efluente general mediante un sistema convencional de separación de sólidos suspendidos, seguido de un tratamiento biológico aeróbico. La segunda opción, propone el tratamiento diferenciado de los efluentes segregados, de acuerdo a sus características y a los requerimientos de la norma de vertidos. En la Figura 6.6 se incluyen los flujos másicos de $DBO_5$ y S.S. a través de los procesos propuestos. Los requerimientos de depuración en cada uno de los casos evaluados son perfectamente alcanzables con unidades convencionales de sedimentación primaria y lodos activados.

En este ejemplo, se puede observar que la segregación de las corrientes permite una reducción de tamaño de 79% y 44% para el sedimentador primario y el bioreactor, respectivamente. Estos resultados son ilustrativos de las importantes reducciones en los costos de capital asociados al tratamiento de efluente mediante una segregación adecuada de las corrientes residuales.

## 6.5) MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE AGUA

La escasez de agua alcanza niveles críticos en muchas regiones debido a cambios climáticos y sequías prolongadas. Generalmente, el consumo de agua industrial constituye un aspecto ambiental altamente significativo debido a:

- La presión que ello puede ejercer sobre sistemas hídricos frágiles.
- La competencia con otros usuarios por el recurso hídrico (por ejemplo, usos agrícolas, fuente de agua potable, fuente de energía eléctrica, usos recreativos).

Más aún, el costo de tratamiento de los residuos líquidos está directamente asociado al volumen de agua a tratar. Como consecuencia, existe un creciente incentivo a nivel mundial para invertir en sistemas que permitan reducir el consumo de agua. Estos esquemas, normalmente, incluyen:

- Medidas para una reducción efectiva del consumo en su fuente.
- Recuperación, recirculación y reutilización de las aguas de proceso.

La reducción del consumo de agua constituye uno de los principales desafíos de diseño en la industria de procesos. La Tabla 6.5 enumera una serie de medidas recomendadas normalmente para reducir el consumo de agua.

Estas medidas deben ser aplicadas a las diferentes categorías de aguas residuales mencionadas anteriormente, en la sección 6.4.3. En particular, los requerimientos de aguas de lavado pueden ser reducidos drásticamente si se incorporan medidas para disminuir las pérdidas innecesarias de materiales líquidos, tales como aquellas recomendadas en la sección 6.4.2.

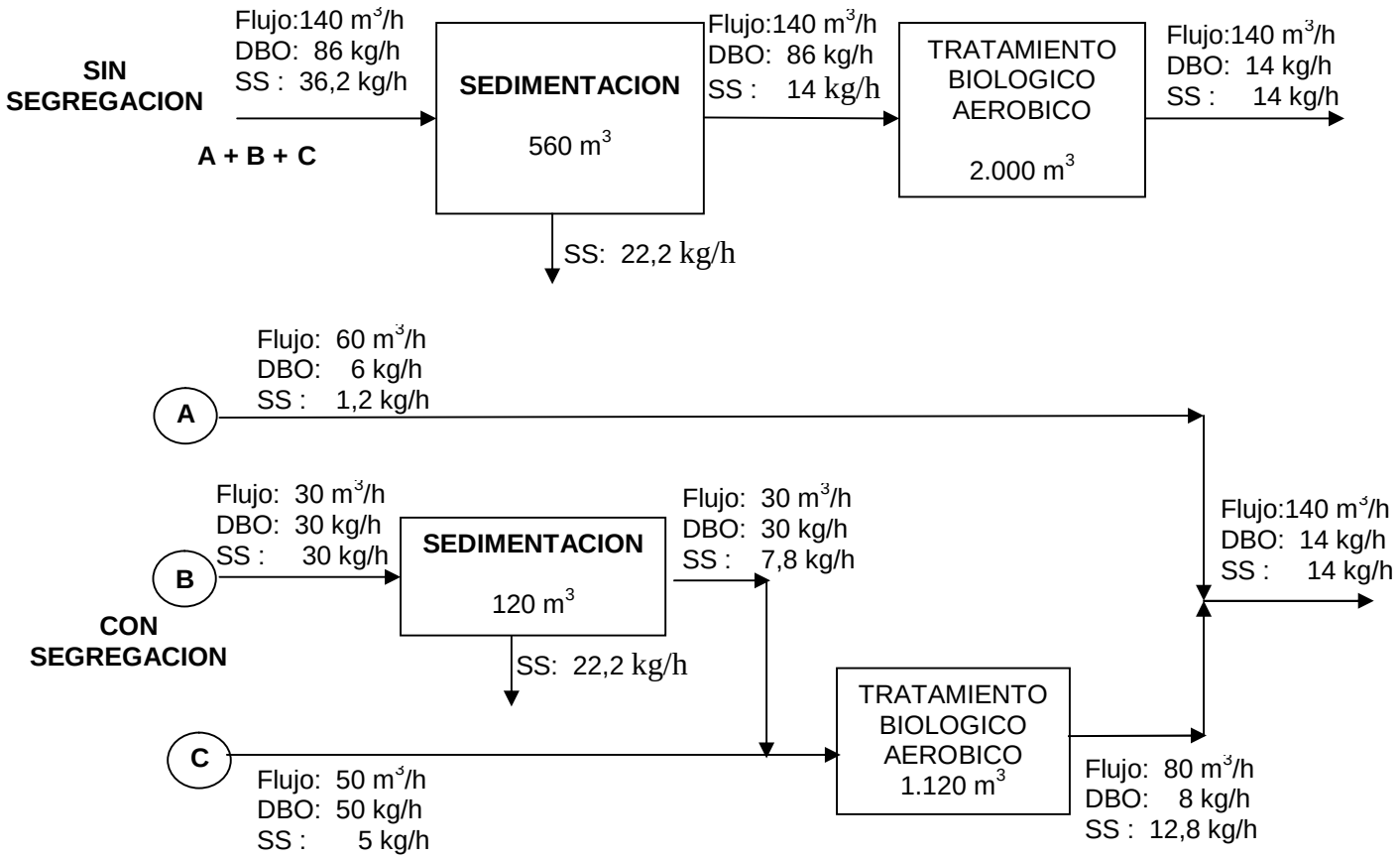



**FIGURA 6.6: TRATAMIENTO DIFERENCIADO DE EFLUENTES SEGREGADOS**

**TABLA 6.5: MEDIDAS PARA CONSERVACIÓN DE AGUAS INDUSTRIALES [5]**

| MEDIDAS PARA CONSERVACIÓN DE AGUAS |
|---|
| • Usar el agua en forma cuidadosa; sólo el mínimo necesario. |
| • Mantener los residuos sólidos separados de los residuos líquidos y eliminarlos en forma concentrada, reduciendo así los requerimientos de agua de lavado. |
| • Usar agua a alta presión en volúmenes reducidos, en las operaciones de limpieza. Usar los detergentes en la proporción apropiada y seleccionar aquellos que requieran de un mínimo enjuague. |
| • Reciclar el agua en aquellos casos en que los requerimientos de higiene lo permitan. Para estos efectos, tal vez sólo se requiera de operaciones sencillas tales como: enfriamiento, neutralización o eliminación de sólidos gruesos. |
| • Usar controladores automáticos para volumen, temperatura y presión. Los controles manuales resultan en mayores pérdidas. Usar válvulas que se cierran automáticamente cuando se detiene el flujo de agua. |
| • Estudiar cada proceso, para identificar los cambios que sean requeridos para reducir los requerimientos de agua. |

Es importante destacar que una de las medidas más efectivas para reducir el consumo de agua se basa en la reutilización de aguas residuales en diferentes operaciones, consumiendo agua fresca sólo en aquellas áreas u operaciones donde sea estrictamente necesario. Este aspecto representa uno de los principales objetivos de una gestión racional del recurso agua en la industria.

La Figura 6.7 Ilustra un ejemplo típico del uso de agua de lavado en contracorriente aplicado al lavado de pulpa en la secuencia de blanqueo en la industria de celulosa kraft ECF. La implementación de tales sistemas en contracorriente, permite una reducción del consumo de agua de 20-30 $m^3$/ton celulosa, respecto a los sistemas convencionales.

El ejemplo anterior puede ser aplicado a la industria de envasado de frutas, donde se debe usar agua fresca para lavar el producto en las etapas finales del proceso.

[5] Recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

Dado que el contenido contaminante de dicha agua de lavado, es relativamente bajo, ésta se puede reutilizar en operaciones precedentes que no requieran agua limpia (ej.: transporte y lavado de la materia prima).

El requerimiento de agua de enfriamiento o calentamiento puede ser reducido implementando principios de integración energética y un adecuado diseño de los sistemas de aislación térmica. El precalentamiento de corrientes de alimentación usando fluidos de alta temperatura que requieren ser enfriados, se esquematiza en la Figura 6.8 para un proceso de fermentación continua, donde la alimentación se precalienta con el medio de cultivo proveniente de la unidad de esterilización. Dicho sistema permite eliminar totalmente la necesidad de agua de enfriamiento. En otros casos, las aguas de enfriamiento pueden ser recirculadas al sistema de intercambio de calor o reutilizadas en el proceso, luego de su condicionamiento térmico en torres de enfriamiento, tal como se ilustra en las Figuras 6.9 y 6.10.

Es importante tener en cuenta que la recirculación de agua en los procesos industriales está limitada por la acumulación de material orgánico e inorgánico disuelto, riesgos de contaminación microbiana y otros cambios no aceptables en las propiedades del agua recirculada (ej.: características organolépticas, color, etc.). En esos casos, es fundamental diseñar un sistema de purga y *make-up* que mantenga la concentración de los materiales acumulables dentro de límites aceptables.

***Ejemplo: La Industria Papelera***

Tradicionalmente, la industria papelera estuvo asociada a un alto consumo de agua (100-200 $m^3$/ton papel), principalmente en la operación de la máquina papelera. En la actualidad, las plantas modernas incluyen innumerables sistemas de recirculación interna, lo que ha permitido reducir el consumo de agua a menos de 20 ($m^3$/ton papel), con una marcada tendencia hacia reducciones aún mayores. Las medidas que han permitido tales reducciones son comunes a un amplio sector de la industria de procesos.

En la fabricación del papel, la principal fuente de aguas residuales proviene de la máquina papelera. El agua blanca[6] más rica se obtiene de las charolas situadas bajo la primera parte de la tela de la máquina *Foudrinier*: Esta agua es reciclada directamente a los estanques de mezcla, a los batidores o a otro punto como agua de proceso. Por su parte las aguas más pobres son obtenidas en la fosa situada bajo la tela. Sin embargo, la recirculación de la casi totalidad de las aguas blancas genera sistemas altamente complejos, lo que se agudiza en el caso de fábricas integradas de pulpa y papel. Se debe considerar también que el cierre involucra contar con agua aceptable desde el punto de vista de calidad y cantidad en las distintas etapas de proceso donde ella es necesaria.

[6] En general las aguas blancas están constituidas por fibra residual, materia soluble, y un alto porcentaje de materia no fibrosa en suspensión, tal como los pigmentos, almidones y colorantes. La cantidad de material sólido varía dependiendo del tipo de papel que se esté fabricando, por ejemplo puede ir desde menos del 5% para papeles pesados, a más del 50% en papeles tissue de peso ligero, en un sistema cerrado. En el caso del papel periódico, dependiendo de la velocidad de la máquina papelera, estas pérdidas pueden llegar a más de 40% .

Una de las primeras alternativas de reutilización de agua es la recirculación de las aguas blancas ricas, provenientes de la fosa de la tela metálica y de la fosa del rodillo cabezal. Dichas aguas pueden utilizarse en la regulación de consistencia en todos los sistemas de pasta. A esto se debe agregar el uso de las aguas clarificadas en los rociadores de la máquina papelera, principalmente en los rociadores de las telas, de la caja de entrada, de los rodillos ranurados, de los recortadores, de los separadores y del rodillo maestro.

Otros de los aspectos relevantes es el manejo del gran volumen de agua selladora de las bombas de vacío. En algunos casos, se utiliza el agua clarificada del recuperador, teniendo en consideración que el pH de dicha agua no debe ser inferior a 5 para evitar la corrosión de la caja de acero dulce de las bombas. Existen sistemas separados de recirculación para las bombas de vacío, los que permiten reunir el agua de sello de todas las bombas en un recipiente situado bajo éstas, y recircular el agua hacia las bombas previo enfriamiento a niveles bajo 50ºC (ver Figura 6.10). Para el caso de las bombas de alto vacío se recomienda utilizar agua fresca fría, la que luego puede ser reutilizada como agua de sello para las bombas de menor vacío.

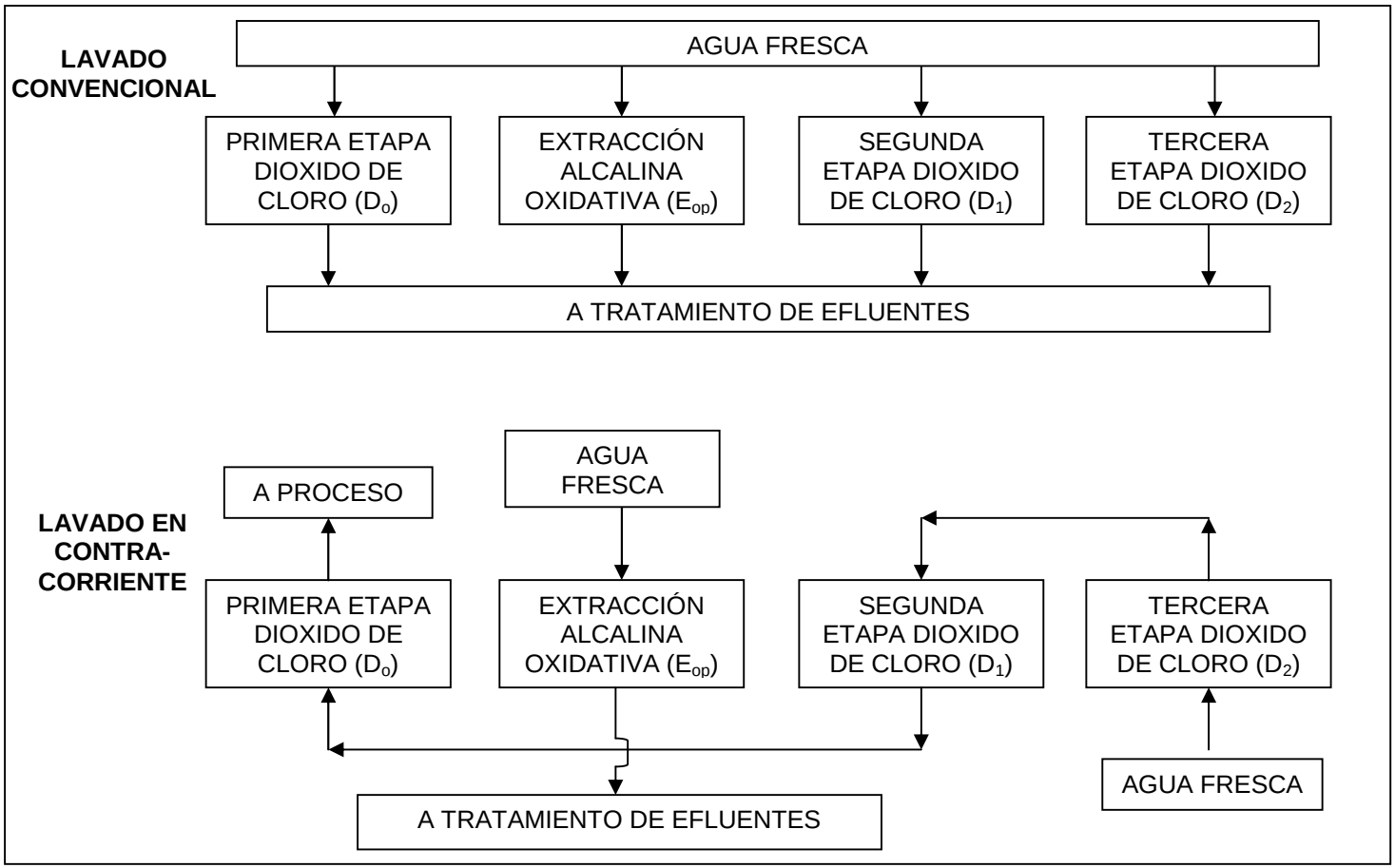



**FIGURA 6.7: SISTEMA DE LAVADO DE PULPA CELULOSICA EN SECUENCIA DE BLANQUEO ECF**

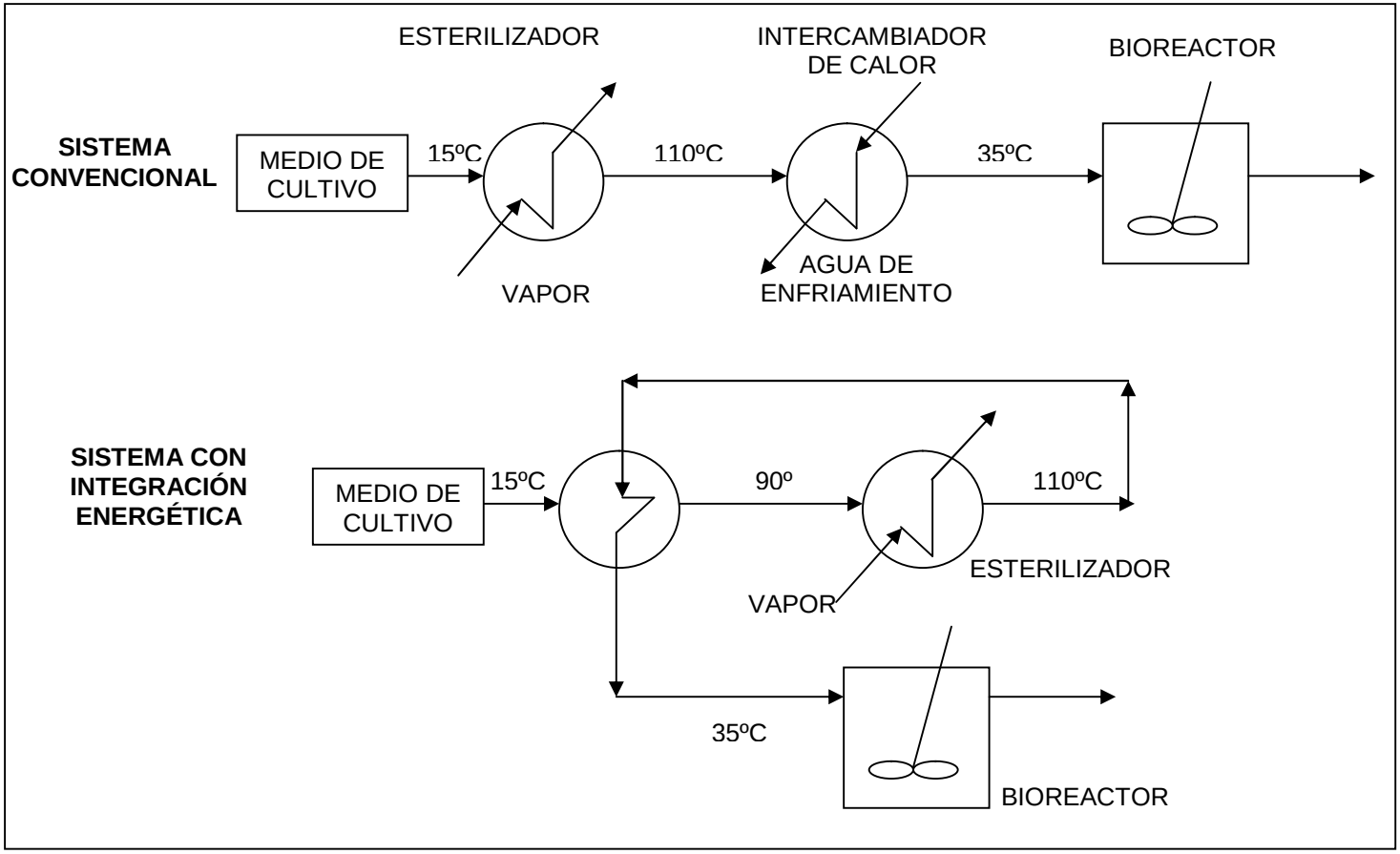



**FIGURA 6.8: INTEGRACIÓN ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN INDUSTRIAL**

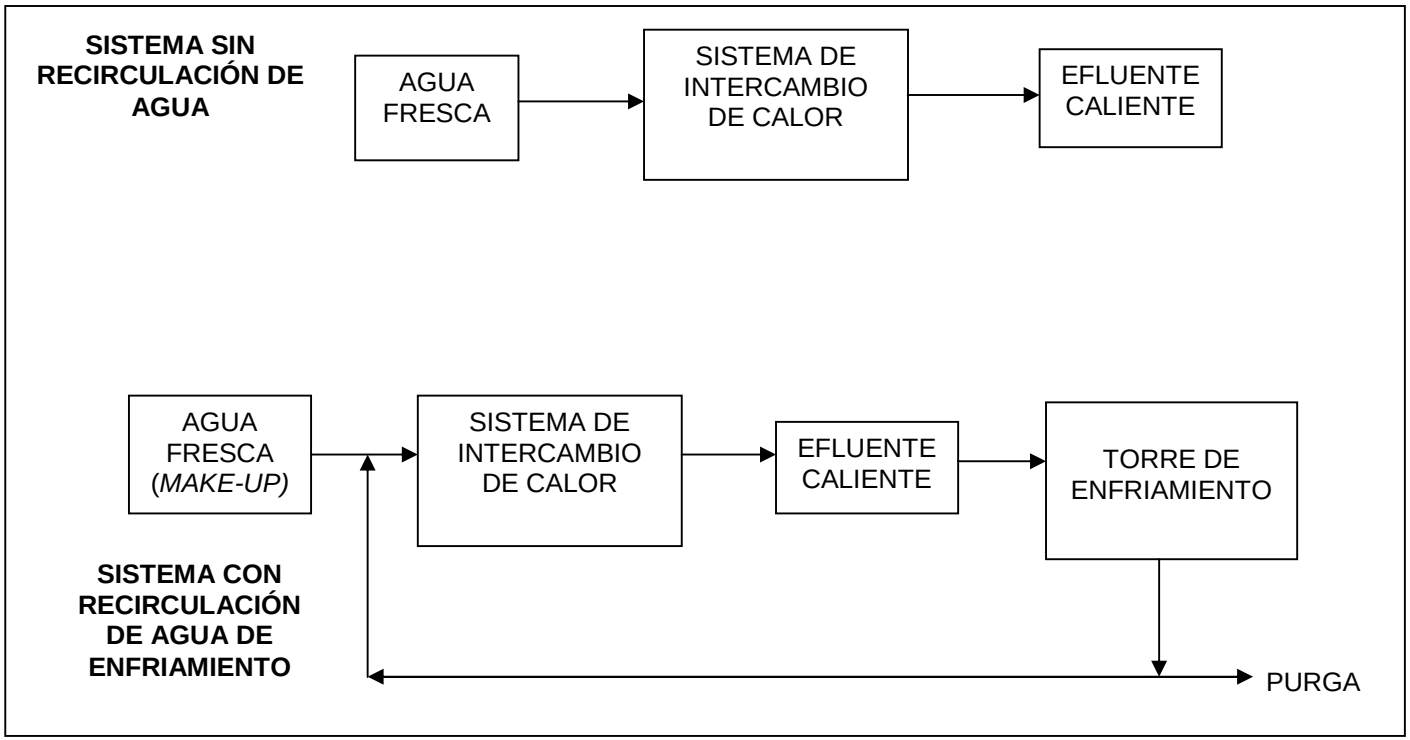



**FIGURA 6.9: SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR SIN Y CON RECIRCULACIÓN DE AGUA DE ENFRIAMIENTO**

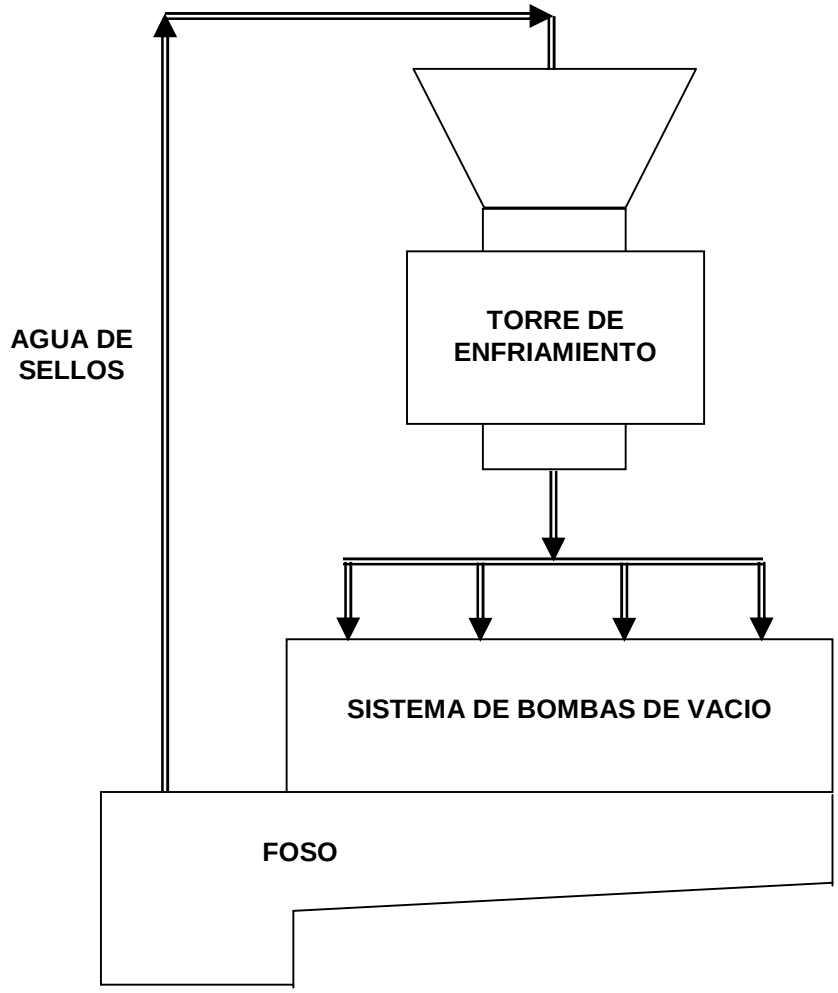



**FIGURA 6.10: SISTEMA CERRADO DE AGUA DE SELLOS PARA BOMBAS DE VACIO, CON TORRE DE ENFRIAMIENTO**

## 6.6) CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

La evaluación económica juega un papel muy importante en la toma de decisiones, en el contexto del diseño de procesos limpios. Una vez que los impactos ambientales asociados a una opción de proceso son aceptables, se debe proceder a evaluar su factibilidad económica. La evaluación económica de un proyecto se basa tradicionalmente en un análisis de costos y beneficios. En el caso de proyectos de mejoramiento ambiental, los costos y beneficios deben cubrir todos aquellos aspectos afectados, positiva o negativamente, por la implementación de las medidas propuestas. En este sentido, es fundamental identificar correctamente tales costos y beneficios, ya que ello determina el resultado del análisis y la toma de decisiones.

La siguiente lista puede servir como guía para identificar los costos y beneficios, además de aquellos considerados tradicionalmente en todo proyecto productivo:

### a) Beneficios Potenciales

- Ahorro de materias primas.
- Ahorro de energía (electricidad, combustible, etc.).
- Ahorro en el consumo de agua.
- Aumento de la productividad global (reducción de pérdidas materiales, aumento de producción, reducción de fallas en equipos, reducción de accidentes, operación estable, mejor gestión de procesos, etc.).
- Retorno adicional, debido a la recuperación y venta de subproductos.
- Disminución del costo de tratamiento y/o disposición final de los residuos.
- Disminución de los costos de operación de la planta de tratamiento.
- Disminución en costos legales asociados a problemas ambientales y de seguridad (multas, indemnizaciones, seguros).
- Mejor imagen de la empresa

### b) Costos Potenciales

- Inversiones asociadas a modificaciones en el proceso, unidades más sofisticadas, nuevos sistemas de control, etc..
- Aumento de los costos de producción, al utilizar materias primas e insumos de menor potencial de impacto, pero más caras.
- Costos de nuevos programas de entrenamiento, mantención preventiva, gestión ambiental, personal adicional, etc..

Esta lista no pretende ser completa, pero constituye una guía adecuada para identificar costos y beneficios directamente asociados a medidas de control ambiental.

### c) Costos Privados y Costos Sociales

Al considerar los aspectos económicos asociados a un proyecto de mejoramiento ambiental, es importante distinguir entre los costos (o beneficios) privados y los costos (o beneficios) sociales. Los primeros se refieren a aquellos costos (y beneficios) que recaen directamente sobre los proponentes o ejecutantes del proyecto. Por su parte, los costos (o beneficios) sociales incluyen, además, las externalidades al proyecto. Las externalidades son aquellos costos o beneficios, derivados de las acciones del proyecto, que recaen sobre la comunidad, el Estado u otros individuos o instituciones. Por ejemplo, el costo resultante del deterioro de la calidad del aire debido a las emisiones de una industria es un costo externo que recae sobre las personas afectadas por ese deterioro ambiental. Si la empresa incorpora un sistema de control de emisiones, con vistas a evitar la contaminación, se reduce el costo externo, a expensas de un incremento del costo privado.

A medida que el proyecto incorpora medidas más sofisticadas y de mayor requerimiento de inversión, con vistas a un control ambiental más efectivo, se puede esperar una reducción de los costos externos asociados a los impactos ambientales.

Tal como se ilustra en la Figura 6.11, a medida que incrementan las exigencias de protección ambiental, se reducen los costos asociados al deterioro ambiental, pero a expensas de un aumento de los costos privados. De acuerdo a ello, existiría un nivel de exigencia ambiental donde el costo social alcanza un valor mínimo.

Estos aspectos deben ser considerados en detalle en los procesos de elaboración de normas ambientales, ya que se deben establecer los estándares buscando minimizar los costos sociales, entre otros criterios.

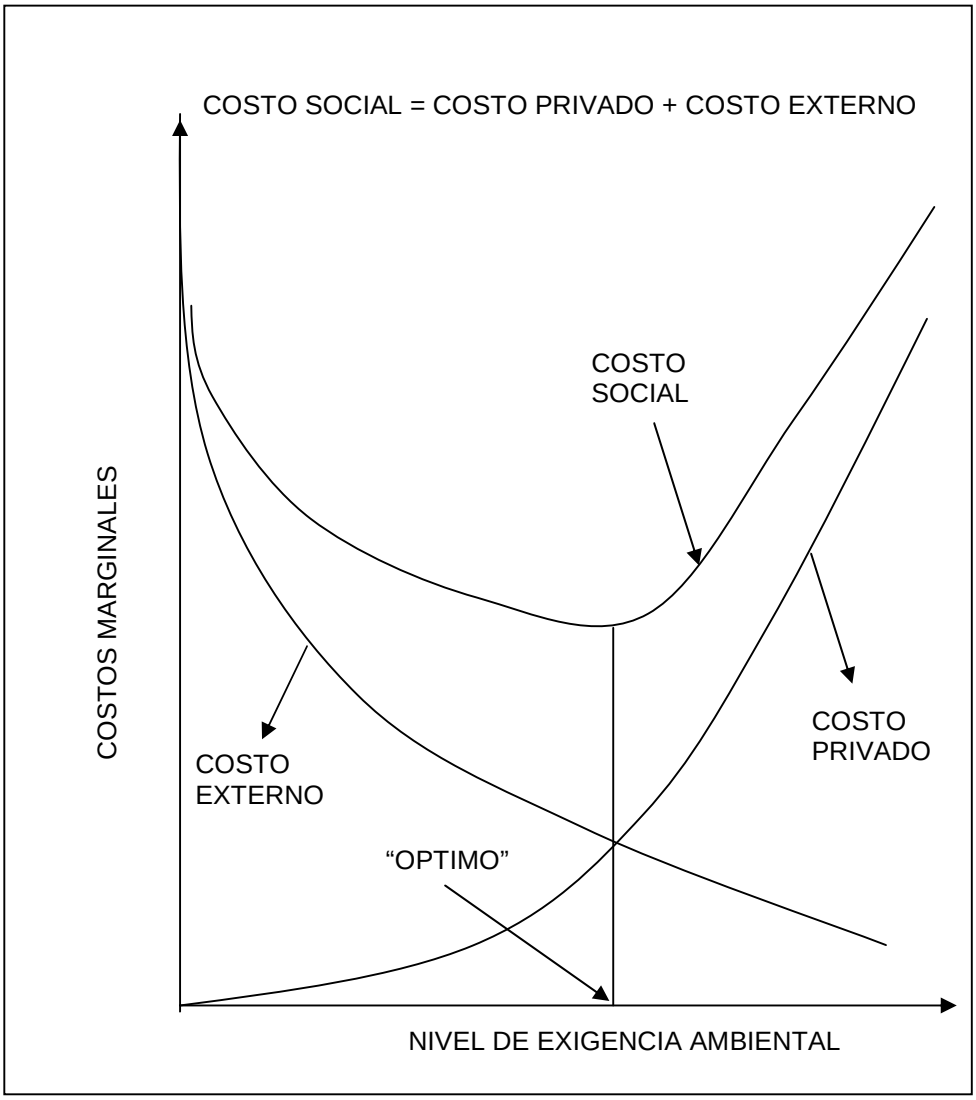



**FIGURA 6.11 : NIVEL DE EXIGENCIA AMBIENTAL "OPTIMO"**

**BIBLIOGRAFÍA**

Cheremisinoff P.N. "Waste Reduction for Pollution Prevention", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford (1989).

Fiksel J. “Ingeniería de Diseño Medioambiental: Desarrollo Integral de Productos y Procesos Ecoeficientes”. McGraw Hill. Madrid (1997)

Freeman H.M. “Manual de Prevención de la Contaminación Industrial” McGraw Hill, México (1988)

PNUMA - ONUDI "Manual de Auditoría y Reducción de Emisiones y Residuos Industriales", Informe Técnico Nº 7, Naciones Unidas, New York (1994)

# CAPÍTULO 7

## EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Todas las actividades productivas generan impactos ambientales de diferente envergadura, que dependen de la ubicación geográfica, de la fragilidad de los ecosistemas, de las tecnologías y escalas de producción, de los materiales utilizados, etc. El diseño de procesos limpios tiene como uno de sus objetivos centrales, minimizar los impactos ambientales no deseados, derivados de tales procesos.

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es el estudio de los efectos en el medio ambiente, generados por una acción humana. Cuando dicha acción aún no se ha efectuado (es decir, cuando un proyecto está en su fase de estudio), la EIA tiene un carácter predictivo, donde se anticipan los posibles impactos futuros derivados de la actividad humana. De este modo, es posible seleccionar las alternativas que, cumpliendo con los objetivos de producción propuestos, logren máximos beneficios y generen mínimos impactos ambientales no deseados[1]. En este contexto, la EIA constituye una poderosa herramienta para diseñar procesos con mínimo impacto ambiental y, como tal, tiene una enorme importancia en la práctica moderna de la ingeniería.

En este capítulo se presentará las principales definiciones y conceptos generales sobre EIA, con vistas a su utilización en el diseño preliminar de procesos limpios. La metodología general de EIA utilizada como herramienta de diseño coincide con aquella requerida en el contexto de la Ley 19.300 [2]; sin embargo, aquí sólo se revisará aquellos aspectos relevantes a su uso como herramienta de ingeniería. A modo de referencia, al final del capítulo se incluye algunos extractos del Reglamento de la Ley 19.300, relacionados con las circunstancias y contenidos de los estudios de impacto ambiental requeridos por la Ley Chilena a los proyectos productivos.

Se debe señalar que la EIA es un concepto que aún se encuentra en pleno desarrollo. Por su naturaleza, es un ejercicio intrínsecamente multidisciplinario y no se pretende aquí cubrir cada tópico en detalle. El autor sugiere consultar las referencias presentadas al final de este capítulo, para una mayor profundización. En particular, se recomienda el texto de A. Morales (1998), que entrega una completa visión sobre las herramientas metodológicas para la EIA en el marco de la Ley 19.300.

---

[1] Los impactos ambientales pueden ser positivos o negativos, es decir, beneficiosos o no deseados. En este texto, nos referiremos a impacto ambiental en su connotación negativa, pues son estos los que deben ser minimizados en los procesos limpios.

[2] La Ley 19.300, Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, establece los lineamientos del sistema de evaluación de impacto ambiental en Chile. Constituye el principal instrumento de gestión ambiental preventivo con que cuenta el país.

## 7.1) LA EIA Y EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

La mejor manera de comenzar este capítulo es revisando nuevamente las definiciones aceptadas de "impacto ambiental", "medio ambiente" y "evaluación de impacto ambiental" (según la Ley 19.300):

***Impacto Ambiental:*** *La alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.*

***Medio Ambiente****: El sistema global constituido por los elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural y que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones.*

***Evaluación de Impacto Ambiental****: Procedimiento que determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto, se ajusta a las normas vigentes.*

Estas 3 definiciones acotan el problema que enfrentamos y permiten reconocer los requisitos metodológicos que se deben cumplir para llevar a cabo un estudio de impacto ambiental:

a) En primer lugar, tenemos que ser capaces de identificar las posibles alteraciones que se generan en el medio ambiente debido al proyecto propuesto. Para ello, se requiere de un conocimiento acerca de las relaciones causa-efecto entre los aspectos ambientales del proyecto y los impactos ambientales potenciales. Implica estudiar el conjunto de efectos potenciales en cada componente del entorno vital, el cual incluye el medio natural y el medio antropizado.

b) Debemos tener la capacidad para predecir las características de dicho impacto, para decidir acerca de su aceptabilidad. Es decir, se debe contar con modelos cualitativos y cuantitativos que permitan obtener información sobre los cambios que pueden generarse debido a cada aspecto ambiental del proyecto. La calidad de las predicciones dependerá de la consistencia de los modelos causa-efecto, de la validez de los parámetros y de los datos utilizados.

c) En caso de existir Normas de Calidad Ambiental [3] para los componentes ambientales estudiados, ellas constituyen el criterio de aceptabilidad. Sin embargo, dichas normas cubren un limitado espectro de componentes ambientales, lo que obliga a establecer criterios de aceptabilidad que deben ser cuidadosamente seleccionados.
d) Si el impacto ambiental previsto no es aceptable, se debe identificar las posibles modificaciones al proyecto original que permitan reducir dicho impacto

[3] Las ***Normas de Calidad Ambiental*** se definen como aquellas que establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente, puede constituir un riesgo para la vida o la salud de la población (Normas Primarias), o un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza (Normas Secundarias).

a los niveles de aceptabilidad. Esto representa un desafío de ingeniería importante, pues la modificación al proceso tiene que resultar en una drástica reducción de los aspectos ambientales responsables del impacto, sin que esto afecte negativamente la factibilidad técnica y económica del proyecto. En la etapa de síntesis de un proyecto, esta fase del EIA es fundamental para identificar las opciones de menor impacto ambiental.

Estos conceptos se ilustran en las Figuras 7.1 y 7.2. Se compara la situación ambiental existente previa a la implementación del proyecto, con aquella que se generaría como consecuencia de su ejecución. Dicha comparación involucra determinar los impactos directos e indirectos sobre los seres humanos y sobre los recursos naturales.

Los desafíos implícitos en este ejercicio son considerables. Los posibles impactos derivados de un proyecto involucran efectos primarios y secundarios, que se distribuyen espacial y temporalmente. Más aún, las relaciones causa-efecto entre los aspectos ambientales del proyecto y los diversos impactos son, en mucho casos, difíciles de cuantificar debido a falta de datos, carencia de modelos predictivos apropiados, conocimientos limitados acerca del funcionamiento del ecosistema, etc. Y, por supuesto, *"la pregunta del millón*".... ¿Cómo fijar los criterios de aceptabilidad de un impacto ambiental dado? O, dicho en otras palabras: ¿Cuándo es aceptable un impacto ambiental dado? Todas éstas son limitaciones y preguntas que generan controversia en diferentes foros. Aún estamos lejos de encontrar respuestas con validez absoluta para estos problemas.

En el contexto de su aplicación al diseño de procesos limpios, interesa utilizar la EIA para distinguir aquellas opciones con menor impacto ambiental e identificar las medidas de mitigación necesarias para reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. Las alternativas sometidas a evaluación no solamente deben incluir opciones tecnológicas, sino que también diferentes localizaciones geográficas posibles para la instalación de la planta.

Finalmente, se debe destacar que, al evaluar comparativamente diferentes alternativas de procesos (o de localización), se facilita el uso de criterios relativos para seleccionar aquellas que presenten mejores atributos ambientales. Más aún, el nivel de precisión y detalle de la evaluación ambiental debe ser coherente con los niveles respectivos en los aspectos técnicos y económicos del proyecto. En la fase de síntesis de un proyecto, los datos de proceso y sus correspondientes costos y beneficios económicos son estimaciones aproximadas, indicativas de los órdenes de magnitud. Una vez que se avanza hacia la ingeniería básica y de detalle, la información técnica y económica se hace más precisa. Por lo tanto, el nivel de resolución de los análisis ambientales debería seguir esa misma progresión.

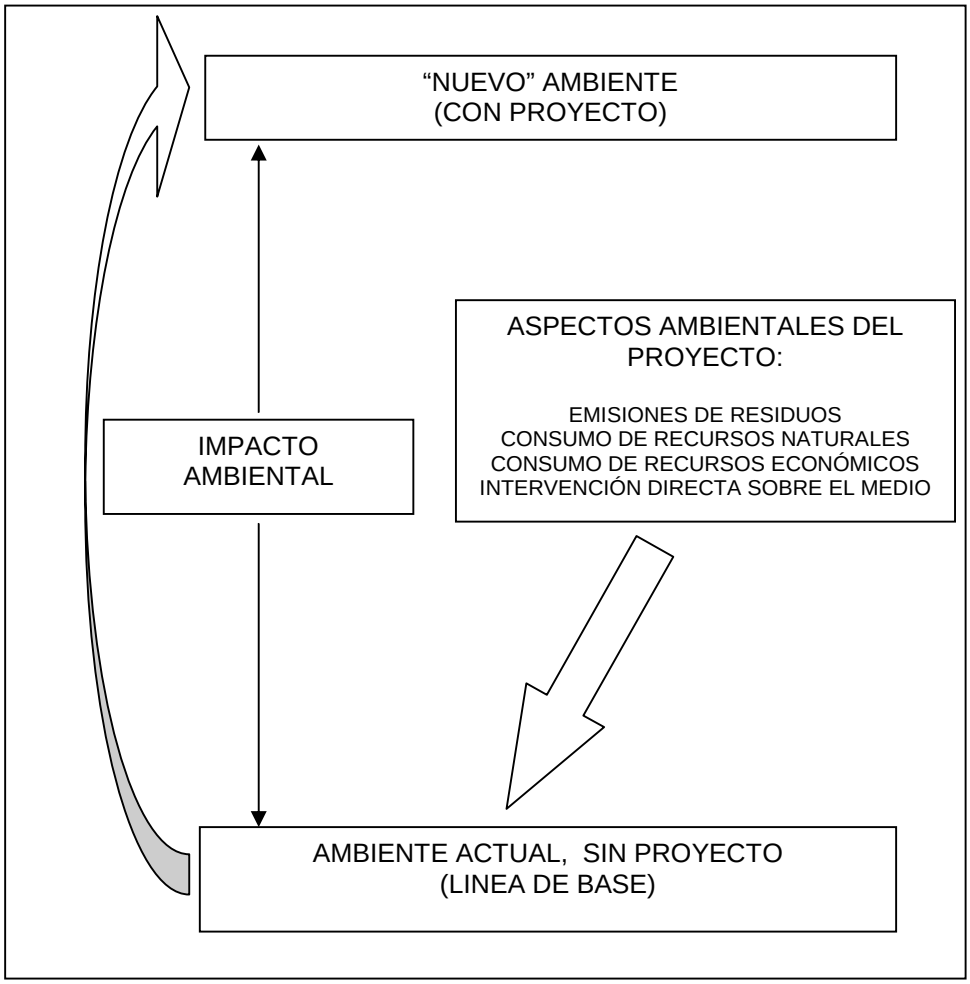



**FIGURA 7.1: RELACIÓN CAUSA – EFECTO ENTRE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES**

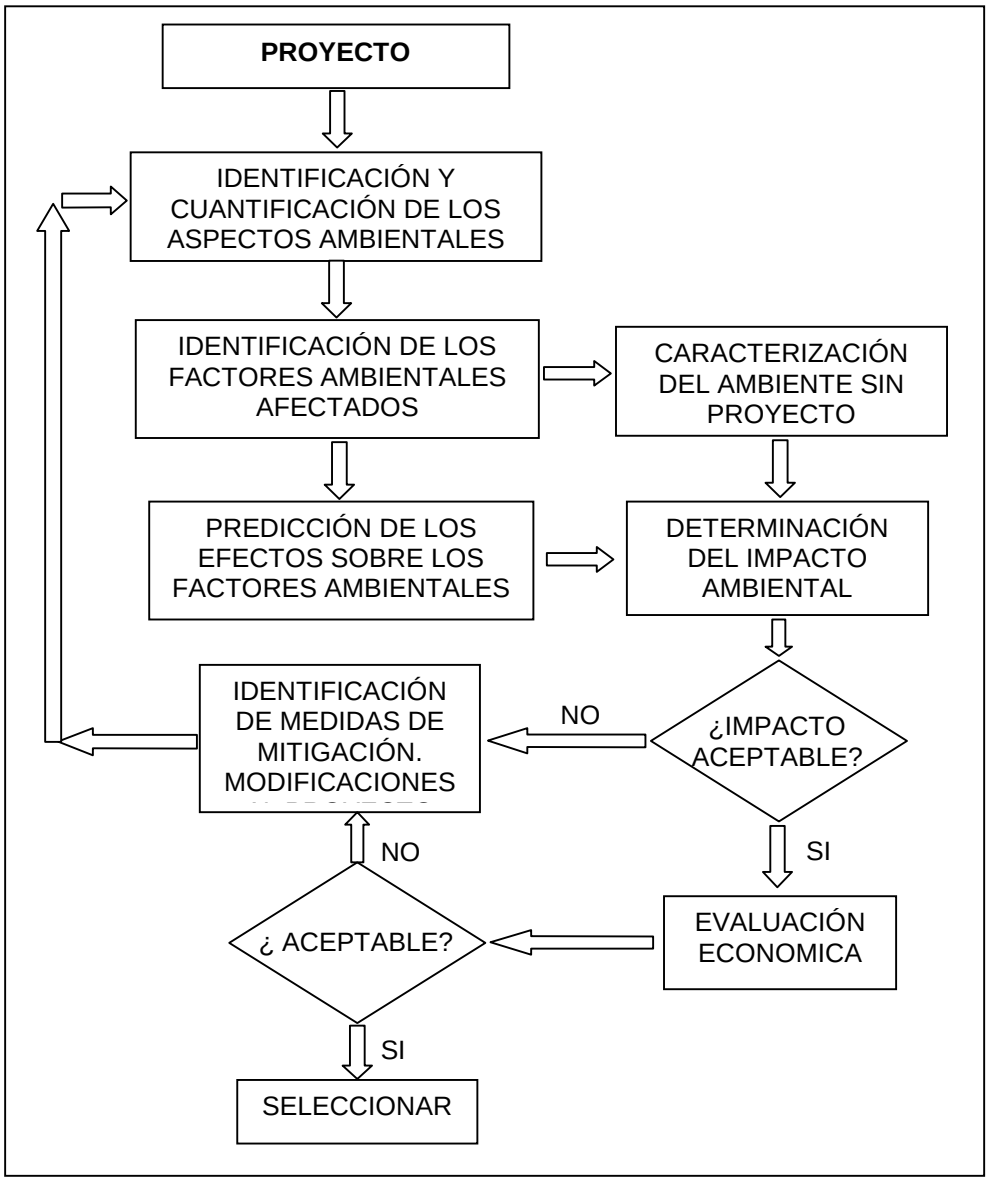



**FIGURA 7.2: LA EIA EN EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS**

## 7.2) METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Las diferentes etapas de la evaluación de impacto ambiental, ilustradas en la Figura 7.2, son:

- Identificar los aspectos ambientales del proyecto evaluado.
- Identificar los factores ambientales que pueden verse afectados por las acciones del proyecto.
- Caracterizar, cuantitativa y cualitativamente, el estado de tales factores ambientales antes de la implementación del proyecto.
- Predecir el estado de tales factores ambientales debido a las acciones previstas.
- Evaluar el impacto para cada factor ambiental afectado y determinar la aceptabilidad de tales impactos.
- Identificar y evaluar medidas de mitigación que permitan eliminar o reducir los impactos a niveles aceptables.

(En el caso de proyectos que estén en su última fase de diseño, sometidos al sistema de evaluación de impacto ambiental (de acuerdo a la Ley 19.300), se debe incluir medidas de mitigación, planes de prevención de riesgos y control de accidentes, medidas de reparación y compensación, así como un plan de seguimiento de las principales variables ambientales potencialmente afectadas).

### 7.2.1) Identificación de los Aspectos Ambientales del Proyecto

Los aspectos ambientales se definen como todas aquellas acciones o elementos del proyecto que pueden interactuar con el medio ambiente y, por lo tanto, pueden causar impacto ambiental. El medio ambiente se relaciona con el proyecto por ser:

- *Receptor* de las emisiones de la actividad productiva.
- *Fuente* de recursos naturales, materiales y energéticos.
- *Soporte* de los elementos físicos que lo conforman.

Por lo tanto, se debe identificar aquellas acciones o elementos del proyecto que:

- Implican emisiones de contaminantes.
- Implican la sobreexplotación de recursos naturales.
- Actúan sobre el medio biótico.
- Implican deterioro del paisaje.
- Modifican el uso del suelo.
- Repercuten sobre las infraestructuras.
- Modifican el entorno social, económico y cultural.

Los típicos aspectos ambientales de un proyecto son:

- Emisiones de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.
- Emisiones de otros contaminantes físicos (radiaciones, ruido, calor).
- Consumo de materias primas (renovables y no renovables).
- Consumo de agua.
- Consumo de energía (de fuentes renovables y no renovables).
- Consumo de fuerza de trabajo y otros recursos humanos.
- Intervención física directa sobre el medio.
- Requerimientos de transporte y otras demandas de infraestructura.
- Otras acciones que modifican el entorno social, económico y cultural.

Las emisiones de contaminantes y el consumo de recursos naturales son comunes a todo proyecto industrial. La intervención sobre el medio físico depende del tipo de proyecto y su envergadura, por ejemplo, excavaciones, desviaciones de cauces de río, embalses, drenajes masivos, construcción de terraplenes y grandes obras civiles, repoblaciones forestales, cambio de uso del suelo.

En general, las modificaciones que se realizan al proceso para reducir los impactos ambientales tienen como objetivo actuar sobre aquellos aspectos ambientales causantes del impacto no deseado.

Los aspectos ambientales deben ser identificados y (en lo posible) cuantificados para cada una de las fases del proyecto y para las diferentes condiciones de operación previstas:

- Fase pre-operacional (estudio previo, construcción, puesta en marcha).
- Fase operacional, bajo condiciones normales, anormales [4] y de emergencia.
- Fase de abandono del proyecto.

Los aspectos ambientales generados durante condiciones de emergencia son de gran importancia ambiental, ya que la mayoría de los impactos ambientales catastróficos ocurridos en el mundo durante el último siglo, han sucedido como consecuencia de accidentes durante el procesamiento o transporte de materiales peligrosos.

Es importante dividir cada fase del proyecto en partes homogéneas o elementos, para detectar con mayor resolución las acciones causantes de impacto. Por ejemplo, típicamente, la fase de construcción puede incluir los siguientes elementos:

- Desarrollo de la ingeniería y adquisición de equipos.

[4] Las condiciones de operación anormales son aquellas que ocurren esporádicamente, en forma más o menos programada. Por ejemplo, durante parada de planta y puesta en marcha, mantención, estado transitorio durante cambios en los niveles de producción o cambios en el tipo de producto o materia prima, etc.

- Preparación del terreno (faenas de saneamiento, habilitación de drenajes, retiro de capa vegetal y estabilización, nivelación del terreno, construcción de vías internas y áreas de almacenamiento).
- Obras civiles (instalación de servicios subterráneos, construcción de red de aguas, fundaciones y estructuras).
- Montaje de estructuras metálicas y edificios.
- Montaje de equipos.

En la literatura [5] se encuentran listas de verificación que sirven de apoyo para identificar las acciones de un proyecto que pueden ser causantes de impacto ambiental. También se puede recurrir a la opinión de expertos, o utilizar información de proyectos similares que ya se han implementado.

Los aspectos ambientales deben ser seleccionados de modo que sean ambientalmente relevantes, que sean independientes (es decir, que no dupliquen información) y, en lo posible, que sean cuantificables en magnitudes físicas.

Los aspectos ambientales deben ser cuantificados con la mayor precisión posible, indicando su magnitud física, composición, localización espacial y temporal, etc. Pueden ser obtenidos directamente de los datos del proyecto. Aquellos relacionados con las condiciones de emergencia requieren de un análisis de riesgos. Normalmente, en la EIA de proyectos que están en la etapa de diseño conceptual, sólo se consideran los aspectos ambientales bajo condiciones de operación normal.

### 7.2.2) Factores Ambientales

El medio ambiente incluye un amplio conjunto de elementos y procesos interrelacionados. Generalmente, se distinguen dos sistemas que interactúan:

- Medio Natural: Sistema constituido por los elementos y procesos del ambiente natural. A su vez, se subdivide en tres subsistemas:
  - Medio Físico (aire, tierra y agua)
  - Medio Biótico (flora y fauna)
  - Medio Perceptual (paisaje y estética) [6]

- Medio Antropizado (socio-económico-cultural): Sistema constituido por las estructuras y condiciones sociales, históricas, culturales y económicas en general, de las comunidades humanas o de la población de un área determinada. Se refiere a la población y sus atributos, como fuerza de trabajo, consumidora de bienes y servicios, sujeta a relaciones sociales, relaciones de intercambio y actividades culturales. Incluye los asentamientos humanos e infraestructuras.

[5] En este aspecto, se recomiendan las referencias de Canter (1998), Conesa Fdez.-Vitora (1993), Gómez (1994)

[6] Algunos autores consideran el Medio Perceptual como parte del Medio Socio-económico.

Los factores ambientales son los diversos componentes del medio ambiente susceptibles de ser modificados por la acción humana. Los factores ambientales considerados [7] son:

- El hombre, la flora y la fauna
- El suelo, el agua, el aire, el clima y el paisaje
- Las interacciones entre los anteriores
- Los bienes materiales y el patrimonio cultural

Los factores ambientales deben seleccionarse de modo que sean representativos del entorno afectado. Además, se requiere que los factores sean de fácil identificación conceptual y física (en mapas, en trabajo de campo, en datos estadísticos).

La valoración de dichos factores es un paso fundamental en la EIA, ya que permite establecer sus características, la calidad ambiental de cada factor o su estado de conservación, antes de la ejecución del proyecto. Se define como ***Indicador Ambiental*** de un Factor Ambiental, aquel parámetro medible que está directamente relacionado con la calidad ambiental de dicho factor. En otras palabras, un Indicador Ambiental es la expresión medible de un Factor Ambiental. Desde el punto de vista de su posibilidad de valoración, los factores ambientales se pueden clasificar en:

***1. Factores directamente cuantificables***: Son aquellos que representan en sí mismo, parámetros físicos, químicos, biológicos, económicos, u otros, que se pueden expresar en unidades de medida determinadas. Por ejemplo, el caudal de un río ($m^3/s$), la temperatura del agua (ºC), el pH del suelo, el oxígeno disuelto del agua, el ruido (dB), el nivel de empleo (nº de personas empleadas). Su valoración no ofrece mayores problemas.
***2. Factores cuantificables indirectamente a través de un Indicador Ambiental***: El factor ambiental no posee una unidad de medida concreta, y se debe recurrir a indicadores ambientales apropiados. Por ejemplo, la calidad del agua, la eutrofización, la aptitud climática, el nivel cultural de la población o la distribución espacial de la infraestructura, requieren de indicadores cuantitativos para su valoración.
***3. Factores ambientales cualitativos, no cuantificables en unidades convencionales***: Su calidad se debe expresar en base a índices medidos en escalas arbitrarias o rangos. Existen índices de valoración de objetivos, ampliamente aceptados y de uso común, como por ejemplo, índices para valorar la flora y la fauna. Otros factores, tales como el valor paisajístico, o preferencias sociales, requieren de criterios subjetivos. En general, al establecer las escalas para el valor de un factor ambiental, se debe considerar que éste incrementa con sus características de singularidad, diversidad, valor histórico, valor ecológico, rareza, madurez, representatividad, vulnerabilidad, entre otros.

No parece existir consenso en la literatura acerca de la forma de clasificar estos constituyentes del medio ambiente, en el contexto de la EIA. A modo de ejemplo,

[7] Según la legislación europea, citados por Conesa Fdez.-Vitora (1993)

se citan a continuación, tres listas de factores ambientales para proyectos específicos en EEUU [8] y aquella utilizada por el Centro de Ciencias Ambientales (EULA) de la Universidad de Concepción, que consideran diferentes clasificaciones.

Para mayor profundización sobre estos tópicos se sugiere revisar los criterios de clasificación de factores ambientales recomendados para las EIA en España, presentados detalladamente por Gómez (1994).

**TABLA 7.1: FACTORES AMBIENTALES PARA EIA DEL EJÉRCITO DE EEUU**

| | |
|---|---|
| Medio Físico | Geología |
| | Clima |
| | Recursos hídricos superficiales y subterráneos |
| | Calidad del agua |
| | Calidad del aire |
| Medio Biótico | Ecosistemas terrestres (flora y fauna) |
| | Ecosistemas acuáticos |
| | Especies con problemas de conservación |
| Medio Humano | Demografía |
| | Uso del suelo |
| | Infraestructura (vivienda, transporte, servicios, salud) |
| | Recursos arqueológicos e históricos |
| | Desarrollo y economía |

**TABLA 7.2: FACTORES AMBIENTALES PARA EIA EN CENTRALES NUCLEARES (EEUU)**

| | |
|---|---|
| Medio Físico | Localización y topografía |
| | Geología (topografía, estratigrafía, suelos y litología) |
| | Hidrología (aguas superficiales y subterráneas, calidad, caudal) |
| | Meteorología (temperatura y humedad del aire, viento, estabilidad, altura de mezcla, precipitaciones, calidad del aire) |
| Medio Biótico | Ecología (flora, fauna, hábitats, distribución y relaciones, especies en peligro) |
| Medio Humano | Demografía, suelo y uso de agua a nivel regional |
| | Referencias históricas singulares, culturales y naturales a nivel regional |

[8] Citadas en Canter (1998)

**TABLA 7.3: FACTORES AMBIENTALES PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCION DE EMBALSES (EEUU)**

| Categoría | Subcategoría | Factor Ambiental |
|---|---|---|
| Medio Terrestre | Biota terrestre (Flora, fauna) | Cultivos, vegetación, mamíferos, aves |
| | Uso del suelo, hábitat | Bosques, espacios abiertos, zonas bajas, uso del suelo |
| | Calidad de suelo | Erosión del suelo, composición química, extracción mineral |
| | Relaciones de la comunidad | Diversidad de especies |
| Medio Acuático | Biota acuática | Vegetación, zooplancton, fitoplancton, pesca deportiva y comercial, organismos intermareales, bentos, aves acuáticas |
| | Hábitat acuático | Corriente de agua, lago, humedal |
| | Calidad del agua | Composición química, capacidad de autodepuración |
| | Cantidad de agua | Variación del caudal, pérdida de la cuenca hidrológica |
| | Relaciones de la comunidad | Diversidad de especies |
| Medio Atmosférico | Calidad del aire | Composición química del aire |
| | Climatología | Dispersión |
| Medio Humano | Ruido | Nivel de ruido |
| | Estéticos | Topografía, variedad vegetacional, animales domésticos, fauna autóctona, apariencia del agua, calidad visual, olor, ruido |
| | Histórico - Arqueológico | Conjuntos históricos y arqueológicos |

**TABLA 7.4: FACTORES AMBIENTALES UTILIZADOS EN EIA POR EL CENTRO EULA – UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

| COMPARTIMENTO AMBIENTAL | SUBSISTEMA | FACTORES AMBIENTALES |
|---|---|---|
| **Medio Natural** | Medio Atmosférico | Calidad del aire (composición físico-química) |
| | | Meteorología (temperatura, pluviosidad, viento, radiación, estabilidad atmosférica ) |
| | | Nivel de ruido |
| | Medio Acuático | Hidrología (aguas superficiales y subterráneas; caudal, velocidad, morfología, calidad del agua) |
| | | Hidrogeología (acuíferos cercanos a la superficie, permeabilidad, escorrentía, etc) |
| | | Calidad del Agua (composición físico-química, temperatura, calidad biológica) |
| | | Sedimentología (turbidez, granulometría, etc) |
| | Medio Terrestre | Geomorfología (topografía, pendientes, estabilidad, erosionabilidad, deslizamientos, etc.) |
| | | Geología (estratigrafía, litología, estabilidad de taludes) |
| | | Suelo (tipo, composición, erosión, calidad del suelo, relieve) |
| | Medio Biótico | Biota terrestre (flora y fauna) (composición, riqueza, abundancia, diversidad, etc.) |
| | | Biota acuática (flora y fauna) (composición, riqueza, abundancia, diversidad, etc.) |
| **Medio Perceptual** | Medio Perceptual | Paisaje y estética (morfología del paisaje, visibilidad, armonía) |
| | | Elementos singulares |
| **Medio Antropizado** | Medio Socio-Económico-Cultural e Infraestructura | Estructura Territorial (uso del suelo, infraestructura y servicios, equipamiento, etc) |
| | | Demografía (distribución de población, dinámica poblacional, indicadores sociales) |
| | | Economía (nivel de actividad sectorial, nivel de ingresos, nivel tecnológico, etc) |
| | | Patrimonio cultural, histórico, antropológico |
| | | Salud pública y seguridad |

### 7.2.3) Identificación de los Factores Ambientales Afectados

Existen diversos métodos propuestos para identificar los factores del medio ambiente asociados a cada aspecto ambiental del proyecto, tales como:

- Listas de verificación y cuestionarios
- Consulta a expertos
- Comparación con proyectos similares ya realizados
- Matrices generales causa-efecto

Las matrices causa-efecto están conformadas, en sus filas, por los factores ambientales y, en sus columnas, por los aspectos ambientales. Para cada aspecto ambiental, se revisa uno a uno los factores ambientales y se analiza su posible interacción. Se marca la intersección cada vez que se identifica una relación causa-efecto, tal como se ilustra en la Figura 7.3 para el aspecto ambiental K y el factor ambiental J. La principal ventaja del método matricial es que entrega una relación causa-efecto directa entre los aspectos y factores impactados.

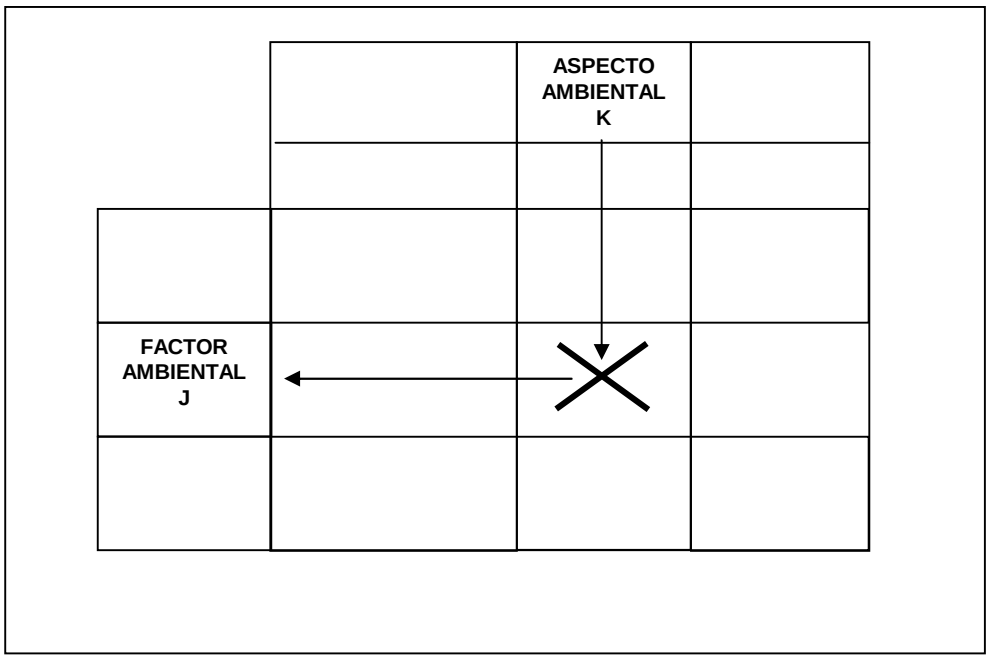



**FIGURA 7.3: MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES**

Generalmente, las relaciones entre las acciones del proyecto y los factores ambientales impactados no son simples. En muchos casos, existe una cadena de efectos primarios y secundarios que, eventualmente, puede afectar la salud y bienestar de los seres humanos o puede constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza.

Los procedimientos utilizados para identificar tales impactos se basan en listas de verificación, cuestionarios, consultas a expertos, comparaciones con proyectos similares ya realizados y matrices causa-efecto (confeccionadas con varios niveles de detalle). También se utiliza métodos cartográficos, basados en la superposición de mapas donde se presentan los factores ambientales afectados, tomando en consideración su distribución espacial.

En aquellos casos donde existen muchos impactos secundarios e inducidos, resulta útil emplear representaciones estructuradas, tales como árboles de impacto y diagramas de redes para análisis de impactos. Estas técnicas son de mucha utilidad para identificar relaciones causa-efecto a través de toda la cadena de impactos. Se recomienda revisar el texto de Canter (1998), en cuyo capítulo 3 se detallan estos métodos y se cita listas de verificación, que sirven para apoyar la identificación de impactos ambientales.

### 7.2.4) Valoración de los Impactos Ambientales

La valoración de los impactos representa una etapa clave de la EIA. Los impactos ambientales poseen una serie de atributos característicos que deben ser considerados para su valoración. En este sentido, los impactos pueden presentar las siguientes características:

| | |
|---|---|
| Naturaleza (signo): | Beneficioso o perjudicial (positivo o negativo) |
| Tipo de efecto: | Directo o indirecto (secundario) |
| Acumulación: | Simple o acumulativo |
| Sinergía: | Sinérgico o no sinérgico |
| Momento en que se produce: | Corto, mediano o largo plazo |
| Persistencia: | Temporal o permanente |
| Reversibilidad: | Reversible o irreversible |
| Posibilidad de recuperación: | Recuperable o irrecuperable |
| Periodicidad: | Periódico o irregular |
| Continuidad: | Continuo o discontinuo |

El nivel de precisión en la valoración de los impactos ambientales depende del objetivo y alcance del EIA. Al respecto, se pueden distinguir tres niveles de aproximación en la valoración de los impactos ambientales:

1. ***Interpretación subjetiva de los impactos ambientales*****,** basada en un análisis de los factores impactados y la envergadura de los aspectos ambientales. Ella debe ser fruto de una reflexión, a partir de experiencias anteriores y del conocimiento que exista acerca de las relaciones causa-efecto. El impacto ambiental se califica en base a conceptos generales, tales como: *aceptable*, *moderado*, *severo* o *crítico*. Se utiliza normalmente en

estudios preliminares, para seleccionar aquellos impactos que ameritan un estudio más elaborado.

2. ***Valoración cualitativa de los impactos identificados***, utilizando escalas de puntuación relativamente sencillas. Ello permite obtener una valoración cualitativa relativa, para comparar los impactos derivados de diversas interacciones entre las acciones del proyecto y los factores ambientales. Un buen ejemplo de este tipo de valoración cualitativa es el método matricial de Leopold, que utiliza escalas de 1 a 10 para valorar la magnitud e importancia del impacto, definidos como:

    - La magnitud del cambio en la cantidad o calidad del factor afectado. Su cuantificación puede ser aproximada o basada en modelos matemáticos aproximados.
    - La importancia del impacto, medida en términos de la importancia del factor ambiental impactado, la extensión del área impactada (algunos autores asocian la magnitud del impacto ambiental a la extensión del área impactada) y/o de las consecuencias del impacto. La asignación de un valor de la importancia de un impacto ambiental, se basa en el juicio subjetivo de las personas que están llevando a cabo el estudio.

    Dada su gran simplicidad, el método de Leopold y sus variantes posteriores, son ampliamente utilizados en EIA para estudios preliminares.

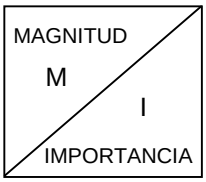
3. ***Valoración cuantitativa,*** basada en los cambios que afectan a los indicadores de impacto, como consecuencia de las acciones del proyecto. Se utilizan herramientas predictivas, tales como modelos matématicos de dispersión atmosférica, modelos de dispersión en cuerpos de agua, modelos de propagación de ruidos, modelos de calidad de vida, modelos toxicológicos, modelos de funcionamiento de ecosistemas. Dada la gran diversidad de unidades de medida para los diferentes indicadores de impacto, éstas se transforman en unidades homogéneas comparables. Para ello, se utilizan ***funciones de transformación*** apropiadas para cada caso. Así, los impactos parciales que afectan a un factor ambiental dado pueden agregarse para obtener un valor total. La valoración cuantitativa se utiliza en la EIA de un proyecto que se encuentra en etapas avanzadas, donde se requiere mayor precisión para seleccionar alternativas tecnológicas o de localización de la planta.

A continuación se revisa brevemente algunos conceptos relevantes a la valoración cualitativa y cuantitativa de los impactos ambientales.

**a) Método Matricial para Evaluación de Impacto Ambiental**

Una matriz causa-efecto simple, tal como la desarrollada por Leopold en 1971, permite obtener una descripción cualitativa de las interacciones entre los aspectos ambientales del proyecto y los factores ambientales del entorno, en términos de la magnitud y la importancia de los impactos. La matriz original de Leopold utiliza

aproximadamente 100 acciones y 90 factores ambientales. Cada elemento de la matriz representa una interacción entre el proyecto y el entorno, para la cual se estima su magnitud e importancia. Se traza una diagonal en el cuadro correspondiente al elemento y se escribe el valor de la magnitud y la importancia:




El impacto correspondiente se calcula como el producto entre la magnitud y la importancia:

Impacto Ambiental = Magnitud x Importancia

Se utiliza escalas relativas, donde la más sencilla asigna tres niveles para valorar la magnitud y la importancia del impacto:

| | | |
|---|---|---|
| 1 | = | Bajo |
| 2 | = | Medio |
| 3 | = | Alto |

En dicha escala, el impacto menor tiene un valor de 1, mientras el más alto es 9. En su trabajo original, Leopold y su grupo utilizaron una escala de 1 a 10, lo que permite una mayor amplitud de distribución entre los diferentes impactos (mínimo 1, máximo 100).

El método de Leopold permite valorar el impacto total sobre un factor ambiental, sumando todos los impactos generados por las acciones del proyecto sobre dicho factor:

$$(\mathrm{IT})_{\mathrm{K}} = \sum_{\mathrm{J=1,N}} \left( \mathrm{M}_{\mathrm{K,J}} \mathrm{I}_{\mathrm{K,J}} \right)$$

Donde:

$(IT)_K$ = Impacto total sobre el factor ambiental K.
$M_{K,J}$ = Magnitud del impacto de la acción J sobre el factor K.
$I_{K,J}$ = Importancia del impacto de la acción J sobre el factor K.
$N$ = Número total de acciones del proyecto consideradas en la matriz.

De este modo, se puede comparar los diferentes factores ambientales impactados y establecer una priorización de factores ambientales, sobre la base de su fragilidad frente a las acciones del proyecto.

Por otra parte, la sumatoria de todos los impactos anotados en una columna indica el impacto total sobre el medio ambiente causado por esa acción del proyecto. Así, se puede identificar aquellas acciones del proyecto que son críticas desde el

punto de vista ambiental, para las que se requeriría introducir modificaciones con vistas a mitigar los impactos.

Una de las principales limitaciones de este tipo de matrices radica en que no hace distinción entre impactos que ocurren en diferentes etapas del desarrollo de un proyecto. Para reducir este problema, es conveniente agrupar los aspectos ambientales del proyecto de acuerdo a su ocurrencia en el tiempo (ej.: fase de construcción, fase de operación), en matrices independientes.

Un problema similar ocurre con aquellos impactos que se manifiestan en diferentes zonas geográficas, en el caso de proyectos que abarcan una gran extensión territorial. Aquí se deberían agrupar los aspectos ambientales del proyecto en base a su zonificación, con matrices independientes para cada zona geográfica.

Además, es importante evitar duplicaciones de las interacciones, debido a una selección errónea de aspectos ambientales. Esta "doble contabilidad" es muy frecuente en proyectos de gran complejidad, donde el mismo aspecto ambiental aparece incluido en más de una columna de la matriz.

Existen extensiones de este tipo de matrices sencillas, donde se toma en consideración la probabilidad de ocurrencia del impacto ambiental. Esto permite incorporar un tercer criterio para la valoración del impacto:

$$\textit{Impacto Ambiental} = \textit{Magnitud} \times \textit{Importancia} \times \textit{Probabilidad}$$

Donde la probabilidad de ocurrencia del impacto se valora entre 0 y 1; el valor 1 representa un impacto ambiental que tiene total certidumbre de ocurrir debido a la implementación del proyecto.

Otras extensiones del método matricial utilizan más de una matriz, para diferenciar entre impactos directos e indirectos. Estas matrices por etapa son más sofisticadas y pueden ser utilizadas cuando existen cadenas de impactos complejos. Para estos efectos, también se puede utilizar diagramas de redes para identificar y valorar impactos directos e indirectos. Desgraciadamente, estas técnicas son demasiado complejas para ser aplicadas a proyectos de gran envergadura.

**b) Métodos en Base a Índices Cualitativos**

Los índices cualitativos para valorar los impactos ambientales sufridos por cada factor ambiental se calculan sobre la base de varios criterios de valoración. Estos métodos pueden ser utilizados luego de la identificación y evaluación preliminar de impactos.
La Tabla 7.5 muestra un ejemplo de criterios de valoración [9] cualitativa de impactos, que consideran el signo, intensidad, extensión, duración, probabilidad, reversibilidad e importancia del impacto.

[9] Criterios de valoración de impactos propuestos por el Prof. Adolfo Acuña, del Centro de Ciencias Ambientales (EULA) de la Universidad de Concepción, para la EIA de proyectos forestales

El indicador de Magnitud del Impacto k, ($IM_K$), se define matemáticamente como una función lineal de la intensidad, extensión territorial y duración del impacto, ponderada:

$$IM_K = I_K\, a_I + E_K\, a_E + D_K\, a_D$$

Donde:
$IM_K$ = índice de magnitud del impacto sobre el factor ambiental K.
$I_K$ = intensidad del impacto sobre el factor ambiental K**.**
$a_I$ = coeficiente de ponderación del criterio intensidad.
$E_K$ = extensión del impacto sobre el factor ambiental k.
$a_E$ = coeficiente de ponderación del criterio extensión.
$D_K$ = duración del impacto ambiental sobre el factor k.
$a_D$ = coeficiente de ponderación del criterio duración.

El impacto ambiental se valora en términos de un índice denominado Valor Integral de Impacto Ambiental (VIA), definido como:

$$VIA_K = (R_K)^{aR} \quad (IM_K)^{aIM} \quad (P_K)^{aP}$$

Donde:

$VIA_K$ = valor integral de impacto para el factor ambiental K.
$R_K$ = reversibilidad del impacto sobre el factor K.
$a_R$ = ponderación (exponencial) del criterio reversibilidad.
$IM_K$ = índice de magnitud del impacto sobre el factor K.
$a_{IM}$ = ponderación (exponencial) del criterio de importancia.
$P_K$ = probabilidad de ocurrencia del impacto sobre el factor K.
$a_P$ = ponderación (exponencial) del criterio de probabilidad.

Los coeficientes de ponderación, deben cumplir con las condiciones:

$$a_I + a_E + a_D = 1$$
$$a_R + a_{IM} + a_P = 1$$

Los coeficientes de ponderación a asignar a cada uno de los criterios deben ser especificados por el evaluador. Se propone los siguientes valores:

**TABLA 7.5: CRITERIOS PARA LA CALIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| CRITERIO | DESCRIPCIÓN | VALORACIÓN |
|---|---|---|
| **Carácter del impacto (signo)** | Establece si el cambio de cada acción sobre el ambiente es positivo o negativo. | Beneficioso = Positivo<br>Perjudicial = Negativo |
| **Intensidad** | Indica el vigor (magnitud) del cambio del factor ambiental, como consecuencia de las acciones del proyecto. Refleja el grado de alteración del factor ambiental sobre su condición basal. | Índice entre 0 y 10. El valor mínimo se aplica cuando el grado de alteración del factor es insignificante. El valor máximo implica una alteración extrema. |
| **Extensión o influencia espacial** | Expresa la superficie afectada por las acciones del proyecto o el alcance global sobre el factor ambiental. | Generalizado = 10<br>Local = 5<br>Puntual = 2 |
| **Duración del cambio (Persistencia)** | Se refiere al período durante el cual persisten los cambios ambientales. | Largo (> 10 años) = 10<br>Mediano (5-10 años) = 5<br>Corto (1-5 años) = 2 |
| **Reversibilidad** | Se refiere a la capacidad del sistema de retornar a una situación de equilibrio similar o equivalente a la inicial. | Irreversible = 10<br>Parcial = 5<br>Reversible = 2 |
| **Probabilidad (Riesgo)** | Incorpora la probabilidad de ocurrencia del efecto sobre la globalidad del componente. | Alta (> 50%) = 1,0<br>Media (10-50%) = 0,5<br>Baja (1-10%) = 0,2 |
| **Magnitud** | Corresponde a una medida que integra la intensidad, duración e influencia espacial | Calculada como función lineal de la intensidad, duración y extensión. |
| **Valor de Impacto Ambiental** | Es un índice calculado a partir de la magnitud, la reversibilidad y la probabilidad de ocurrencia del impacto ambiental | Utiliza coeficientes de ponderación |

$a_I$ = 0,40
$a_E$ = 0,40
$a_D$ = 0,20
$a_{IM}$ = 0,61
$a_R$ = 0,22
$a_P$ = 0,17

De acuerdo al método propuesto, el Valor Integral de Impacto Ambiental se clasifica de acuerdo a su importancia relativa, según las siguientes categorías:

**TABLA 7.6 VALOR INTEGRAL DE IMPACTO AMBIENTAL**

| VIA | RELEVANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL |
|---|---|
| > 8,0 | Muy alta |
| 6,0-8,0 | Alta |
| 4,0-5,9 | Media |
| 2,0-3,9 | Baja |
| < 2,0 | Muy baja |

De acuerdo al valor del VIA, los diferentes impactos se ordenan jerárquicamente y se define un criterio umbral, para decidir la aplicación y tipo de medidas de mitigación.

**c) Valoración Cuantitativa del Impacto Ambiental**

Los métodos de valoración cuantitativa de impactos ambientales se basan en indicadores de impacto, utilizados para cada factor ambiental. Tal como se mencionó anteriormente, esos indicadores pueden ser obtenidos a partir de modelos matemáticos predictivos para diferentes parámetros ambientales.

- ***Funciones de Transformación:***

Resulta conveniente transformar las unidades de los indicadores ambientales en unidades homogéneas que puedan compararse sobre una escala común. Para tales efectos se utiliza ***funciones de transformación***, que relacionan la magnitud del indicador de impacto con un Índice de Calidad Ambiental (ICA) cuya escala de valoración esté entre 0 y 1. Los textos de Gómez (1994) y Conesa Fdez.-Vitora (1993) presentan una gran variedad de funciones de transformación para diferentes parámetros ambientales, obtenidas en su mayor parte por el Instituto Batelle-Columbus. Estas funciones de transformación están representadas gráficamente mediante relaciones lineales y no lineales.

En general, el índice de calidad ambiental para un factor ambiental K, $(ICA)_K$ , se relaciona con la magnitud, de modo que tiene su valor máximo (1) cuando la calidad ambiental o su estado de conservación es excelente; por otra parte, el ICA es cero cuando la calidad o estado de conservación del factor ambiental está en su extremo más desfavorable.

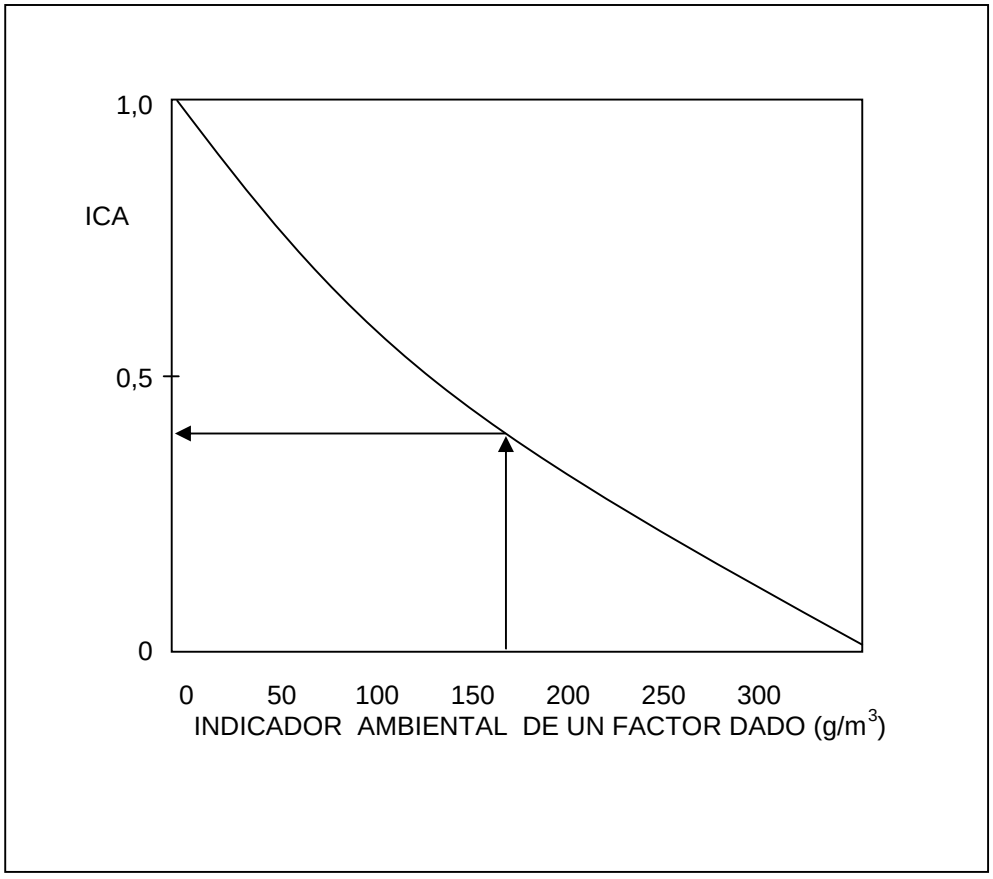



**FIGURA 7.5: EJEMPLO DE FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN**

Los factores ambientales beneficiosos, cuya presencia mejora la calidad del medio, presentan funciones de transformación con pendientes positivas. Por otra parte, los factores negativos, perjudiciales, cuya presencia reduce la calidad del medio, presentan funciones con pendiente negativa (por ejemplo, nivel de ruido, erosión).

La aplicación de Indices de Calidad Ambiental para EIA se ilustra en el método propuesto por el Instituto Batelle-Columbus, presentado a continuación.

- ***Método de Valoración Cuantitativo del Instituto Batelle-Columbus (IBC)***

Este es un método cuantitativo que utiliza indicadores de impacto homogéneos. El método propuesto por el IBC considera 18 factores ambientales, agrupados en 4 categorías, como se muestra en la Tabla 7.7.

**TABLA 7.7: FACTORES DEL MÉTODO BATELLE-COLUMBUS**

| CATEGORÍAS | FACTORES AMBIENTALES |
|---|---|
| Ecología | Especies y poblaciones terrestres y acuáticas |
| | Hábitats y comunidades terrestres y acuáticas |
| | Ecosistemas |
| Contaminación Ambiental | Contaminación del agua (calidad y cantidad de agua) |
| | Contaminación atmosférica (calidad del aire) |
| | Contaminación del suelo (erosión, uso del suelo) |
| | Contaminación por ruido (ruido) |
| Aspectos Estéticos | Del suelo (material geológico, topografía) |
| | Del aire (visibilidad, olor, sonidos) |
| | Del agua ((estética, hidrología, hidrografía) |
| | De la biota (diversidad y variedad de flora y fauna) |
| | Objetos artesanales |
| | Composición (elementos singulares, composición) |
| Aspectos de Interés Humano | Valores educacionales y científicos |
| | Valores históricos |
| | Culturas, grupos étnicos |
| | Sensaciones sociales (integración, aislamiento, admiración) |
| | Estilos de vida (empleo, vivienda, relaciones sociales) |

Tales factores ambientales están caracterizados por un total de 78 parámetros cuantitativos, indicadores de calidad ambiental. Cada parámetro debe ser eventualmente, transformado en un Índice de Calidad Ambiental con unidades homogéneas (en escala de 0 a 1), mediante la utilización de funciones de transformación apropiadas, tal como se describe en párrafos anteriores.

El Indicador de Calidad Ambiental (ICA) se estima para la situación ***sin*** proyecto y para la situación ***con*** proyecto, para así calcular el cambio neto del Indicador de Calidad Ambiental, $\Delta(ICA)_K$ , que representa el impacto esperado.

$$\Delta(ICA)_K = (ICA)_{KO} - (ICA)_{K1}$$

donde $(ICA)_{KO}$ e $(ICA)_{K1}$ son los índices de calidad ambiental del factor K, para la situación sin proyecto y con proyecto, respectivamente.

De este modo se puede valorar el impacto para cada factor ambiental, sobre una base común. La suma de los impactos de todos los factores ambientales incluidos en una categoría resulta en el impacto ambiental total para dicha categoría. Los resultados se presentan de modo tabular:

**TABLA 7.8: RESULTADOS EIA INSTITUTO BATELLE-COLUMBUS**

| Categoría Ambiental | Factores Ambientales | Indicadores | Indice de Calidad Ambiental | | | Señal de Alerta |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Sin Proyecto | Con Proyecto | Cambio Neto | |
| Ecología | | | | | | |
| Contaminación | | | | | | |
| Estética | | | | | | |
| Aspectos Humanos | | | | | | |

Generalmente, la suma de los factores ambientales se efectúa de manera ponderada, utilizando coeficientes de ponderación que se seleccionan de acuerdo a la contribución de cada factor a la situación del medio ambiente.

$$(IA)_J = \sum_{K=1,M} \left( a_{J,K} \ \Delta (ICA)_K \right)$$

Donde:

$(IA)_J$ = Es el valor del impacto ambiental total en la categoría J, medido en unidades homogéneas.

$a_{J,K}$ = Son los coeficientes de ponderación.

La aplicación exitosa de los métodos de valoración cuantitativa requiere de una sólida base de datos, modelos predictivos específicos y criterios sobre el nivel de impacto ambiental que se considera significativo.

### 7.2.5) Medidas de Mitigación

El objetivo de los procedimientos de EIA presentados en las secciones anteriores, es identificar y jerarquizar los impactos ambientales derivados de las acciones del proyecto. Si tales impactos ambientales son inaceptables, se debe identificar las medidas de mitigación para reducir el impacto ambiental a un nivel de aceptabilidad. Para ello, se requiere identificar las acciones del proyecto que son causantes de los impactos inaceptables, así como las razones por las que ocurren dichos efectos.

En general, las medidas de mitigación incluyen modificaciones a algunos de los elementos o procesos del proyecto, tales como:

- Localización de la Planta, o de alguna de sus partes.
- Cambios en el *layout.*
- Procedimientos de construcción.
- Tecnologías de proceso.
- Escala de producción.
- Cronograma de construcción o de operación.

- Cambios en los recursos materiales y energéticos a utilizar.
- Diseño del producto.
- Sistemas de tratamiento de residuos líquidos, sólidos y gaseosos.
- Aislaciones acústicas.
- Condiciones de seguridad.
- Medidas contra riesgos naturales.

En algunos casos, es posible actuar directamente sobre el entorno para reducir el impacto sobre alguno de sus componentes. Por ejemplo, favoreciendo la dispersión de los contaminantes, o los procesos naturales de regeneración (ej.: aumento de la aireación en el agua).

Finalmente, se debe señalar que las medidas de mitigación deberían ser seleccionadas sin perder de vista la factibilidad económica y técnica del proyecto.

## 7.3) LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO REQUISITO LEGAL

Aún cuando los aspectos legales ambientales caen fuera del alcance de este texto, se incluye aquí algunos elementos de la legislación ambiental chilena que son directamente relevantes para la evaluación de impacto ambiental.

La Ley 19.300, Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, fue publicada en el Diario Oficial el 9 de Marzo de 1994. Su Reglamento respectivo (Decreto 30) fue publicado en el Diario Oficial el 3 de Abril de 1997. Ambos documentos constituyen el marco de referencia legal dentro del cual se realiza los Estudios y Declaraciones de Impacto Ambiental para los proyectos y actividades que se someten al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

### 7.3.1) Proyectos o Actividades que deben someterse al SEIA

Según el Artículo 10 de la Ley 19.300, los proyectos o actividades que deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, son los siguientes (complementado con el Artículo 3 del Reglamento correspondiente):

a) Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas. En relación con las presas, drenajes, desecación, dragado, defensa o alteraciones significativas de cuerpos o cursos naturales de aguas, se consideran significativos cuando se trate de:

    a.1) Presas cuyo muro tenga una altura igual o superior a 5 (m) o una longitud de coronamiento igual o superior a 15 (m).
    a.2) Drenaje o desecación de vegas y bofedales ubicados en las Regiones I y II, cualquiera sea su superficie. Drenaje o desecación de cuerpos naturales de aguas tales como: lagos, lagunas, pantanos, marismas, turberas, vegas, humedales o bofedales, exceptuándose los identificados en

el inciso anterior, cuya superficie afectada sea igual o superior a 10 (há), tratándose de las Regiones V a VII y Metropolitana, o a 30 (há), tratándose de las Regiones VIII a XII. Se exceptúa aquí, la desecación de suelos con problemas de drenaje y cuya principal fuente de abastecimiento de agua provenga de aguas lluvias.

a.3) Dragado de fango, piedras, arenas u otros materiales de cursos o cuerpos de aguas terrestres, en una cantidad igual o superior a 20.000 ($m^3$) de material a extraer y/o remover, tratándose de las regiones IV a XII. Dragado de fango, piedras, arenas y otros materiales de cursos o cuerpos de aguas marítimos, en una cantidad igual o superior a 100.000 ($m^3$) de material a extraer y/o remover.

a.4) Defensa o alteración de un cuerpo, cauce o curso natural de agua, tal que para su modificación se movilice una cantidad igual o superior a 20.000 ($m^3$), tratándose de las regiones I a V y Metropolitana, o 50.000 ($m^3$), tratándose de las regiones VI a XII.

b) Líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje y sus subestaciones.

c) Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW.

d) Reactores y establecimientos nucleares e instalaciones relacionadas.

e) Aeropuertos, terminales de buses, camiones y ferrocarriles, vías férreas, estaciones de servicio, autopistas y los caminos públicos que puedan afectar áreas protegidas.

f) Puertos, vías de navegación, astilleros y terminales marítimos.

g) Proyectos de desarrollo urbano o turístico. Se entenderá por proyectos de desarrollo urbano, aquellos que contemplen obras de edificación y urbanización cuyo destino sea habitacional, industrial y/o equipamiento, de acuerdo a las siguientes especificaciones:

g.1) Conjuntos habitacionales con una cantidad igual o superior a 80 viviendas en áreas rurales, o 160 viviendas en zonas con límite urbano.

g.2) Proyectos de equipamiento tales como: centros comerciales, recintos para aparcamiento de vehículos; restaurantes, salas y recintos de espectáculos, discotecas y otros similares; recintos o parques de diversiones; recintos o instalaciones deportivas; recintos que se habiliten en forma permanente para la realización de ferias; establecimientos educacionales o cementerios.

Asimismo, se entenderá por proyectos de desarrollo turístico, aquellos que contemplen obras de edificación y urbanización destinados al uso habitacional y/o de equipamiento para fines turísticos, tales como: centros para alojamiento turístico; campamentos de turismo o campings; o sitios que se habiliten en forma permanente para atracar y/o guardar naves especiales empleadas para recreación.

h) Planes regionales de desarrollo urbano, planes intercomunales, planes reguladores comunales, planes seccionales, proyectos industriales o inmobiliarios que los modifiquen o que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas.

i) Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas, comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles. En cuanto a la extracción industrial de áridos, turba o greda, se entenderá que estos proyectos o actividades son industriales cuando se trate de:

i.1) Extracción de áridos o greda en una cantidad igual o superior a 400 ($m^3$/d) o 100.000 ($m^3$) totales de material extraído durante la vida útil del proyecto o actividad.
i.2) Extracción de turba en una cantidad igual o superior a 5 (t/d), en base húmeda, o 1.000 (t) totales, en base húmeda, de material extraído durante la vida útil del proyecto o actividad.

j) Oleoductos, gasoductos, ductos mineros u otros análogos.

k) Instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales. Se entenderá que estos proyectos o actividades son de dimensiones industriales cuando se trate de:

k.1) Instalaciones fabriles que presenten o cumplan, al menos una de las siguientes características o circunstancias:
k.1.1) Consumo de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, igual o superior a 300 (kg/h), calculado como el consumo mensual dividido por el número de horas de producción en el mes.
k.1.2) Potencia instalada igual o superior a 2.000 (KVA), determinada por la suma de las capacidades de los transformadores de un establecimiento industrial.
Tratándose de instalaciones fabriles en que se utilice más de un tipo de energía y/o combustibles, el límite de 2.000 (KVA) considerará la suma equivalente de los distintos tipos de energía y/o combustibles utilizados.
k.2) Instalaciones fabriles correspondientes a curtiembres, cuya capacidad de producción corresponda a una cantidad igual o superior a 30 ($m^2$/d) de materia prima de cueros.

l) Agroindustrias, mataderos, planteles y establos de crianza, lechería y engorda de animales, de dimensiones industriales. Se entenderá que estos proyectos o actividades son de dimensiones industriales cuando se trate de:

l.1) Agroindustrias, donde se realicen labores u operaciones de limpieza, clasificación de productos según tamaño y calidad, tratamiento de deshidratación, congelamiento, empacamiento, transformación biológica, física o química de productos agrícolas, y que tenga capacidad para generar

una cantidad total de residuos sólidos igual o superior a 8 (t/d) o que generen residuos tóxicos.

l.2) Mataderos con capacidad para faenar animales en una tasa total de producción final igual o superior a 12 (t/h), medida como el promedio del período de producción.

l.3) Planteles y establos de crianza y/o engorda de ganado bovino para producción de carne, donde se mantengan confinadas, en patios de alimentación, por más de un mes, un número igual o superior a 300 unidades-animal.

l.4) Planteles y establos de engorda, postura y/o reproducción de animales avícolas con capacidad para alojar diariamente una cantidad igual o superior a 100.000 pollos o 20.000 pavos; planteles de crianza y/o engorda de animales porcinos, ovinos, caprinos u otras especies similares, con capacidad para alojar diariamente una cantidad, equivalente en peso vivo, igual o superior a 50 (t).

l.5) Planteles de lechería de ganado bovino u ovino donde se mantengan confinadas, en régimen, en patios de alimentación, un número igual o superior a 300 unidades-animal.

m) Proyectos de desarrollo o explotación forestales en suelos frágiles, en terrenos cubiertos de bosque nativo, industrias de celulosa, pasta de papel y papel, plantas astilladoras, elaboradoras de madera y aserraderos, todos de dimensiones industriales. Se entenderá que estos proyectos o actividades son de dimensiones industriales cuando se trate de:

m.1) Proyectos de desarrollo o explotación forestales que abarquen una superficie única o agregada de más de 20 (há/año), tratándose de las Regiones I a IV, o de 200 (há/año), tratándose de las Regiones V a VII, incluyendo la Metropolitana, o de quinientas hectáreas anuales (500 há/año), tratándose de las Regiones VII a XI, o de 1.000 (há/año), tratándose de la Región XII, y que se ejecuten en:

– Suelos frágiles, entendiéndose por tales aquellos susceptibles de sufrir erosión severa debido a factores limitantes intrínsecos, tales como: pendiente, textura, estructura, profundidad, drenaje o pedregosidad.

– Terrenos cubiertos de bosque nativo, entendiéndose por tales, lo que se señale en la normativa pertinente.

m.2) Industria de celulosa, de pasta de papel y de papel, cuyo consumo anual de madera sea igual o superior a 350.000 ($m^3$ssc/año).

m.3) Plantas astilladoras y aserraderos, cuyo consumo de madera, como materia prima, sea igual o superior a 25 ($m^3$ssc/h).

m.4) Plantas elaboradoras de paneles, cuyo consumo de madera, como materia prima, sea igual o superior a 10 ($m^3$ssc/h).

n) Proyectos de explotación intensiva, cultivo, y plantas procesadoras de recursos hidrobiológicos. Se entenderá por proyectos de explotación intensiva aquellos que impliquen la utilización, para cualquier propósito, de recursos hidrobiológicos que se encuentren oficialmente declarados en alguna de las siguientes categorías de conservación: en peligro de extinción, vulnerables, y

raras; y que no cuenten con planes de manejo; y cuya extracción se realice mediante la operación de barcos fábrica o factoría.

ñ) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas. Se entenderá que estos proyectos o actividades son habituales cuando se trate de:

ñ.1) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización de sustancias tóxicas, con fines industriales y/o comerciales, en una cantidad igual o superior a 100 (kg/mes).
ñ.2) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización de sustancias explosivas, inflamables, corrosivas o reactivas, con fines industriales y/o comerciales, en una cantidad igual o superior a 10 (t/mes).
ñ.3) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización de sustancias radioactivas con fines industriales y/o comerciales.

o) Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos.

p) Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas o cualesquiera otra área colocada bajo protección oficial, en los casos en que la legislación respectiva lo permita.

q) Aplicación masiva de productos químicos en áreas urbanas o zonas rurales próximas a centros poblados o a cursos o masas de aguas que puedan ser afectadas. Se entenderá por aplicación masiva, los planes y programas destinados a prevenir la aparición o brote de plagas o pestes, así como también, aquellos planes y programas operacionales destinados a erradicar la presencia de plagas cuarentenarias ante emergencias fitosanitarias o zoosanitarias, que se efectúen por vía aérea sobre una superficie igual o superior a 1.000 (há). Asimismo, se entenderá que las aplicaciones en zonas rurales son próximas cuando se realicen a una distancia inferior 5 (km) de centros poblados o a cursos o masas de aguas.

### 7.3.2) Causales para la Elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental

De acuerdo al Artículo 11 de la Ley 19.300, el titular de un proyecto o actividad de los mencionados en Artículo 10 de dicha Ley, deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental, si éste genera o presenta al menos una de las siguientes características:

- Riesgo para la salud de la población.

- Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables.
- Reasentamiento de comunidades humanas, o alteraciones significativas de los sistemas de vida y costumbres.
- Localización próxima a poblaciones, recursos o áreas protegidas.
- Alteración significativa del valor paisajístico o turístico de la zona.
- Alteración a monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

El Reglamento de la Ley 19.300, en sus artículos 4 al 11, especifica con mayores detalles los efectos, características o circunstancias que definen la pertinencia de presentar un estudio de impacto ambiental. Estos se enumeran a continuación:

a) ***Genera o presenta riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de los efluentes, emisiones o residuos que genera o produce.*** A objeto de evaluar el riesgo a que se refiere el inciso anterior, se considerará:

a.1) Lo establecido en las normas primarias de calidad ambiental y de emisión vigentes.
a.2) La composición, peligrosidad, cantidad y concentración de los efluentes líquidos y de las emisiones a la atmósfera.
a.3) La frecuencia, duración y lugar de las descargas de efluentes líquidos y de emisiones a la atmósfera.
a.4) La composición, peligrosidad y cantidad de residuos sólidos.
a.5) La frecuencia, duración y lugar del manejo de residuos sólidos.
a.6) La diferencia entre los niveles estimados de ruido emitido por el proyecto o actividad y el nivel de ruido de fondo representativo y característico del entorno donde exista población humana permanente.
a.7) Las formas de energía, radiación o vibraciones generadas por el proyecto o actividad.
a.8) Los efectos de la combinación y/o interacción conocida de los contaminantes emitidos o generados por el proyecto o actividad.

b) ***Genera o presenta efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.*** A objeto de evaluar los efectos adversos significativos a que se refiere el inciso anterior, se considerará:

b.1) Lo establecido en las normas secundarias de calidad ambiental y de emisión vigentes.
b.2) La composición, peligrosidad, cantidad y concentración de los efluentes líquidos y de las emisiones a la atmósfera.
b.3) La frecuencia, duración y lugar de las descargas de efluentes líquidos y de emisiones a la atmósfera.
b.4) La composición, peligrosidad y cantidad de residuos sólidos.
b.5) La frecuencia, duración y lugar del manejo de residuos sólidos.
b.6) La diferencia entre los niveles estimados de ruido emitido por el proyecto o actividad, y el nivel de ruido de fondo representativo y

característico del entorno donde se concentre fauna nativa asociada a hábitats de relevancia para su nidificación, reproducción o alimentación.
b.7) Las formas de energía, radiación o vibraciones generadas por el proyecto o actividad.
b.8) Los efectos de la combinación y/o interacción conocida de los contaminantes emitidos y/o generados por el proyecto o actividad.
b.9) La relación entre las emisiones de los contaminantes generados por el proyecto o actividad y la calidad ambiental de los recursos naturales renovables.
b.10) La capacidad de dilución, dispersión, autodepuración, asimilación y regeneración de los recursos naturales renovables presentes en el área de influencia del proyecto o actividad.
b.11) La cantidad y superficie de vegetación nativa intervenida y/o explotada.
b.12) La forma de intervención y/o explotación de vegetación nativa.
b.13) La extracción, explotación, alteración o manejo de especies de flora y fauna que se encuentren en alguna de las siguientes categorías de conservación: en peligro de extinción, vulnerables, raras e insuficientemente conocidas.
b.14) El volumen, caudal y/o superficie, según corresponda, de recursos hídricos a intervenir y/o explotar en:
- Vegas y/o bofedales ubicados en las Regiones I y II, que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas.
- Áreas o zonas de humedales, que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas o superficiales.
- Cuerpos de aguas subterráneas que contienen aguas milenarias y/o fósiles.
- Una cuenca o subcuenca hidrográfica transvasada a otra.
- Lagos o lagunas en que se genere fluctuaciones de niveles.
b.15) La introducción al territorio nacional de alguna especie de flora o de fauna, u organismos modificados genéticamente o mediante otras técnicas similares, en consideración a:
- La existencia de dicha especie u organismo en el territorio nacional.
- Las alteraciones que su presencia pueda generar sobre otros elementos naturales y/o artificiales del medio ambiente.
b.16) La superficie del suelo susceptible de perderse o degradarse por erosión, compactación o contaminación.
b.17) La diversidad biológica presente en el área de influencia del proyecto o actividad, y su capacidad de regeneración.

c) ***Genera reasentamiento de comunidades humanas o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos.*** A objeto de evaluar si el proyecto o actividad genera reasentamiento de comunidades humanas, se considerará el desplazamiento y reubicación de personas que habitan en el lugar de emplazamiento del proyecto o actividad, incluidas sus obras y/o acciones asociadas. Asimismo, a objeto de evaluar si el proyecto o actividad, incluidas sus obras y/o acciones asociadas en cualquiera de sus etapas, genera alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos, se considerará:

c.1) Los índices de población total; de distribución urbano-rural; de población económicamente activa; de distribución según rama de actividad económica, y/o de distribución por edades y sexo.
c.2) La realización de ceremonias religiosas u otras manifestaciones propias de la cultura o del folclore del pueblo, comunidad o grupo humano.
c.3) La presencia de formas asociativas en el sistema productivo; o el acceso de la población, comunidades o grupos humanos a recursos naturales.
c.4) El acceso de la población, comunidades o grupos humanos a los servicios y equipamiento básicos.
c.5) La presencia de población, comunidades o grupos humanos protegidos por leyes especiales.

d) ***Se localiza próximo a poblaciones, recursos y áreas protegidas susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.***

e) ***Genera o presenta alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.*** A objeto de evaluar esto, se considerará:

e.1) La intervención o emplazamiento del proyecto o actividad en zonas con valor paisajístico y/o turístico.
e.2) La duración o la magnitud en que se obstruye la visibilidad a zonas con valor paisajístico.
e.3) La duración o la magnitud en que se alteren recursos o elementos del medio ambiente de las zonas con valor paisajístico o turístico.
e.4) La duración o la magnitud en que se obstruye el acceso a los recursos o elementos del medio ambiente de las zonas con valor paisajístico o turístico.
e.5) La intervención o emplazamiento del proyecto o actividad en un área declarada zona o centro de interés turístico nacional, según lo dispuesto en el Decreto ley N°1.224 de 1975.

f) ***Genera o presenta alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.*** A objeto de evaluar esto, se considerará:

f.1) La localización en, o alrededor de algún Monumento Nacional, de aquellos definidos por la Ley 17.288.
f.2) La remoción, destrucción, excavación, traslado, deterioro o modificación de algún Monumento Nacional de aquellos definidos por la Ley 17.288.
f.3) La modificación, deterioro o localización en construcciones, lugares o sitios que por sus características constructivas, por su antigüedad, por su valor científico, por su contexto histórico o por su singularidad, pertenecen al patrimonio cultural.
f.5) La localización en lugares o sitios donde se lleven a cabo manifestaciones propias de la cultura o folclore de algún pueblo, comunidad o grupo humano.

### 7.3.3) Contenidos de los Estudios de Impacto Ambiental

De acuerdo al Artículo 12 de la Ley 19.300, los contenidos mínimos detallados para la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental deben considerar los siguientes tópicos:

a) Un índice que enumerará los capítulos, temas, tablas, figuras, planos, cartografía y anexos del Estudio de Impacto Ambiental.

b) Un resumen del Estudio de Impacto Ambiental que no exceda de treinta páginas, y que contenga la descripción del proyecto o actividad; el plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable; la línea de base; la descripción de aquellos efectos, características o circunstancias del Artículo 11 de la ley que dan origen a la necesidad de efectuar un Estudio de Impacto Ambiental; la identificación, predicción y evaluación de los impactos ambientales del proyecto o actividad, incluidas las eventuales situaciones de riesgo; el Plan de Medidas de Mitigación, Reparación y Compensación, y las medidas de prevención de riesgos y control de accidentes, si correspondieren; y el plan de seguimiento de las variables ambientales relevantes que dan origen al Estudio de Impacto Ambiental.

El resumen del Estudio de Impacto Ambiental deberá ser autosuficiente, estar redactado de manera comprensible para personas no expertas en materias técnicas, señalar claramente los impactos ambientales y estar en concordancia con las materias indicadas más adelante.

c) Una descripción del proyecto o actividad que deberá contener, cuando corresponda, lo siguiente:

c.1) Los antecedentes generales, indicando:
- El nombre del proyecto o actividad; la identificación del titular y su sociedad matriz, si la hubiere.
- El objetivo del proyecto o actividad.
- Su localización según coordenadas geográficas y según división político-administrativa a nivel regional, provincial y comunal.
- La definición de las partes, acciones y obras físicas que componen el proyecto o actividad.

- La superficie que comprenderá el proyecto o actividad y el diseño de sus acciones y obras físicas.
- El monto estimado de la inversión.
- La vida útil y la descripción cronológica de las distintas etapas del proyecto o actividad.
- La justificación de la localización del proyecto o actividad.

c.2) La descripción de la etapa de levantamiento de información de terreno, señalando las acciones y obras necesarias para la recolección de datos, en caso de ser procedente.

c.3) La descripción de la etapa de construcción, indicando las acciones y requerimientos necesarios para la materialización de las obras físicas del proyecto o actividad, en caso de ser procedente.

c.4) La descripción de la etapa de operación, detallando:
- Las acciones, obras y requerimientos.
- Los procesos unitarios y globales.
- El manejo de materias primas, productos terminados e intermedios necesarios para el funcionamiento del proyecto o actividad, considerando sus medidas de mantención y conservación.

c.5) La descripción de las acciones, obras y medidas que implementará el titular del proyecto o actividad en la etapa de cierre y/o abandono, si correspondieren.

d) El plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable, el que deberá incluir, cuando corresponda, la indicación de la normativa de carácter general aplicable al proyecto o actividad, las normas de carácter específico asociadas directamente con la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza, el uso y manejo de los recursos naturales, la fiscalización y los permisos ambientales sectoriales que el proyecto o actividad requiera para su ejecución o modificación. Además, dicho plan deberá señalar la forma en la que se dará cumplimiento a las obligaciones contenidas en las normas.

e) Una descripción pormenorizada de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley 19.300 que dan origen a la necesidad de efectuar un Estudio de Impacto Ambiental.

f) La línea de base, que deberá describir el área de influencia del proyecto o actividad, a objeto de evaluar posteriormente los impactos que pudieren generarse o presentarse sobre los elementos del medio ambiente. El área de influencia del proyecto o actividad se definirá y justificará, para cada elemento afectado del medio ambiente, tomando en consideración los impactos ambientales potenciales sobre ellos. Deberá describirse aquellos elementos del medio ambiente que se encuentren en el área de influencia del proyecto o actividad, y que dan origen a la necesidad de presentar un Estudio de Impacto Ambiental. Se caracterizará el estado de los elementos del medio ambiente identificado, considerando los atributos relevantes del área de influencia, su

situación actual y, si es procedente, su posible evolución sin considerar la ejecución o modificación del proyecto o actividad. Esta descripción considerará, cuando corresponda, los siguientes contenidos:

f.1) El medio físico, que incluirá, entre otros, la caracterización y análisis del clima, la geología, la geomorfología, la hidrogeología, la oceanografía, la limnología, la hidrología y la edafología. Asimismo, considerará niveles de ruido, presencia y niveles de vibraciones y luminosidad, de campos electromagnéticos y de radiación, calidad del aire y de los recursos hídricos.

f.2) El medio biótico, que incluirá una descripción y análisis de la biota, pormenorizando, entre otros, la identificación, ubicación, distribución, diversidad y abundancia de las especies de flora y fauna que componen los ecosistemas existentes, enfatizando aquellas especies que se encuentren en alguna categoría de conservación.

f.3) El medio socio-económico, que incluirá información y análisis de población, los índices demográficos, sociales, económicos, de morbilidad y mortalidad, de ocupación laboral y otros similares que aporten información relevante sobre la calidad de vida de las comunidades afectadas. Asimismo, se describirá los sistemas de vida, la forma de organización social y/o comunitaria, y las costumbres de los grupos humanos, poniendo especial énfasis en las comunidades protegidas por leyes especiales.

f.4) El medio construido, describiendo su equipamiento, obras de infraestructura, y cualquier otra obra relevante. Además, se describirá las actividades económicas, tales como industriales, turísticas, de transporte, de servicios y cualquier otra actividad relevante existente o planificada.

f.5) El uso de los elementos del medio ambiente comprendidos en el área de influencia del proyecto o actividad, que incluirá, entre otros, una descripción del uso del suelo, de su capacidad de uso y clasificación según aptitud, si se encuentra regulado por algún instrumento de planificación territorial o si forma parte de un área bajo protección oficial.

f.6) Los elementos naturales y artificiales que componen el patrimonio histórico, arqueológico, antropoarqueológico, paleontológico, religioso y, en general, los que componen el patrimonio cultural, incluyendo la caracterización de los Monumentos Nacionales.

f.7) El paisaje, que incluirá, entre otros, la caracterización de su visibilidad, fragilidad y calidad.

f.8) Las áreas donde puedan generarse contingencias sobre la población y/o el medio ambiente, con ocasión de la ocurrencia de fenómenos naturales, el desarrollo de actividades humanas, la ejecución o modificación del proyecto o actividad, y /o la combinación de ellos. Se deberá identificar aquellos elementos del medio ambiente que digan relación con los efectos, características y circunstancias que dan origen a la necesidad de efectuar un Estudio de Impacto Ambiental.

El uso de procedimientos y metodologías necesarios para describir, caracterizar y analizar la línea de base deberá estar debidamente justificado.

g) Una predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad, incluidas las eventuales situaciones de riesgo. Para tales efectos, se

contrastará cada uno de los elementos del medio ambiente descritos, caracterizados y analizados en la línea de base con sus potenciales transformaciones derivadas de la ejecución o modificación del proyecto o actividad, considerando las etapas de levantamiento de la información de terreno, construcción, operación y abandono. Sin perjuicio de lo anterior, la predicción y evaluación de los impactos ambientales se efectuará en base a modelos, simulaciones, mediciones o cálculos matemáticos. Cuando, por su naturaleza, un impacto no se pueda cuantificar, su evaluación sólo tendrá un carácter cualitativo. Asimismo, cuando corresponda, la predicción y evaluación de los impactos ambientales se efectuará considerando el estado de los elementos del medio ambiente en su condición más desfavorable. El uso de procedimientos o metodologías necesarios para cumplir estas exigencias deberá estar debidamente justificado.

h) Un Plan de Medidas de Mitigación, Reparación y/o Compensación, que describirá las medidas que se adoptará para eliminar o minimizar los efectos adversos del proyecto o actividad y las acciones de reparación y/o compensación que se realizará, cuando ello sea procedente. Para tal efecto, dicho Plan estará compuesto, cuando corresponda, por un plan de medidas de mitigación, un plan de medidas de reparación y un plan de medidas de compensación (según lo establecido en el Párrafo 1° del Título VI del Reglamento de la Ley 19.300). Asimismo, se describirá las medidas de prevención de riesgos y de control de accidentes. Ellas tienen por finalidad permitir la intervención eficaz en los sucesos que alteren el desarrollo normal del proyecto o actividad, en tanto puedan causar daños a la vida, la salud humana o al medio ambiente.

i) Un Plan de Seguimiento de las variables ambientales relevantes que dan origen al Estudio de Impacto Ambiental, de conformidad a lo establecido en el Párrafo 2° del Título VI del Reglamento. Asimismo, dicho plan deberá contener, cuando sea procedente:
   - La definición de los elementos del medio ambiente que serán objeto de medición y control.
   - Los parámetros que serán utilizados para caracterizar el estado y evolución de dichos elementos.
   - La identificación de los sitios de medición y control.
   - Las características técnicas de los equipos e instrumentos, y los procedimientos y metodologías que se utilizarán para el funcionamiento de aquellos.
   - La frecuencia de las mediciones, y cualquier otro aspecto relevante.

j) La descripción de las acciones realizadas previamente a la presentación del Estudio de Impacto Ambiental, en relación a consultas y/o encuentros con organizaciones ciudadanas o con personas naturales directamente afectadas, si corresponde, incluyendo los resultados obtenidos de dichas iniciativas. Asimismo, se podrá definir un programa de acciones destinadas a asegurar la participación informada de la comunidad organizada en el proceso de evaluación de impacto ambiental del correspondiente Estudio presentado, y que a juicio del titular del proyecto o actividad sea necesario implementar.

k) Un apéndice del Estudio de Impacto Ambiental, que incluirá toda la información documentada que sirva de apoyo para la comprensión del Estudio, ordenada en forma de anexos, tales como:

k.1) Informes de laboratorio, legislación detallada atingente, estudios específicos, desarrollo de cálculos matemáticos, figuras, mapas, planos, tablas, fotografías u otros.
k.2) El listado de los nombres de todas las personas que participaron en la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental, incluyendo sus profesiones e indicando las funciones y tareas específicas que desarrollaron.

### 7.3.4) Otras Consideraciones Legales

Finalmente, se debe señalar que el Reglamento de la Ley 19.300, en su Título VII, Artículos 66 al 97, enumera y explica los diferentes permisos ambientales sectoriales que deben ser considerados por el proponente del proyecto. Dichos permisos tienen relación con las emisiones de residuos líquidos, sólidos y gaseosos, la explotación de recursos naturales, el emplazamiento de instalaciones, el cambio de uso del suelo, actividades de construcción, etc.

De particular importancia son las Normas de Emisión y las Normas de Calidad Ambiental, que deberán ser consideradas en detalle cuando se analice el impacto ambiental derivado de las emisiones de residuos materiales y energéticos (a la fecha de edición de este texto, varias de estas normas se encuentran en pleno trámite). Asimismo, se debe considerar las disposiciones legales sobre seguridad y salud ocupacional, algunas de las cuales se enumeran en la Tabla 7.9.

**TABLA 7.9 DISPOSICIONES NORMATIVAS RELEVANTES A UN EIA**

| |
|---|
| D.S. N° 594 de 2000 (745/92): Establece las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo |
| D.S. Nº 40/69: Aprueba reglamento sobre prevención de riesgos profesionales. |
| D.S. Nº 48/84: Aprueba reglamento de calderas y generadores de vapor. |
| D.S. Nº 133/84: Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas y equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeñe en ellas u opere tales equipos. |
| D.S. Nº 3/85: Aprueba reglamento de protección radiológica de instalaciones radiactivas. |
| D.S. Nº 379/85: Aprueba reglamento sobre requisitos mínimos de seguridad para el almacenamiento y manipulación de combustibles líquidos derivados del petróleo destinados a consumos propios. |
| D.S. Nº 29/86: Almacenamiento de gas licuado. |
| D.S. Nº 50/88 y D.S. Nº 95/95: Modifica D.S. Nº 40/69 que aprobó el reglamento sobre prevención de riesgos profesionales. |
| D.S. Nº 90/96: Reglamento de seguridad para almacenamiento, refinación, transporte y expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo. |
| D.S. Nº 298/94: Reglamento sobre el transporte de cargas peligrosas por calles y caminos. Incorpora las siguientes NCh del INN, haciéndolas obligatorias:<br>NCh 382/98 : Sustancias peligrosas terminología y clasificación general.<br>NCh 2.120/1-9/98 : Sustancias peligrosas.<br>NCh 2.190/93 : Sustancias peligrosas. Marcas, etiquetas y rótulos.<br>NCh 2.245/93 : Hoja de datos de seguridad de productos químicos |
| Norma NCh 388/Of. 55 / D.S. 1.314: Prevención y extinción de incendios en almacenamiento de inflamables y explosivas. |
| Norma NCh 385/Of. 55 / D.S. 954: Seguridad en el transporte de materiales inflamables y explosivos. |
| Norma NCh 387/Of. 55 / D.S. 1.314: Medidas de seguridad en el empleo y manejo de materias primas inflamables. |
| Norma NCh 758/Of. 71 / Res. 110: Sustancias peligrosas, almacenamiento de líquidos inflamables. Medidas particulares de seguridad. |
| Norma NCh 389/Of. 72 7 D.S. 1.164: Sustancias peligrosas. Almacenamiento de sólidos, líquidos y gases inflamables. Medidas generales de seguridad. |
| Norma NCh 1.411/4 Of. 78 / D.S. 294: Prevención de Riesgos. Parte 4: Identificación de riesgos de materiales. |
| Norma NCh 2.164/Of. 90 / D.S. 16: Gases comprimidos, gases para uso en la industria, uso médico y uso especial. Sistema S.I. unidades de uso normal. |
| Norma NCh 1.377/Of. 90 / D.S. 383: Gases comprimidos, cilindros de gases para uso industrial. Marcas para la identificación del contenido y de los riesgos inherentes. |

Esta lista está lejos de ser completa y se presenta para ilustrar el amplio marco normativo en materias de medio ambiente, seguridad y salud ocupacional en Chile, enfatizando la necesidad de contar con apoyo profesional experto en dicho tema.

**BIBLIOGRAFÍA**


Ahmad, Y., Sammy G., "Guidelines to Environmental Impact Assessment in Developing Countries", UNEP, Hodder and Stoughton, (1985)

Canter L.W. "Manual de Evaluación de Impacto Ambiental". 2ªed. McGraw Hill. Madrid (1998)

Conesa Fdez-Vitora V. "Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental". Ediciones Mundi-Prensa, Madrid (1993)

Erickson P.A. "A Practical Guide to Environmentl Impact Assessment". Academic Press, San Diego (1994)

Gómez O. D. "Evaluación de Impacto Ambiental", 2ªed., Editorial Agrícola Española SA, Madrid (1994)

Morales A. "Antecedentes y Métodos para la Evaluación de Impacto Ambiental". Ed. Anibal Pinto, Concepción, Chile (1998)

Rau, J., Wooten D. "Environmental Impact Analysis Handbook", McGraw Hill. New York (1980)

World Bank. "Environmental Assessment Sourcebook Sectorial Guidelines", Vol. II y III. World Bank Ed., New York. (1991)

# CAPÍTULO 8

# GESTIÓN AMBIENTAL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS

## 8.1) INTRODUCCIÓN

En capítulos anteriores se revisó los principios tecnológicos relevantes para lograr diseños con mínimo impacto ambiental. Sin embargo, por muy "limpia" que haya sido la concepción de tales diseños, dicho objetivo no será logrado si no se lleva conjuntamente a cabo una gestión apropiada.

***Definiciones:***

***Sistema de Gestión Ambiental****: Es la Parte del Sistema Global de Gestión de la Empresa, cuyo objetivo es desarrollar, implementar, lograr, revisar, y mantener la Política Ambiental de la Empresa.*

A medida que aumenta la preocupación por mantener y mejorar la calidad ambiental y proteger la salud humana, las empresas de los países más avanzados dirigen progresivamente su atención a los potenciales impacto ambientales que pueden resultar de sus actividades, productos o servicios. El desempeño ambiental de una organización adquiere cada vez más importancia para determinar la posición de ésta en el mercado. El logro de un desempeño ambiental apropiado exige a la organización un compromiso con un enfoque sistemático de gestión, además de un mejoramiento continuo del sistema de gestión.

Es necesario destacar que un sistema de gestión ambiental (SGA) proporciona orden y consistencia para que las organizaciones orienten las preocupaciones ambientales a través de la asignación de recursos, la asignación de responsabilidades, y la evaluación continua de las prácticas, procedimientos y procesos.

La gestión ambiental es una parte integral del sistema de gestión global de una organización, y su diseño es un proceso continuo e interactivo. La estructura, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos para implementar políticas, objetivos y metas ambientales, pueden (y deben) coordinarse con los esfuerzos existentes en otras áreas (ej.: operaciones, finanzas, calidad, salud y seguridad ocupacional).

La Figura 8.1 ilustra los principales componentes de un sistema de gestión moderno, aplicables a todos los ámbitos de la gestión de la empresa.

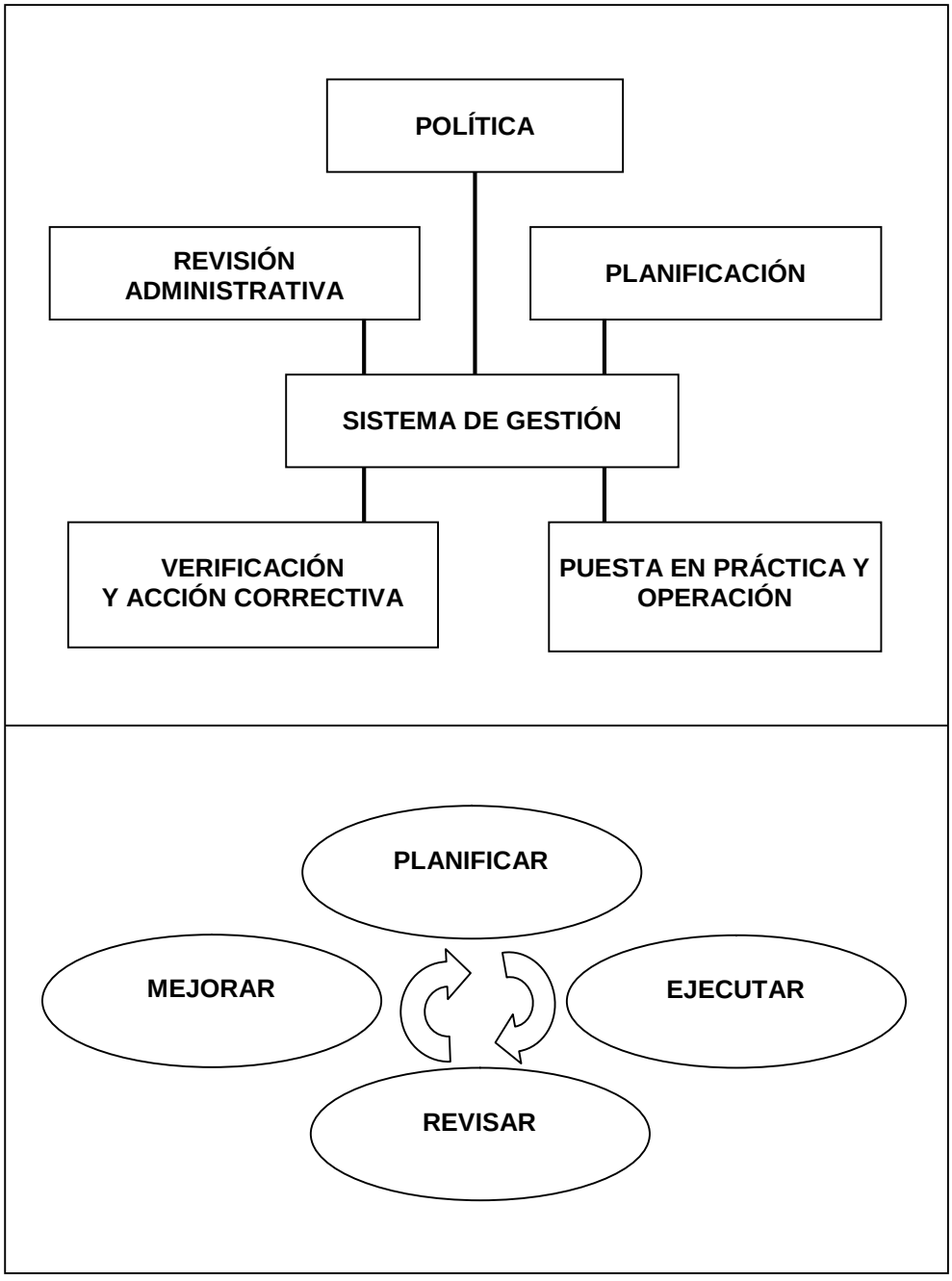



**FIGURA 8.1: COMPONENTES DE UN SISTEMA DE GESTIÓN MODERNO**

Los principios claves para implementar o mejorar un SGA incluyen, entre otros:

- Reconocer que la gestión ambiental se encuentra entre las prioridades corporativas más importantes.
- Establecer y mantener la comunicación con las partes internas y externas.
- Determinar los requisitos legislativos y los aspectos ambientales asociados a las actividades, productos o servicios de la organización.
- Desarrollar el compromiso de la gerencia y de los empleados con la protección ambiental, asignando claramente los compromisos y responsabilidades.
- Estimular la planificación ambiental a través de todo el ciclo de vida del producto o proceso.
- Establecer un proceso para alcanzar los niveles de desempeño ambiental proyectados.
- Proporcionar recursos apropiados y suficientes, incluyendo la capacitación, para alcanzar los niveles de desempeño proyectados sobre una base continua.
- Evaluar el desempeño ambiental respecto de la política, objetivos y metas ambientales de la organización, y buscar su mejoramiento donde sea apropiado.
- Establecer un proceso de gestión para auditar y revisar el SGA, y para identificar las oportunidades para mejorar el sistema y el desempeño ambiental resultante.
- Estimular a los contratistas y proveedores para que establezcan un SGA.

La elección dependerá de factores tales como:

- Política de la organización.
- Nivel de madurez de la organización; si ya está aplicando una gestión sistemática que pueda facilitar la introducción de la gestión ambiental sistemática.
- Posibles ventajas y desventajas, en relación a la posición en el mercado, la reputación existente y las relaciones externas.
- Tamaño de la organización.

**Beneficios de contar con un SGA**

Una organización debería implementar un SGA efectivo, para ayudar a proteger la salud humana y el medio ambiente de los impactos potenciales de sus actividades, productos o servicios, y para ayudar en la mantención y mejoramiento de la calidad ambiental. Un SGA puede ayudar a una organización a reforzar la confianza de las partes interesadas, ya que:

- Existe un compromiso de la gerencia para satisfacer las disposiciones de su política, objetivos y metas;
- El énfasis se ha puesto en la prevención, más bien que en la acción correctiva;
- Puede proporcionar evidencia que existe una preocupación y cumplimiento reglamentario razonables;
- El diseño de los sistemas incorpora el proceso de mejoramiento continuo.

Una organización cuyo sistema de gestión incorpore un SGA, tiene un marco que le permite equilibrar e integrar los intereses económicos y ambientales, pudiendo obtener ventajas competitivas significativas.

Los beneficios potenciales asociados a un SGA efectivo incluyen:

- Asegurar a los clientes que existe un compromiso para una gestión ambiental demostrable.
- Evitar acusaciones de *dumping.*
- Mantener buenas relaciones públicas/comunitarias.
- Satisfacer los criterios del inversionista y mejorar el acceso al capital.
- Obtener seguros a costo razonable.
- Mejorar la imagen y la participación en el mercado.
- Cumplir los criterios de certificación del vendedor.
- Mejorar el control de costos.
- Reducir los incidentes que puedan resultar en responsabilidades legales.
- Demostrar un cuidado razonable.
- Mejorar la eficiencia de utilización de los recursos materiales y energéticos.
- Facilitar la obtención de permisos y autorizaciones.
- Fomentar el desarrollo y compartir las soluciones ambientales.
- Mejorar las relaciones entre la industria y las entidades fiscalizadoras.

Existen varios estándares relacionados con sistemas de gestión ambiental (ej.: EMAS, BS7750, ISO14000), que se comparan en la Tabla 8.1.

De estos, el que ha adquirido mayor relevancia recientemente, es el estándar ISO14000[1]. ISO 14000 se refiere a un conjunto de normas que proporcionan los elementos de un SGA a las organizaciones.

Los temas cubiertos en la serie ISO 14000 pueden dividirse en dos áreas (ver Figuras 8.2 y 8.3).

- **Normas de Evaluación de la Organización**

    - Sistema de Gestión Ambiental (ISO 14001, 14004)
    - Auditoría Ambiental (ISO 14010-12)
    - Evaluación de Desempeño Ambiental (ISO 14031)

[1] ISO (*International Organization for Standarization) :* es un organismo internacional no gubernamental, con sede en Ginebra, con más de 100 agrupaciones o países miembros. Su objetivo fundamental es buscar la estandarización a nivel internacional. Los países están representados en ISO por autoridades designadas dentro de ellos.
En los Estados Unidos está representado por el American National Standars Institute (ANSI), Instituto Nacional Norteamericano de Normas. Son parte de la ANSI: EPA (Agencia para la Protección del Ambiente en Estados Unidos), OSHA (Administración para la Seguridad y la Salud laboral) y DOE (Departamento de Energía). En Chile, ISO está representado por el Instituto Chileno de Normalización.

- **Normas de Evaluación de Productos**

    - Clasificación (Etiquetado) Ambiental (ISO 14020-24)
    - Evaluación de Ciclo de Vida (ISO 14040-43)
    - Aspectos Ambientales en las Normas de Productos (ISO 14060)

Para obtener la certificación de ISO 14000, una organización debe demostrar total conformidad con el documento del Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001, que contiene los requisitos auditables en forma objetiva, con fines de certificación/registro o autodeclaración. Por otra parte, la ISO 14004 proporciona información complementaria, incluyendo ejemplos, descripciones y opciones, que pueden ser utilizados como una guía por quienes deseen poner en práctica un SGA.

Es importante establecer una breve comparación entre las Normas ISO 9001, relacionadas con los sistemas de gestión de calidad, y la ISO 14001:

- Ambas incluyen los elementos de compromiso y responsabilidad de la dirección, documentación de administración del sistema, control de documentos, control operacional, capacitación, vigilancia y medición, no conformidad y acción correctiva, registro y auditorías.

- Por otra parte, la ISO 9001 incluye elementos de planificación, de calidad, identificación de productos y rastreos, así como técnicas estadísticas. En cambio, la ISO 14001 incluye elementos de aspectos ambientales, requerimientos legales, objetivos y metas, programas de gestión ambiental, comunicaciones y preparación, y respuestas a emergencias.

A continuación se presenta algunos principios y herramientas de apoyo, para el desarrollo e implementación de un SGA, de acuerdo a los contenidos de la Norma ISO 14004.

**TABLA 8.1: COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES NORMAS SOBRE SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

| ITEM | ISO 14001 | BS 7750 | EMAS |
|---|---|---|---|
| **Tipo de Norma** | Norma voluntaria por consenso para el sector privado | Norma Nacional Voluntaria | Reglamento de la Unión Europea |
| **Aplicabilidad** | 1.- Organización como un todo o parte de ella.<br>2.- Actividades, productos y servicios en cualquier sector de organizaciones no industriales. | 1.- En el Reino Unido y otros países desarrollados.<br>2.- A la organización como un todo o parte de ella<br>3.- Todas las actividades y sectores de organizaciones no industriales | 1.- En la Unión Europea, en instalaciones individuales, actividades industriales específicas de un sitio. |
| **Enfoque** | Hace énfasis en el SGA, enlace indirecto a mejoras ambientales. | Hace énfasis en el SGA, y permite que las mejoras ambientales surjan del sistema. | Hace énfasis en las mejoras en el desempeño ambiental en un sitio, y establece requerimientos de comunicación a las partes interesadas. |
| **Compromiso de política** | 1.- A una mejora constante del SGA.<br>2.- A la prevención de la contaminación.<br>3.- A cumplir con la legislación ambiental aplicable, y a compromisos voluntarios | 1.-A una mejora constante del desempeño ambiental. | 1.- A una mejora constante del desempeño ambiental.<br>2.-A el cumplimiento con la legislación ambiental aplicable. |

**TABLA 8.1 (continuación) ....**

| ITEM | ISO 14001 | BS 7750 | EMAS |
|---|---|---|---|
| **Revisión inicial del ambiente** | Sugerido en un anexo, pero no requerido en la norma. | Sugerido pero no especificado en la norma. | Exigida en el reglamento. |
| **Auditorías** | Se requiere auditorías del SGA; vigilancia y medición de las características ambientales clave. La frecuencia de las auditorías no se especifica. | Se requiere auditorías del SGA. Auditorías para el desempeño ambiental no son exigidas. La frecuencia de las auditorías no se especifica. | Se requiere auditorías del SGA; procesos, datos y desempeño ambiental. Se exige que las auditorías se practiquen al menos cada tres años. |
| **Comunicación pública** | Sólo debe hacerse pública la política ambiental. Otras comunicaciones externas deben ser consideradas, pero lo que se comunica queda a criterio de la dirección | Sólo debe hacerse pública la política ambiental. Otras comunicaciones externas deben ser consideradas, pero lo que se comunica queda a criterio de la dirección. | Deben estar a disposición del público: una descripción de la política ambiental, su programa y sistemas de control Se requiere una declaración ambiental pública y una declaración anual simplificada incluyendo información real. |

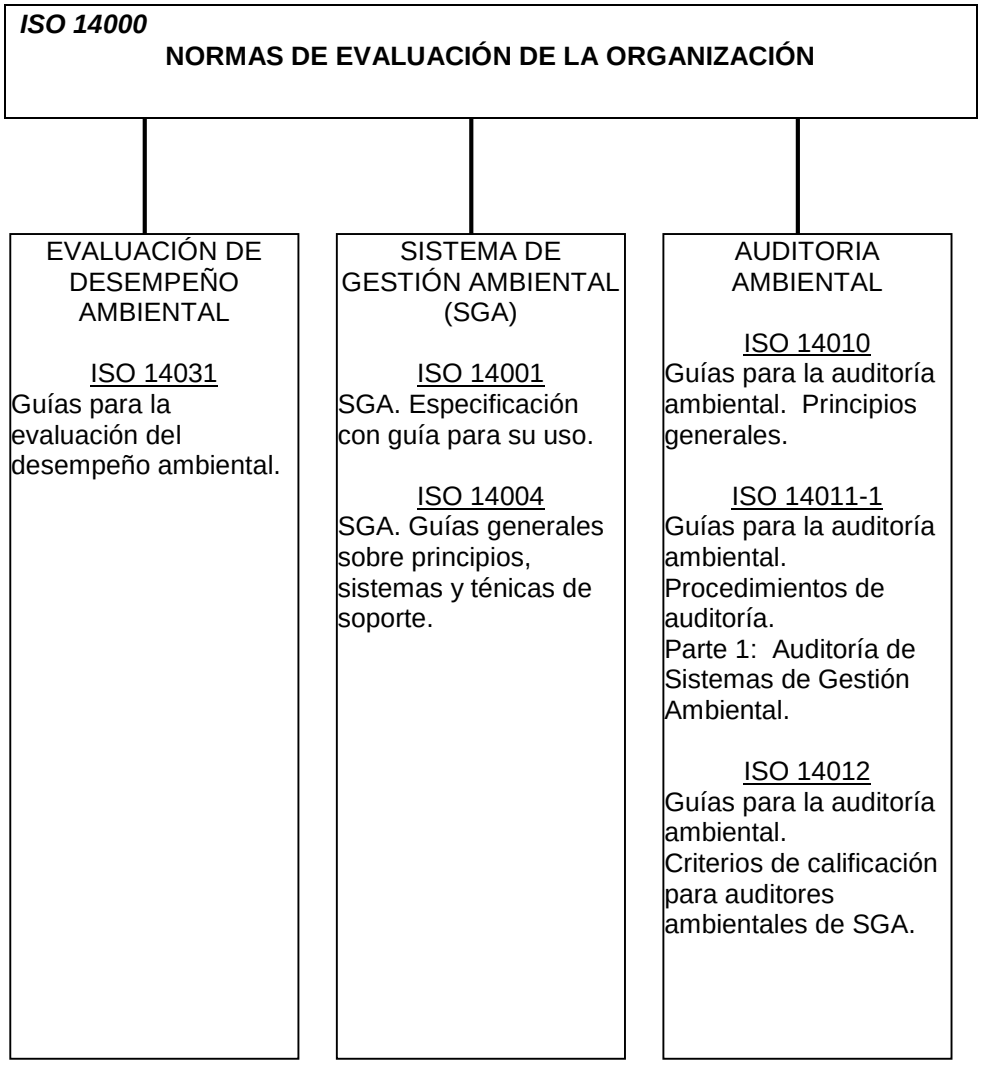



**FIGURA 8.2: NORMAS ISO 14000. EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN.**

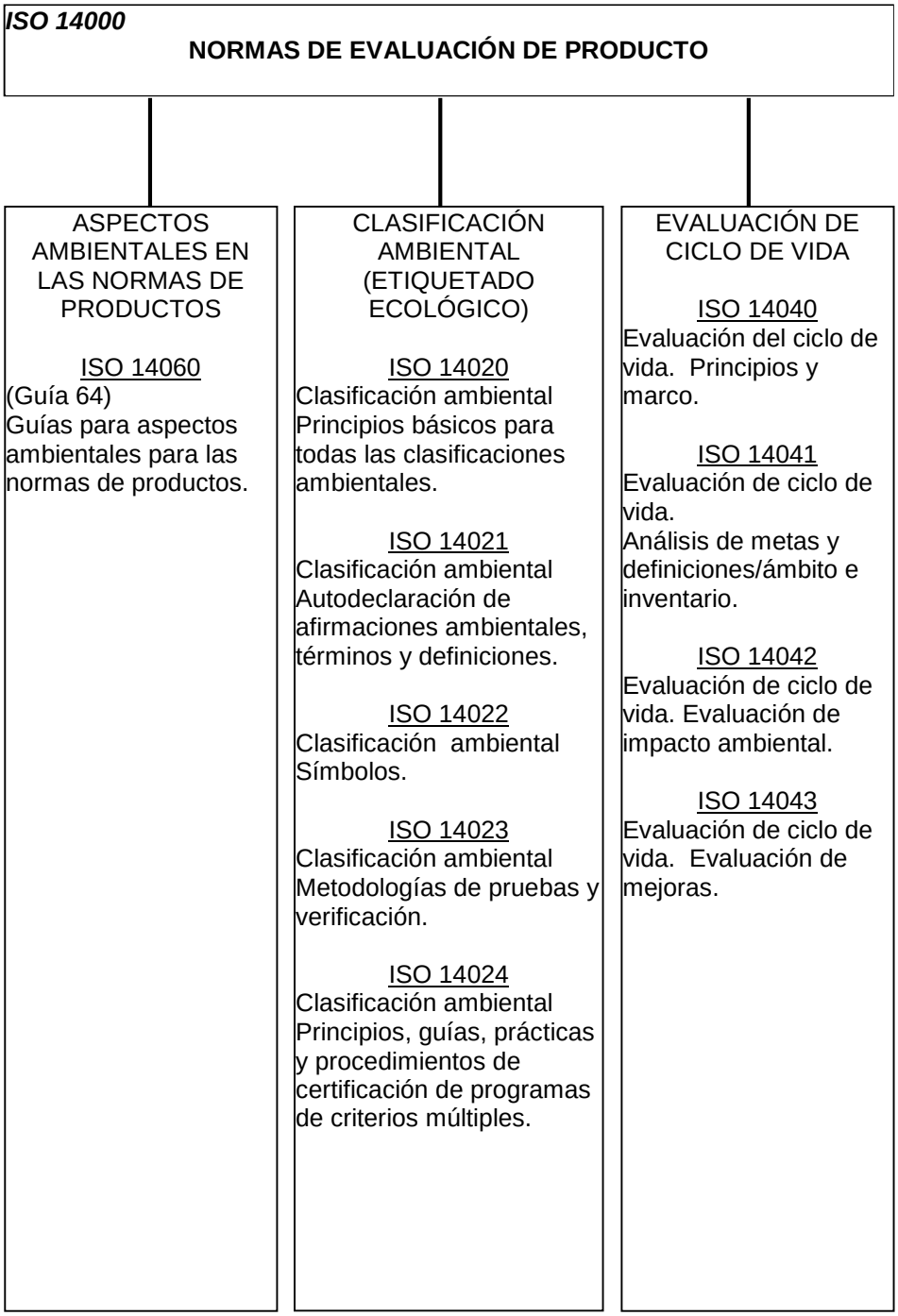



**FIGURA 8.3: NORMAS ISO 14000. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO.**

## 8.2) DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTION AMBIENTAL

La Norma ISO 14004 proporciona una guía para el desarrollo e implementación de sistemas y principios de gestión ambiental, y su coordinación con otros sistemas de gestión. Las directrices de esta norma son aplicables a cualquier organización, independientemente del tamaño, tipo o nivel de madurez que esté interesada en desarrollar, implementar y/o mejorar un SGA. En las próximas secciones se presenta los principales tópicos que deben ser considerados para desarrollar e implementar un sistema de gestión ambiental, siguiendo los lineamientos planteados en ISO 14004.

### 8.2.1) Definiciones

Es necesario mencionar aquí las principales definiciones que esta norma establece para los términos que se emplean:

***Ambiente***: Medio en el cual opera una organización, incluyendo aire, agua, suelo, recursos naturales, flora, fauna, seres humanos, y su interrelación. *En este contexto, "medio" abarca desde el interior de una organización hasta el sistema global.*

***Aspecto ambiental:*** Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el ambiente. Un aspecto ambiental significativo es un aspecto ambiental que tiene o puede tener un impacto ambiental significativo.

***Auditoría del SGA***: Proceso de verificación sistemático y documentado, para obtener y evaluar objetivamente una evidencia, con la cual se puede determinar si el SGA de la organización cumple con el criterio de auditoría del SGA establecido por la organización, y comunicar los resultados de este proceso a la gerencia.

***Desempeño (o comportamiento) ambiental***: Resultados del SGA susceptibles de medición, relacionados con el control de los aspectos ambientales de una organización, basados en su política, objetivos y metas ambientales.

***Impacto ambiental***: Cualquier cambio en el ambiente, sea adverso o beneficioso, que es resultado total o parcial de las actividades, productos o servicios de una organización.

***Mejoramiento continuo***: Proceso que consiste en perfeccionar el SGA para alcanzar mejoras en el desempeño ambiental global de acuerdo con la política ambiental de la organización.

***Meta ambiental***: Requisito detallado de desempeño, cuantificado cuando ello sea posible. Aplicable a la organización o a partes de ella. Producto de los objetivos ambientales, que es necesario establecer y cumplir a fin de alcanzar esos objetivos.

***Objetivo ambiental***: Meta ambiental global (preferentemente, cuantitativa) que surge de la política ambiental que una organización se propone a sí misma alcanzar.

***Organización***: Compañía, corporación, firma, empresa, autoridad o institución, o parte de éstas, sean colectivas o no, públicas o privadas, que tiene sus propias funciones y administración. Para organizaciones que tienen más de una unidad operacional, una sola unidad operacional puede ser definida como una organización.

***Parte interesada***: Individuo o grupo involucrado en el desempeño ambiental de una organización o afectado por éste.

***Política ambiental***: Declaración que efectúa la organización de sus intenciones y principios, en relación con su desempeño ambiental global, que proporciona un marco para la acción y el establecimiento de sus objetivos y metas ambientales.

***Prevención de la contaminación***: Uso de procesos, prácticas, materiales o productos que evitan, reducen o controlan la contaminación, los cuales pueden incluir reciclado, tratamiento, cambios en el proceso, mecanismos de control, uso eficiente de recursos y sustitución de materiales.

### 8.2.2) Principios y elementos del sistema de gestión ambiental (SGA)

El modelo de SGA se basa los siguientes principios (ver Figura 8.4):

***Principio 1: Compromiso y política***

Una organización debería definir su política ambiental y asegurar el compromiso con su SGA.

***Principio 2: Planificación***

Una organización debería formular un plan para satisfacer su política ambiental.

***Principio 3: Implementación***

Una organización debería desarrollar las capacidades y mecanismos de apoyo necesarios para alcanzar su política, objetivos y metas ambientales.

***Principio 4: Medición y evaluación***

Una organización debería medir, monitorear y evaluar su desempeño ambiental.

***Principio 5: Revisión y mejoramiento***

Una organización debería revisar y mejorar continuamente su SGA, con el objeto de mejorar su desempeño ambiente global.

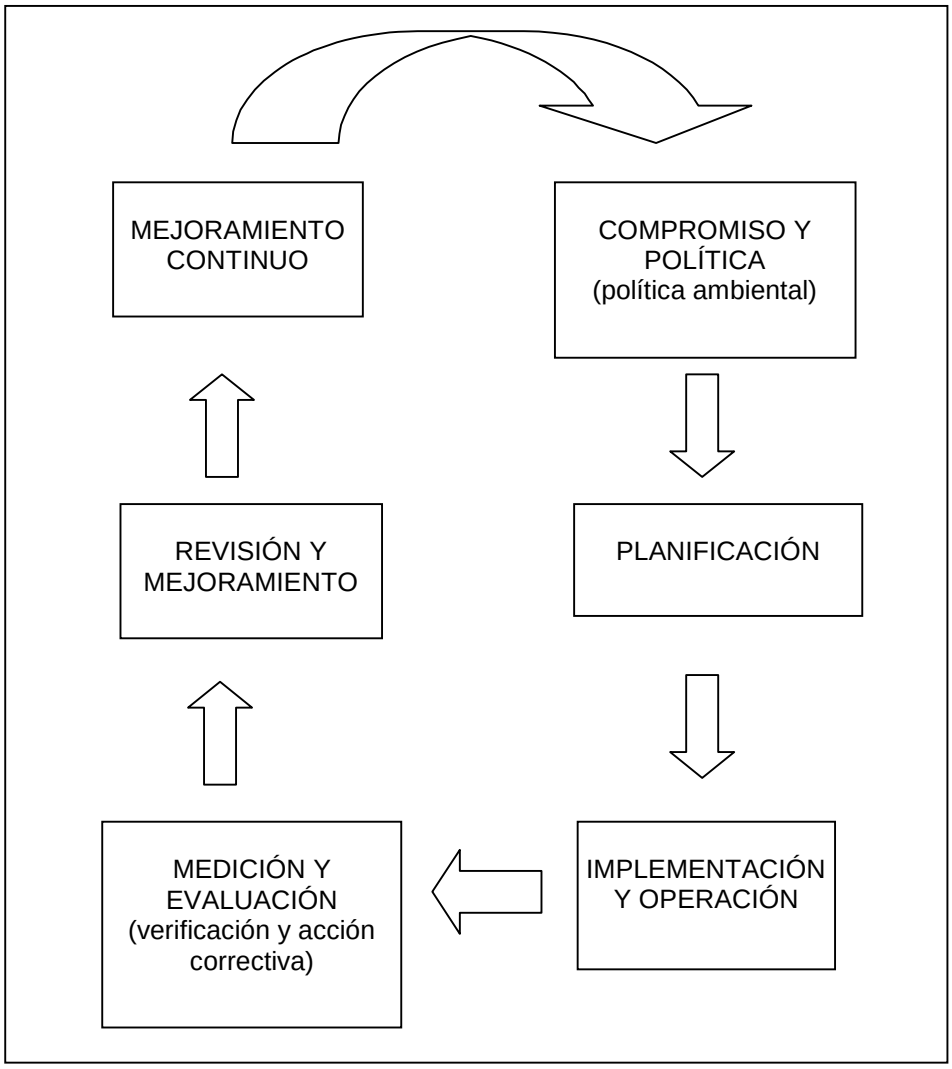



**FIGURA 8.4: MODELO DEL SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

### 8.2.3) Compromiso y política

***Principio 1: Compromiso y política***

Una organización debería definir su política ambiental y asegurar el compromiso con su SGA. La organización debería comenzar donde exista un beneficio obvio, por ejemplo, centrándose en el cumplimiento reglamentario, limitando las fuentes de responsabilidad legal o usando materiales en forma más eficiente.

A medida que la organización acrecienta su experiencia, y su SGA comienza a tomar forma, se puede poner en práctica procedimientos, programas y tecnologías para mejorar aún más el desempeño ambiental. Así, a medida que se desarrolla el SGA, será posible integrar las consideraciones ambientales a todas las decisiones comerciales.

**Compromiso y liderazgo de la alta gerencia**

Para asegurar el éxito, una etapa primaria del desarrollo o mejoramiento de un SGA implica la obtención del compromiso de la alta gerencia de la organización, para mejorar la gestión ambiental de sus actividades, productos o servicios. El compromiso y liderazgo continuo de la alta gerencia son decisivos.

**Revisión ambiental inicial**

La posición actual de una organización con respecto al ambiente puede establecerse por medio de una revisión ambiental inicial. La revisión inicial puede comprender lo siguiente:

- Identificación de los requisitos legales y reglamentarios.
- Identificación de los aspectos ambientales de sus actividades, productos o servicios, para determinar aquellos que tienen o pueden tener impactos ambientales y responsabilidades legales significativos.
- Evaluación del desempeño comparado con criterios internos, normas externas, reglamentos, códigos de práctica y guías pertinentes.
- Prácticas y procedimientos de gestión ambiental existentes.
- Identificación de políticas y procedimientos existentes relacionados con adquisiciones y actividades contractuales.
- Retroalimentación a partir de la investigación de incidentes previos de no cumplimiento.
- Oportunidades para ventajas competitivas.
- Los puntos de vista de las partes interesadas.
- Funciones o actividades de otros sistemas de la organización que pueden permitir o impedir el desempeño ambiental.

En todos los casos, se debería considerar las condiciones de operación normal, anormal, y emergencias. El proceso y los resultados de la revisión ambiental inicial se deberían documentar. Además, se debería identificar las oportunidades para el desarrollo de un SGA.

Se deben especificar las actividades de la organización, operaciones específicas o sitios específicos a revisar.

Algunas técnicas comunes para efectuar una revisión incluyen:

- Cuestionarios,
- Entrevistas,
- Listas de verificación,
- Inspección directa y medición,
- Revisión de registros,
- Benchmarking

Las organizaciones, incluyendo las pequeñas y medianas empresas (PyME), pueden consultar diversas fuentes externas, tales como:

- Organismos gubernamentales en relación con leyes y permisos.
- Bibliotecas o bases de datos locales o regionales. Sitios en Internet.
- Otras organizaciones para intercambio de información.
- Asociaciones industriales.
- Organizaciones de consumidores más importantes.
- Fabricantes de los equipos en uso.
- Relaciones comerciales (ej. aquellas que transportan y eliminan desechos).
- Ayuda profesional.

**Política ambiental**

Una política ambiental establece el sentido general de dirección y fija los principios de acción para una organización. *La política ambiental establece el objetivo en cuanto al nivel de responsabilidad y desempeño ambiental requeridos de la organización, en comparación con los cuales serán juzgadas todas las acciones posteriores*.

Un creciente número de organizaciones internacionales, entre las que se incluyen los gobiernos, las asociaciones industriales y los grupos de ciudadanos, han elaborado principios ambientales rectores. En particular, la Agenda 21 acordada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (Rio de Janeiro, 1992), constituye un marco fundamental que puede ser utilizado para definir el alcance del compromiso ambiental de una organización. Principios rectores como estos pueden servir para que la organización desarrolle su política, la cual debe ser adecuada a sus características específicas y a las condiciones en que se encuentra inmersa.

La responsabilidad por el establecimiento de una política ambiental descansa generalmente en la alta gerencia de la organización. La gerencia tiene la responsabilidad de implementar la política y proporcionar el aporte para formular y modificar la política.

Una política ambiental debería considerar lo siguiente:

- Misión, visión, valores y convicciones centrales de la organización.
- Comunicación con las partes interesadas.
- Mejoramiento continuo.
- Prevención de la contaminación.
- Principios ambientales rectores.
- Coordinación con otras políticas de la organización (ej.: calidad, salud y seguridad ocupacional).
- Condiciones específicas locales o regionales.
- Cumplimiento de reglamentos, leyes y otros criterios ambientales pertinentes que la organización ha suscrito.

Algunas materias que se deben considerar en la política ambiental:

1.- ¿Tiene la organización una política ambiental pertinente a sus actividades, productos o servicios?
2.- ¿La política refleja los valores y los principios rectores de la organización?
3.- ¿Ha sido aprobada la política ambiental por la alta gerencia; se ha identificado y facultado a alguien para supervisar e implementar la política?
4.- ¿La política sirve como guía para establecer objetivos y metas ambientales?
5.- ¿Es la política una guía para que la organización monitoree la tecnología y las prácticas de gestión apropiadas?
6.- ¿Qué compromisos están incluidos en la política ambiental; por ejemplo, apoyo para un mejoramiento continuo, apoyo para prevenir la contaminación, monitorear, satisfacer o exceder los requisitos legales, y consideración de las expectativas de las partes interesadas?

Las materias tratadas en la política dependen de la naturaleza de la organización. Además de cumplir con las reglamentaciones ambientales, la política puede establecer compromisos para:

- Minimizar cualquier impacto ambiental adverso y/o significativo de los nuevos desarrollos, mediante el uso de procedimientos y planificación de gestión ambiental integrados.
- Desarrollar procedimientos de evaluación del desempeño ambiental y de los indicadores asociados.
- Incorporar conceptos de análisis del ciclo de vida.
- Diseñar productos de modo que se minimicen sus impactos ambientales en la producción, uso y disposición.
- Prevenir la contaminación, reducir los desechos y el consumo de recursos (materiales, combustibles y energía), y comprometerse a recuperar y reciclar cuando sea factible, como una alternativa a la disposición después del uso.
- Educar y capacitar.
- Compartir la experiencia ambiental.
- Involucrar y comunicarse con las partes interesadas.
- Respetar los principios del desarrollo sustentable.
- Estimular el uso del SGA por parte de proveedores y contratistas.

### 8.2.4) Planificación

***Principio 2: Planificación***

Una organización debería formular un plan para cumplir con su política ambiental. Los elementos del SGA relacionados con la planificación incluyen:

- Identificación de los aspectos ambientales y evaluación de los impactos ambientales asociados.
- Requisitos legales.
- Política ambiental.
- Criterio de desempeño interno.
- Objetivos y metas ambientales.
- Planes ambientales y programa de gestión.

**Identificación de los aspectos ambientales y evaluación de los impactos ambientales asociados**

La política, los objetivos y las metas de una organización, deberían estar basados en un cabal conocimiento de los aspectos ambientales y los impactos ambientales significativos asociados a sus actividades, productos o servicios. La identificación de los aspectos ambientales es un proceso permanente que determina el impacto ambiental pasado, actual y potencial (positivo o negativo), producto de las actividades de una organización. En este proceso también se incluye la identificación de la situación potencial reglamentaria, legal y comercial que afecta a la organización. Además, podría incluir la identificación de los problemas relacionados con la salud y la seguridad ocupacional, y la evaluación del riesgo ambiental.

Algunas materias que se debe considerar en la identificación de los aspectos ambientales y la evaluación de los impactos ambientales son las siguientes:

1.- ¿Cuáles son los aspectos ambientales de las actividades, productos y servicios de la organización?
2.- ¿Pueden las actividades, productos o servicios de la organización generar algún impacto ambiental adverso significativo?
3.- ¿Tiene la organización un procedimiento para evaluar los impactos ambientales de nuevos proyectos?
4.- ¿Requiere la localización de la organización una consideración ambiental especial; por ejemplo, debido a la existencia de áreas ambientales sensibles?
5.- ¿De qué modo se verán afectados los aspectos ambientales y sus impactos asociados, ante los cambios contemplados para las actividades, productos o servicios?
6.- ¿Cuán significativos o graves son los impactos ambientales potenciales si se produce una falla en el proceso?
7.- ¿Con qué frecuencia surgirá la situación que podría conducir al impacto?
8.- ¿Cuáles son los aspectos ambientales significativos, considerando la magnitud e importancia de los impactos?

9.-¿Los impactos ambientales significativos tienen un alcance, local, regional o global?

La relación entre los aspectos ambientales y los impactos ambientales es una relación de causa y efecto. Un aspecto ambiental se refiere a un elemento de una actividad, producto o servicio de una organización, que puede tener un impacto beneficioso o adverso en el ambiente. Por ejemplo, podría involucrar una descarga accidental de insumos peligrosos, una emisión de contaminantes, el consumo de materia prima renovable, la reutilización de un material residual, la generación de ruido, etc. Por otra parte, un impacto ambiental se refiere al cambio que ocurre en el ambiente como resultado del aspecto. Entre los ejemplos de impactos se podrían incluir los efectos sobre la salud humana, reducción de la actividad microbiana del suelo, deterioro de la calidad del aire, la contaminación del agua, el agotamiento de los bosques nativos, la reducción del ozono estratosférico, etc.

La identificación de los aspectos ambientales y la evaluación de los impactos ambientales asociados, es un proceso que se puede tratar en cuatro etapas.

*Etapa 1: Seleccionar una actividad, un producto o un servicio*

La actividad, el producto o el servicio seleccionado debería ser lo bastante grande para permitir un examen significativo, y lo bastante pequeño para poder ser comprendido en forma suficiente.

*Etapa 2: Identificar aspectos ambientales de la actividad, del producto o del servicio*

Identificar la mayor cantidad de aspectos ambientales posibles asociados a la actividad, el producto o el servicio seleccionado. Los aspectos ambientales más frecuentes son, entre otros:

- Emisiones de residuos líquidos, sólidos y gaseosos
- Producción de bienes y servicios
- Consumo de materias primas, de insumos, de agua, de energía y combustibles
- Requerimientos de fuerza de trabajo
- Requerimientos de servicios externos (transporte, mantención, limpieza, etc)
- Requerimientos de suelo

Estos aspectos ambientales deben detallarse para cada actividad seleccionada, en las diferentes fases del proceso:

- Construcción
- Puesta en marcha
- Operación normal
- Operación anormal (paradas y partidas programadas),
- Emergencias
- Cierre de las operaciones.

Es fundamental identificar aquellos aspectos ambientales que son gestionables, es

decir, que pueden ser modificados por acciones de la organización.

*Etapa 3: Identificar los impactos ambientales*

Se debe identificar la mayor cantidad posible de impactos ambientales (reales y potenciales, positivos y negativos) asociados a cada aspecto identificado.

La Tabla 8.2 muestra algunos ejemplos de identificación de impactos..

**TABLA 8.2: EJEMPLOS DE IDENTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS A ALGUNOS ASPECTOS AMBIENTALES**

| ACTIVIDAD, PRODUCTO O SERVICIO | ASPECTO AMBIENTAL | IMPACTO AMBIENTAL |
|---|---|---|
| Manipulación de materiales peligrosos | Potencial para derrame accidental. | Contaminación del suelo o del agua o del aire (negativo). Puede afectar la salud y la seguridad de la población, y destruir la biota. |
| Sistemas de refrigeración | Emisión de compuestos CFC | Reducción de la capa de ozono estratosférico e incremento de la radiación UV sobre la superficie terrestre (efecto global). Posibles efectos sobre la salud humana y estabilidad de los ecosistemas |
| Unidad termo-eléctrica, generación de vapor | Emisión de $CO_2$ | Incremento de gases invernadero e incremento de la temperatura global (efecto global). Efectos de largo plazo sobre el ciclo hidrológico, inundación de zonas costeras. |
| | Emisión de $SO_2$ | Deterioro de calidad del aire. Posibles efectos sobre la salud humana y estabilidad de los ecosistemas |
| Formulación de papel con mayor uso de fibra reciclada. | Utilización de papel reciclado. | Conservación de recursos naturales (plantaciones forestales) (positivo). |
| Mantención de vehículos y mejoramiento de la eficiencia de los motores. | Emisiones de productos de combustión, . | Mejoramiento de la calidad del aire (positivo). |

El deterioro de la calidad ambiental puede afectar negativamente la salud y calidad de vida de los seres humanos, y la estabilidad de los ecosistemas.

En general, es conveniente identificar los receptores que se verían afectados por los aspectos ambientales. Dichos receptores pueden presentar diferentes niveles de sensibilidad o vulnerabilidad frente a las perturbaciones generadas por los aspectos ambientales. Algunos de los receptores comúnmente encontrados son:

- Seres humanos, comunidades específicas,
- Actividades económicas vulnerables
- Biota animal y vegetal
- Sistema hidrológico, superficial y subterráneo
- Sistema atmosférico, calidad del aire.
- Suelo agrícola
- Lugares singulares (valor histórico, cultural, estético)
- Infraestructura, recursos urbanos.

Se puede utilizar cualquiera de las técnicas de identificación de impacto ambiental revisadas en el Capítulo 7.

*Etapa 4: Evaluación de la significancia de los impactos*

Para identificar los aspectos ambientales significativos, se debe determinar la significancia de cada uno de los impactos ambientales identificados, asociados a cada aspecto ambiental. La Tabla 8.3 muestra algunos atributos que pueden ser utilizados para fines de evaluación de impacto.

**TABLA 8.3: ATRIBUTOS A CONSIDERAR EN LA EVALUACION DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES**

| CONSIDERACIONES AMBIENTALES | CONSIDERACIONES COMERCIALES |
|---|---|
| Magnitud del impacto.<br>Gravedad del impacto.<br>Probabilidad de ocurrencia.<br>Duración del impacto.<br>Extensión territorial del impacto. | Situación legal y reglamentaria<br>Dificultad para cambiar el impacto.<br>Costo de cambiar el impacto.<br>Efecto del cambio en otras actividades<br>Preocupación de las partes interesadas.<br>Efecto en la imagen pública de la organización. |

La aplicación de modelos cuantitativos puede ayudar a formar un juicio respecto a la magnitud de las modificaciones que sufren los parámetros ambientales afectados (se recomienda revisar los criterios mencionados en el Capítulo 7).

**Requisitos legales y otros requisitos**

La organización deberá establecer y mantener procedimientos para identificar, tener acceso y comprender todos los requisitos legales, y otros requisitos suscritos por ésta, atribuidos directamente a los aspectos ambientales de sus actividades, productos o servicios.

Algunas materias que se deben considerar sobre requisitos legales y otros requisitos:

1.- ¿De qué modo la organización tiene acceso e identifica los requisitos legales y otros requisitos?
2.- ¿De qué modo la organización conoce los requisitos legales y otros?
3.- ¿De qué modo la organización conoce de los cambios en los requisitos legales y otros?
4.- ¿De qué modo la organización comunica a los empleados las informaciones relativas a los requisitos legales y otros?

Para mantener el cumplimiento reglamentario, una organización debería identificar y comprender los requisitos reglamentarios que se aplican a sus actividades, productos o servicios. Pueden existir reglamentos en diversas formas:

- Normas de calidad ambiental.
- Normas de emisión.
- Reglamentos específicos para la actividad (ej. permisos sectoriales).
- Reglamentos específicos para los productos o servicios de la organización.
- Reglamentos específicos del sector industrial de la organización.
- Leyes ambientales generales, autorizaciones, licencias y permisos.

Se puede usar diversas fuentes para identificar los reglamentos ambientales y los cambios en curso, incluyendo:

- Instituciones ambientales, públicas y privadas.
- Asociaciones o grupos industriales. Servicios profesionales especializados.
- Bases de datos comerciales. Sitios en Internet. Software especializados.
- Publicaciones internacionales.

Para facilitar el seguimiento actualizado de los requisitos legales, una organización puede establecer y mantener una lista de todas las leyes y reglamentos, pertenecientes a sus actividades, productos o servicios.

**Criterios de desempeño ambiental**

Se debe desarrollar e implementar los criterios y prioridades internos, cuando los criterios externos no satisfagan las necesidades de la organización o no existan. El criterio de desempeño interno, junto con los criterios externos, ayudan a la organización en el desarrollo de sus propios objetivos y metas. Estos aspectos se abordan en la Norma ISO 14031 (ver sección 8.3).

Se debe establecer criterios claramente definidos, cuantitativos o cualitativos, para determinar el nivel de desempeño logrado. Algunas áreas donde se puede establecer criterios de desempeño interno:

- Medición y mejoramiento ambiental.
- Reducción del riesgo de los procesos.
- Prevención de la contaminación
- Conservación de los recursos.

- Proyectos.
- Cambios en el proceso.
- Gestión de materiales peligrosos.
- Gestión de desechos.
- Gestión del agua (ej. aguas residuales, de lluvias, subterráneas).
- Monitoreo de la calidad del aire.
- Consumo de energía.
- Transporte
- Sistemas de gestión.
- Responsabilidades del personal.
- Adquisición, gestión de la propiedad y cesión de activos.
- Proveedores y Contratistas.
- Gestión del producto.
- Comunicaciones ambientales.
- Relaciones reglamentarias.
- Respuesta y preparación para incidentes ambientales.
- Conocimiento y capacitación ambiental.

**Objetivos y metas ambientales**

Se debería establecer objetivos para satisfacer la política ambiental de la organización. Estos objetivos son las metas globales para el desempeño ambiental, identificadas en la política ambiental. Cuando una organización establezca sus objetivos, también debería tener en cuenta los hallazgos pertinentes de las revisiones ambientales y los aspectos ambientales significativos.

En ese momento se puede establecer las metas ambientales para lograr estos objetivos dentro de un período especificado. Las metas deberían ser específicas y cuantificables.

Una vez establecidos los objetivos y metas, la organización debería considerar el establecimiento de indicadores del desempeño ambiental susceptibles de medición. Estos indicadores pueden usarse como la base para un sistema de evaluación del desempeño ambiental, y pueden proporcionar información sobre la gestión ambiental y sobre los sistemas operacionales.

Los objetivos y metas se pueden aplicar ampliamente a través de una organización o, en forma más limitada, a actividades específicas al sitio o actividades individuales. Los objetivos y metas se deberían revisar y examinar periódicamente, teniendo en consideración las opiniones de las partes interesadas.

Algunas materias que se deben considerar en los objetivos y metas ambientales:

1.- ¿De qué modo los objetivos y metas ambientales reflejan la política ambiental y los impacto ambientales significativos asociados a las actividades, productos o servicios de la organización?

2.- ¿De qué modo los empleados responsables por el logro de los objetivos y metas han tenido participación en su desarrollo?
3.- ¿De qué modo se ha considerado las opiniones de las partes interesadas?
4.- ¿Qué indicadores específicos susceptibles de medición se ha establecido para los objetivos y metas?
5.- ¿De qué modo los objetivos y metas se revisan y examinan regularmente a fin de que reflejen los mejoramientos deseados en el desempeño ambiental?

Los objetivos pueden incluir compromisos para:

- Reducir los residuos y el agotamiento de recursos.
- Reducir o eliminar la liberación de contaminantes hacia el ambiente.
- Diseñar productos para minimizar su impacto ambiental en la producción, uso y disposición final.
- Controlar el impacto ambiental en las fuentes de materia prima.
- Minimizar cualquier impacto ambiental significativo adverso derivado de los nuevos desarrollos.
- Promover la conciencia ambiental entre los empleados y la comunidad.

El avance hacia un objetivo se puede medir generalmente usando indicadores de desempeño ambiental, tales como los que se muestran en las Tablas 8.5, 8.6 y 8.7, más adelante.

**Programa de Gestión Ambiental**

Dentro de la planificación general de sus actividades, una organización debería establecer un programa de gestión ambiental dirigido a la totalidad de sus objetivos ambientales. Los programas de gestión ambiental deberían establecer cronogramas, recursos y responsabilidades para alcanzar los objetivos y metas ambientales de la organización.

Dentro del marco de trabajo proporcionado por la planificación de la gestión ambiental, un programa de gestión ambiental identifica las acciones específicas en orden de prioridad para la organización. Estas acciones pueden tratar procesos individuales, proyectos, productos, servicios o instalaciones.

Para lograr una mayor efectividad, la planificación de la gestión ambiental debería integrarse al plan estratégico de la organización. Los programas de gestión ambiental ayudan a la organización a mejorar su desempeño ambiental. Ellos deberían ser dinámicos y revisados regularmente para que reflejen los cambios en los objetivos y metas de la organización.
Algunas materias que se deben considerar en el (los) programa(s) de gestión ambiental:

1.- ¿Cuál es el procedimiento de la organización para desarrollar los programas de gestión ambiental?
2.- ¿El proceso de planificación de la gestión ambiental involucra a todas las partes responsables?
3.- ¿Existe un procedimiento para revisiones periódicas del programa?

4.- ¿De qué modo estos programas tratan las materias relacionadas con recursos, responsabilidad, tiempos y prioridades?
5.- ¿De qué modo los programas de gestión ambiental responden a la política ambiental y a las actividades de planificación general?
6.- ¿De qué modo se monitorean y revisan los programas de gestión ambiental?

El siguiente es un ejemplo de un programa de gestión ambiental.

**TABLA 8.4: EJEMPLO DE UN PROCESO PARA DESARROLLAR UN PROGRAMA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

| COMPROMISO Y POLÍTICA | PLANIFICACIÓN | EJEMPLO |
|---|---|---|
| *Compromiso de política 1* | | *Conservar los recursos naturales* |
| | *Objetivo 1* | *Minimizar el uso de agua, siempre que sea técnica y económicamente factible* |
| | *Meta 1* | *Reducir el consumo de agua en sitios seleccionados en 15% respecto de los niveles actuales, dentro de un año* |
| | *Indicador 1* | *$m^3$ agua / ton producto* |
| | *Programa ambiental 1* | *Reutilización de agua en operaciones de lavado.* |
| | *Acción 1* | *Instalar equipos para reciclar el agua residual de lavado del Proceso A para reutilizarla en el Proceso B* |
| | *Recursos comprometidos* | *De acuerdo al proyecto de ingeniería, presupuesto acordado para completar las modificaciones a las instalaciones consideradas.* |

### 8.2.5) Implementación

***Principio 3: Implementación***

Para una implementación efectiva, una organización debería desarrollar las capacidades y mecanismos de apoyo necesarios para alcanzar su política, objetivos y metas ambientales. Las capacidades y el apoyo que requiere la organización evolucionan constantemente en respuesta a los requisitos cambiantes de las partes interesadas, a la dinámica del ambiente comercial y al proceso de mejoramiento continuo. Para alcanzar sus objetivos ambientales, una organización debería enfocar y alinear su personal, sus sistemas, su estrategia, sus recursos y su estructura.

Para muchas organizaciones, la implementación de la gestión ambiental puede abordarse en etapas y se debería basar en el nivel de conocimiento de los requisitos, aspectos, expectativas y beneficios ambientales, y en la disponibilidad

de recursos.

**Recursos: Humanos, físicos y financieros**

Se debería definir y poner a disposición los recursos humanos, físicos (ej.: instalaciones, equipos) y financieros apropiados, esenciales para la implementación de las políticas ambientales de una organización y el logro de sus objetivos. Al asignar los recursos, las organizaciones pueden desarrollar procedimientos para mantenerse al corriente de los beneficios, así como también de los costos de sus actividades ambientales o relacionadas. Se puede incluir materias tales como el costo del control de la contaminación, de los desechos y de la disposición final de residuos sólidos.

Algunas materias que se deben considerar en recursos humanos, físicos y financieros:

1.- ¿De qué modo la organización identifica y asigna los recursos humanos, técnicos y financieros necesarios para cumplir sus objetivos y metas ambientales, incluyendo aquellos para los proyectos nuevos?
2.-¿De qué modo la organización se mantiene al tanto de los costos y beneficios de las actividades ambientales?

La base de los recursos y la estructura de la organización en las PyME pueden imponer ciertas limitaciones a la implementación. Para manejar estas limitaciones, las PyME deberían considerar estrategias de cooperación con:

- Organizaciones de clientes más grandes para compartir la tecnología y los conocimientos prácticos.
- Otras PyME en una cadena o en una base local de suministros para definir y tratar materias comunes, compartir el conocimiento práctico, facilitar el desarrollo técnico, usar instalaciones en forma conjunta, establecer una manera de estudiar el SGA, contratar consultores en forma colectiva.
- Organizaciones de normalización, asociaciones de PyME, Cámaras de Comercio, para programas de capacitación y conocimiento.
- Universidades y otros centros de investigación para respaldar la producción y la innovación.

**Alineación e integración del SGA**

Para gestionar con efectividad los aspectos ambientales, los elementos del SGA deberían diseñarse o revisarse de tal modo que se coordinen e incorporen efectivamente con los elementos del sistema de gestión existente (ej. producción, calidad, seguridad, finanzas).

Elementos del sistema de gestión que pueden beneficiarse con la integración incluyen:

- Políticas de la organización.
- Asignación de recursos.
- Controles operacionales y documentación.

- Sistemas de información y soporte.
- Capacitación y desarrollo.
- Organización y estructura contable.
- Sistemas de incentivos y evaluación.
- Sistemas de medición y monitoreo.
- comunicación e informes.

Algunas materias que se debe considerar en el alineamiento e integración de la organización:

1.- ¿De qué modo se ha integrado el SGA al proceso global de gestión comercial?
2.- ¿Cuál es el proceso para equilibrar y resolver conflictos entre el ambiente y otros objetivos y prioridades comerciales?

**Responsabilidades técnicas y personales**

La responsabilidad por la efectividad global del SGA debería ser asignada a una o varias personas del más alto rango o función(es), dotadas con suficiente autoridad, competencia y recursos. Los gerentes de operaciones deberían definir claramente las responsabilidades del personal pertinente, y responsabilizarse por la implementación efectiva del SGA y del desempeño ambiental. Los empleados de todos los niveles deberían, dentro del alcance de sus responsabilidades, responder por el desempeño ambiental como una forma de respaldar al SGA general.

Algunas materias que se debe considerar en las responsabilidad técnicas y personales, son las siguientes:

1.- ¿Cuáles son las responsabilidades del personal que gestiona, efectúa y verifica trabajo que afecta el ambiente, y están éstas definidas y documentadas?
2.- ¿Cuál es la relación entre la responsabilidad ambiental y el desempeño individual y es esto revisado periódicamente?
3.- ¿De qué modo el personal responsable:
    - obtiene capacitación, recursos y personal suficientes para la implementación?
    - inicia acciones para asegurar el cumplimiento de la política ambiental?
    - anticipa, identifica y registra cualquier problema ambiental?
    - inicia, recomienda, o proporciona soluciones a esos problemas?
    - verifica la implementación de esas soluciones?
    - controla nuevas actividades hasta que se corrija cualquier deficiencia o condición ambiental insatisfactoria?
    - obtiene capacitación apropiada para actuar en situaciones de emergencia?
    - aumenta su comprensión en cuanto a las consecuencia del no cumplimiento?
    - aumenta su comprensión acerca de la responsabilidad que tienen?
    - estimula las iniciativas y acciones voluntarias?

**Conciencia y motivación ambiental**

La alta gerencia tiene un papel clave en la construcción de la conciencia y motivación de los empleados, explicando los valores ambientales de la organización y comunicando su compromiso con la política ambiental. Es el compromiso de las personas individuales, en el contexto de los valores ambientales compartidos, lo que transforma un SGA de un documento de trabajo a un proceso efectivo.

Todos los miembros de la organización deberían comprender y ser estimulados, para que acepten la importancia de alcanzar los objetivos y metas ambientales por los cuales responden y son responsables. Ellos a su vez deberían estimular, cuando sea necesario, a los demás miembros de su organización para que respondan de una manera similar.

La motivación para un mejoramiento continuo puede promoverse reconociendo que los empleados han logrado los objetivos y metas ambientales, y estimulándolos para que hagan sugerencias conducentes a mejorar el desempeño ambiental.

Algunas materias que se deben considerar en relación con la conciencia y la motivación ambiental:

1.- ¿De qué modo la alta gerencia establece, refuerza y comunica el compromiso de la organización con la política ambiental?
2.- ¿Hasta qué punto los empleados entienden, aceptan y comparten los valores ambientales de la organización?
3.- ¿Hasta qué punto los valores ambientales compartidos sirven para motivar una acción de responsabilidad ante el ambiente?
4.- ¿De qué modo la organización reconoce los logros ambientales de los empleados?
5.- ¿Existen incentivos para premiar a quienes presentan efectivas iniciativas de mejoramiento ambiental?

**Conocimiento, habilidades y capacitación**

Se debería identificar el conocimiento y las habilidades necesarios para lograr los objetivos ambientales. Estos se deberían considerar al momento de seleccionar, contratar, capacitar, desarrollar habilidades y entregar educación permanente al personal.

Se debería proporcionar a todo el personal de la organización, una capacitación apropiada al logro de las políticas, objetivos y metas ambientales. Los empleados deberían tener una base de conocimientos apropiada, que incluya capacitación en los métodos y habilidades requeridos para ejecutar sus tareas en forma eficiente y competente, y conocimiento del impacto que sus actividades pueden tener sobre el ambiente, si las ejecutan en forma incorrecta.

La organización debería asegurar también que todos los contratistas que trabajan

en terreno, demuestren que poseen el conocimiento y las habilidades requeridas para ejecutar el trabajo en “forma ambientalmente responsable”.

Se necesita educar y capacitar para garantizar que el personal tenga un conocimiento apropiado y vigente de los requisitos reglamentarios, de las normas internas y de las políticas y objetivos ambientales de la organización. El nivel y el detalle de la capacitación pueden variar dependiendo de la actividad.

Los programas de capacitación tienen típicamente los elementos siguientes:

- Identificación de las necesidades de capacitación del empleado.
- Desarrollo de un plan de capacitación para tratar necesidades definidas.
- Verificación de la conformidad del programa de capacitación con requisitos reglamentarios o de la organización.
- Capacitación de grupos de empleados con funciones específicas.
- Documentación de la capacitación recibida.
- Evaluación de la capacitación recibida.

Algunas materias que se debe considerar en relación con conocimiento, habilidades y capacitación:

1.- ¿De qué modo la organización identifica las necesidades de capacitación ambiental?
2.- ¿De qué modo se analiza las necesidades de capacitación de funciones de trabajo específicas?
3.-¿Se desarrolla la capacitación y se revisa y modifica según se necesite?
4.-¿Cómo se documenta la capacitación y se está al corriente de ella?

**Comunicación e informes**

La comunicación incluye el establecimiento de procesos para informar internamente y, cuando se desee, externamente acerca de las actividades ambientales de la organización con el objeto de:

- Demostrar el compromiso de la gerencia con el ambiente.
- Responder a las preocupaciones sobre materias ambientales derivadas las actividades, productos o servicios de la organización.
- Promover el conocimiento de las políticas, objetivos, metas y programas ambientales de la organización.
- Informar a las partes internas y externas interesadas, sobre el sistema de gestión y el desempeño ambiental de la organización cuando sea apropiado.

Los resultados del monitoreo, auditoría y revisión de la gerencia del SGA deberían comunicarse a aquellas personas de la organización que son responsables del desempeño ambiental. La disposición relativa a informar apropiadamente a los empleados de la organización y a otras partes interesadas, sirve para motivar a los empleados y estimular la comprensión y aceptación pública de los esfuerzos de la organización, por mejorar su desempeño ambiental.

Algunas materias que se debe considerar en la comunicación e informes:

1.- ¿Cuál es el proceso para recibir y responder a las preocupaciones del empleado?
2.- ¿Cuál es el proceso para recibir y considerar las preocupaciones de otras partes interesadas?
3.- ¿Cuál es el proceso para comunicar la política y el desempeño ambiental de la organización?
4.- ¿Cómo se comunican los resultados de las auditorías y revisiones del SGA a todas las personas apropiadas de la organización?
5.- ¿Cuál es el proceso para poner a disposición del público la política ambiental?
6.- ¿Es adecuada la comunicación interna para respaldar el mejoramiento continuo en lo que respecta a las materias ambientales?

Algunas materias que se puede incluir en los informes:

- Perfil de la organización.
- Política, objetivos y metas ambientales.
- Procesos de gestión ambiental (incluyendo la participación de la parte interesada y el reconocimiento del empleado).
- Evaluación del desempeño ambiental (incluyendo descargas, conservación de recursos, cumplimiento, gestión del producto y riesgo).
- Oportunidades para el mejoramiento.
- Información suplementaria, tales como glosarios.
- Verificación independiente de los contenidos.

Es importante recordar para la comunicación y la información ambiental, tanto interna como externa, los siguientes aspectos:

- Debe estimularse la comunicación en dos direcciones.
- La información debería ser comprensible y estar explicada adecuadamente.
- La información debería ser verificable.
- La organización debería presentar una descripción exacta de su desempeño.
- La información se debería presentar en forma consistente (ej.: unidades similares de medición para permitir la comparación entre un período y otro).

Una organización puede comunicar información ambiental de diversas formas:

- Externamente, a través de un informe anual, emisiones reglamentarias, registros públicos, publicaciones de asociaciones industriales, prensa, y publicidad pagada.
- Organización de días abiertos, la publicación de números telefónicos a los cuales se puede dirigir reclamos y preguntas.
- Internamente, a través de avisos en las pizarras, periódicos internos, reuniones y mensajes a través del correo electrónico.

**Documentación del SGA**

Se debería definir y documentar apropiadamente los procesos y procedimientos operacionales, actualizándolos en caso necesario. La organización debería definir claramente los diversos tipos de documentos que establecen y especifican los procedimientos y controles operacionales efectivos.

La existencia de documentación del SGA sirve como respaldo para que el empleado conozca lo que requiere para alcanzar los objetivos ambientales de la organización, además de permitirle evaluar el sistema y el desempeño ambiental.
La naturaleza de la documentación puede variar dependiendo del tamaño y complejidad de la organización. Cuando los elementos del SGA se encuentran integrados al sistema de gestión general de una organización, la documentación ambiental debería integrarse a la documentación existente. Para facilidad de uso, la organización puede considerar la organización y mantención de un sumario de la documentación para:

- Cotejar la política, los objetivos y las metas ambientales.
- Describir los medios para alcanzar los objetivos y metas ambientales.
- Documentar las funciones clave, las responsabilidades y los procedimientos.
- Indicar la dirección hacia la documentación relacionada y, describir otros elementos del sistema de gestión de la organización, cuando sea apropiado.
- Demostrar que se ha implementado los elementos del SGA que son apropiados para la organización.

Este documento sumario puede servir como referencia para la implementación y mantención del SGA de la organización.

Algunas materias que se debe considerar en la documentación del SGA:

1.- ¿De qué modo se identifican, documentan, comunican y revisan los procedimientos de gestión ambiental?
2.- ¿Tiene la organización un proceso para desarrollar y mantener la documentación del SGA?
3.- ¿De qué modo se integra la documentación del SGA a la documentación existente en caso que sea apropiado?
4.- ¿De qué modo los empleados tienen acceso a la documentación del SGA necesaria para realizar sus actividades de trabajo?

Los documentos pueden encontrarse en cualquier medio y deberían ser útiles y de fácil comprensión. Toda la documentación debería estar fechada (con las fechas de revisión), ser fácilmente identificable, organizada y conservada por un período especificado.

La organización debería asegurar que:

- Los documentos se pueden identificar con la organización, división, función, actividad y/o persona de contacto apropiados;
- Los documentos se revisan periódicamente, se examinan cuando es necesario y son aprobados por personal autorizado previo a su emisión;
- Las versiones actualizadas de los documentos pertinentes están disponibles en todos los lugares donde se ejecutan operaciones esenciales para que el sistema funcione efectivamente;
- Los documentos obsoletos se eliminan con rapidez de todos los puntos de emisión y de uso.

**Control operacional**

La implementación se consigue mediante el establecimiento y mantención de procedimientos y controles operacionales para asegurar que la política, objetivos y metas ambientales de la organización puedan cumplirse.

La organización debería considerar las diferentes operaciones y actividades que contribuyen a sus impactos ambientales significativos, cuando esté desarrollando o modificando sus controles y procedimientos operacionales. Tales operaciones y actividades pueden incluir:

- Diseño e ingeniería; investigación y desarrollo.
- Adquisiciones y Contrataciones.
- Manipulación y almacenamiento de materias primas.
- Procesos de producción
- Mantención.
- Laboratorios.
- Almacenamiento de productos.
- Transporte.
- Comercialización, publicidad.
- Servicio al cliente.
- Adquisiciones, construcción o modificación de propiedades e instalaciones.

Las actividades se pueden dividir en tres categorías:

- Actividades para prevenir la contaminación y conservar recursos en nuevos proyectos de importancia, cambios en el proceso y gestión de recursos, propiedad (adquisiciones, cesión de activos y administración de la propiedad), y nuevos productos y envases;
- Actividades diarias de la gerencia para asegurar la conformidad con los requisitos organizacionales internos y externos, y para asegurar su eficiencia y efectividad;
- Actividades estratégicas de la gerencia para anticipar y responder a los requisitos ambientales cambiantes.

**Preparación y Respuesta a Emergencias**

Se debería establecer planes y procedimientos de emergencia para asegurar la existencia de una respuesta apropiada ante incidentes inesperados o accidentes.

La organización debería definir y mantener procedimientos para tratar incidentes ambientales y potenciales situaciones de emergencia. Los procedimientos y controles de operación deberían considerar, cuando sea apropiado:

- Emisiones accidentales hacia la atmósfera.
- Descargas accidentales al agua y tierra.
- Efectos específicos en el ambiente y en el ecosistema como resultado de descargas accidentales.

Los procedimientos deberían tener en cuenta los incidentes que surgen, o tienen probabilidades de surgir, como consecuencia de:

- Condiciones de operación anormales.
- Accidentes y situaciones potenciales de emergencia.

Algunas metodologías apropiadas para el análisis de riesgos en el contexto de un SGA, son presentadas en el Capítulo 11.

Los planes de emergencia pueden incluir:
- Organización y responsabilidades de emergencia.
- Una lista del personal clave.
- Detalles de los servicios de emergencia (ej.: departamento de incendios, servicios de limpieza para el caso de derrames).
- Planes de comunicaciones internas y externas.
- Acciones tomadas en el caso de diferentes tipos de emergencias.
- Información sobre materiales peligrosos, incluyendo el impacto potencial sobre el ambiente de cada material, y las medidas que se debe tomar en caso de una descarga accidental.
- Planes de capacitación y ensayo de su efectividad.

### 8.2.6) Medición y Evaluación

***Principio 4: Medición y Evaluación***

Una organización debería medir, monitorear y evaluar su desempeño ambiental. La medición, el monitoreo y la evaluación son actividades claves de un SGA, las cuales aseguran que la organización está actuando en conformidad con el programa de gestión ambiental establecido.

**Medición y monitoreo**

Debería haber un sistema en acción para medir y monitorear el desempeño real, comparándolo con los objetivos y metas ambientales de la organización en las áreas de sistemas de gestión y procesos operacionales. Esto incluye la evaluación del cumplimiento con la legislación y los reglamentos ambientales pertinentes. Los resultados se deberían utilizar para determinar las áreas de éxito e identificar las actividades que requieren acciones correctivas y mejoramiento.

Deberían existir procesos apropiados para asegurar la confiabilidad de los datos, tales como: calibración de instrumentos, equipos de ensayo y muestreo de software y hardware.

La identificación de los indicadores de desempeño ambiental apropiados para la organización, debería ser un proceso continuo. Tales indicadores deberían ser objetivos verificables y reproducibles. Ellos deberían ser pertinentes a las actividades de la organización, consistentes con su política ambiental, prácticos, y factibles técnica y económicamente.

Algunas materias que se debe considerar en medición y monitoreo:

1.- ¿De qué modo se monitorea regularmente el desempeño ambiental?
2.- ¿De qué modo se han establecido los indicadores de desempeño ambiental específicos relacionados con los objetivos y metas de la organización y cuáles son ellos?
3.- ¿Qué procesos de control se están aplicando para calibrar regularmente y muestrear los equipos y sistemas de medición y monitoreo
4.- ¿Cuál es el proceso para evaluar periódicamente el cumplimiento de los requisitos legales y otras materias que deben ser cumplidas?

**Acción correctiva y preventiva**

Se debería documentar los hallazgos, conclusiones, y recomendaciones obtenidos como resultado de la medición, monitoreo, auditorías y otros exámenes del SGA, e identificar las acciones correctivas y preventivas necesarias. La gerencia debería asegurar la implementación de estas acciones correctivas y preventivas, y la existencia de un procedimiento de seguimiento sistemático para garantizar su efectividad.

**Registros del SGA y gestión de la información**

Los registros constituyen una evidencia de la operación continua del SGA y deberían cubrir:

- Requisitos legales y reglamentarios.
- Permisos.
- Aspectos ambientales y sus impactos asociados.
- Actividades de capacitación ambiental.
- Actividades de inspección, calibración y mantención.
- Datos de monitoreo.
- Detalles de no conformidades: incidentes, reclamos y acción de seguimiento.
- Identificación del producto: composición y datos sobre la propiedad.
- Información sobre proveedores y contratistas.
- Auditorías ambientales y revisiones de la gerencia.

El resultado puede ser una gama compleja de información. El manejo efectivo de estos registros es esencial para la implementación exitosa del SGA.

Algunas materias que se debe considerar en los registros y en la gestión de la información del SGA:

1.- ¿Qué información ambiental necesita administrar efectivamente la organización?
2.- ¿Qué capacidad tiene la organización para identificar y estar al tanto de los indicadores clave de desempeño y otros datos necesarios para alcanzar sus objetivos?
3.- ¿De qué modo el sistema de gestión de registro/información de la organización pone la información a disposición de los empleados que la necesitan cuando ellos la requieren?
4.- ¿De que modo se evalúa la información ambiental, con fines de gestión y

mejoramiento?

**Auditorías del SGA**

Las auditorías del SGA se deberían efectuar periódicamente, para determinar si el sistema cumple con las disposiciones planeadas y, además, para verificar si se ha implementado y mantenido en forma apropiada.

Las auditorías del SGA pueden ser efectuadas por personal de la organización, y/o por partes externas seleccionadas por la organización. En todo caso, la(s) persona(s) que conduzca(n) la auditoría, deberá(n) estar en condiciones de hacerlo en forma objetiva e imparcial, y debería(n) tener una capacitación apropiada.

La frecuencia de las auditorías debería guiarse por la naturaleza de la operación en función de sus aspectos ambientales e impactos potenciales. También, se debería considerar los resultados de auditorías previas cuando se determine la frecuencia. El informe de auditoría del SGA se debería presentar en conformidad con el plan de auditoría. Estos tópicos se revisan en el Capítulo 9.

### 8.2.7) Revisión y Mejoramiento

***Principio 5: Revisión y mejoramiento***

Una organización debería revisar y modificar continuamente su SGA, con el objeto de mejorar su desempeño ambiental global.

**Revisión del SGA**

A intervalos apropiados, la gerencia de la organización debería revisar el SGA para asegurarse si continúa siendo adecuado y efectivo. La revisión del SGA debería tener un alcance bastante amplio para tratar las dimensiones ambientales de todas las actividades, productos o servicios de la organización, incluyendo su impacto en el desempeño financiero, y posible posición competitiva.

La revisión del SGA debería incluir:

- Una revisión de los objetivos y metas ambientales, y del desempeño ambiental.
- Hallazgos de las auditorías del SGA.
- Una evaluación de su efectividad.
- Una evaluación de la adecuación de la política ambiental y de la necesidad de cambios a la luz de:
    - Legislación cambiante.
    - Expectativas y requisitos cambiantes de las partes interesadas.
    - Cambios en los productos o actividades de la organización.
    - Avances en ciencia y tecnología.
    - Lecciones aprendidas de incidentes ambientales.
    - Preferencias del mercado.

- Informes y comunicación.

Algunas materias que se debe considerar en la revisión del SGA:

1.- ¿De qué modo se revisa periódicamente el SGA?
2.- ¿De qué modo se hace participar a los empleados apropiados en la revisión del SGA y en el seguimiento?
3.- ¿De qué modo se considera las opiniones de las partes interesadas en la revisión del SGA?

### 8.2.8) Mejoramiento Continuo

El concepto de mejoramiento continuo es un componente clave del SGA. Este se alcanza evaluando continuamente el desempeño ambiental del SGA, en comparación con sus políticas, objetivos y metas ambientales, con el propósito de identificar oportunidades para el mejoramiento.

El proceso de mejoramiento continuo debería:
- Identificar áreas de oportunidad para el mejoramiento del SGA conducentes a un mejor desempeño ambiental.
- Determinar la causa o las causas que originan las no conformidades o deficiencias.
- Desarrollar e implementar un plan de acciones correctivas y preventivas para tratar las causas que originaron el problema.
- Verificar la efectividad de las acciones correctivas y preventivas.
- Documentar cualquier cambio en los procedimientos, derivados del mejoramiento del proceso.
- Hacer comparaciones con los objetivos y metas.

Algunas materias que se deben considerar en las acciones correctivas y preventivas, y en el mejoramiento continuo:

1.- ¿Qué proceso tiene la organización para identificar la acción correctiva y preventiva, y el mejoramiento?
2.- ¿De qué modo la organización verifica que las acciones correctivas y preventivas, y las mejoras son efectivas y oportunas?

Es importante considerar los aspectos técnicos y económicos al momento de proponer acciones correctivas. En muchos casos, existen varias opciones para lograr un mejor desempeño y ellas deben ser evaluadas en base a criterios técnico-económicos y ambientales.

## 8.3) EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL

La evaluación de desempeño ambiental (EDA) es un proceso de gestión interna que utiliza indicadores de desempeño ambiental, cuyo fin es entregar información para determinar la evolución del desempeño ambiental de la Empresa. La EDA propuesta por la Norma ISO 14031 sigue un modelo de gestión "Planificación-Implementación-Revisión-Mejoramiento", tal como se describe a continuación.

### 8.3.1) Planificación

En primer lugar, es necesario seleccionar los indicadores que permiten llevar a cabo la evaluación de desempeño ambiental. Estos indicadores deben reflejar los aspectos ambientales significativos considerados como objetivos prioritarios de gestión, debido a su fuerte influencia en el desempeño ambiental de la empresa. Además, se debe definir y/o identificar los criterios de desempeño ambiental, considerando los requerimientos legales y acuerdos ambientales relevantes, la visión de las partes interesadas, normas y códigos reconocidos, datos sobre mejores prácticas sectoriales e información científica.

Los indicadores de desempeño ambiental permiten presentar los datos (cuantitativos o cualitativos) procesados en una forma más clara y útil. Cada empresa debe seleccionar un número suficiente de indicadores relevantes y comprensibles para evaluar su desempeño ambiental, que refleje la naturaleza y escala de las operaciones. La elección de indicadores para EDA determinará que tipo de datos serán requeridos, privilegiando aquellos que ya han sido obtenidos (por la empresa o por terceras partes) y que se encuentran disponibles.

### 8.3.2) Implementación

Los datos deben ser recolectados regularmente, para luego calcular y evaluar los indicadores seleccionados, de acuerdo a lo establecido en la planificación.

**Obtención de los datos:** El procedimiento de obtención de los datos debe ser diseñado de modo que se garantice su confiabilidad, sobre la base de un adecuado control de la calidad de los procedimientos y prácticas de adquisición de datos, así como de su validez estadística, entre otros aspectos. Los datos pueden ser obtenidos a partir de diferentes fuentes, por ejemplo:

- Monitoreos y mediciones directas
- Entrevistas y observaciones
- Registros de emisiones e informes preparados con fines regulatorios
- Registros de producción
- Registros de inventarios
- Registros financieros y contables
- Registros de compra de materiales y energía
- Registros de disposición de residuos sólidos

- Auditorías ambientales, informes de evaluación
- Registros de capacitación ambiental
- Estudios e informes científicos
- Agencias gubernamentales, organizaciones no-gubernamentales e instituciones académicas
- Proveedores y subcontratistas
- Clientes, consumidores y partes interesadas externas
- Asociaciones empresariales

**Análisis y procesamiento de los datos**: Los datos obtenidos deben ser analizados y transformados en información útil y clara, es decir, en indicadores que describan el desempeño ambiental de la empresa. El análisis tiene como objetivo garantizar la veracidad de la información que se obtenga, tomando en consideración la calidad, validez, suficiencia e integridad de los datos. El procesamiento de los datos debe ser llevado a cabo con extremo cuidado para asegurar la consistencia estadística de los indicadores obtenidos y su posibilidad de verificación y comparación. Para tales efectos, los procedimientos y las herramientas matemáticas para elaborar los indicadores deben estar claramente especificados.

**Evaluación del desempeño ambiental:** La información derivada del análisis de los datos, expresada en términos de Indicadores de Desempeño Ambiental, debe ser comparada con los criterios de desempeño ambiental establecidos por la Empresa. Esta comparación puede demostrar progresos o deficiencias en el desempeño ambiental, poniendo énfasis en identificar las razones por las cuales los criterios de desempeño no han sido alcanzados y las acciones que permitirían mejorar o mantener el nivel de desempeño ambiental (ej. nuevas oportunidades para mayor efectividad en la prevención de la contaminación).

.

**Informe y Comunicación:** Los resultados y conclusiones de la evaluación deben ser comunicados a las partes interesadas internas y/o externas, según corresponda, en forma clara y sistematizada. Esta información juega un papel importante en la revisión del sistema de gestión ambiental de la organización. La adecuada comunicación del desempeño ambiental permite obtener beneficios, tales como:

- Aumentar el conocimiento y diálogo acerca de las políticas ambientales de la empresa, criterios de desempeño ambiental y logros importantes.
- Demostrar el compromiso y los esfuerzos de la empresa en mejorar su desempeño
- Entregar un mecanismo de respuesta a las interrogantes y preocupaciones acerca de los aspectos ambientales de la empresa.
- Ayudar a los empleados, contratistas y otros, a cumplir sus responsabilidades ambientales, y a conocer los criterios de desempeño ambiental.
- Mejorar la posición de la empresa en el mercado y las relaciones con la comunidad local, u otras partes interesadas externas.

### 8.3.3) Revisión y Mejoramiento

Los resultados de la evaluación de desempeño ambiental deben ser revisados regularmente, con vistas a identificar oportunidades de mejoramiento y revisar la pertinencia de los criterios de desempeño utilizados. Tal revisión debe contribuir a las acciones para mejorar el desempeño de la gestión y de las operaciones de la empresa, y en posibles mejoras de la condición del ambiente.

El análisis debería evaluar la relación costo-beneficios de las medidas implementadas con anterioridad, la pertinencia de los indicadores seleccionados para EDA, y el origen y calidad de los datos y de los métodos de recolección. Por su parte, las acciones para mejorar el desempeño ambiental pueden considerar medidas asociadas a mejorar la calidad, confiabilidad y disponibilidad de los datos; mejorar las capacidades de análisis y de evaluación de información y desarrollar o identificar nuevos indicadores útiles para EDA.

### 8.3.4) Indicadores de Desempeño Ambiental.

La Norma 14031 propone una serie de indicadores para ser utilizados en la EDA. Estos indicadores se encuentran agrupados en tres categorías, en base a su relación con los ámbitos operacionales, de gestión ambiental y calidad ambiental:

***Indicadores de Desempeño Operacionales (IDO):*** son indicadores que entregan información acerca del desempeño ambiental de las operaciones de la empresa.
***Indicadores de Desempeño de Gestión (IDG):*** son indicadores que entregan información acerca de los esfuerzos realizados en materia de gestión ambiental, que influyen en el desempeño ambiental.
***Indicadores de Condición (o Calidad) Ambiental (ICA):*** proporcionan información acerca de la calidad del ambiente. Ésta información puede ayudar a una empresa a comprender mejor el impacto actual o potencial de sus aspectos ambientales.

A continuación se presentan algunos ejemplos de indicadores de desempeño ambiental sugeridos por la Norma ISO 14031. La mayoría de estos indicadores son mediciones directas de masa (ej. kg de residuos sólidos), volumen (ej. $m^3$ de agua), energía (ej. KJ, KWh), área (ej. $m^2$), tiempo, recursos financieros, número de ítems, cantidad de eventos específicos, o combinaciones de estas.

**Indicadores de Desempeño Operacionales (IDO)**

Los IDO deben entregar información sobre el desempeño ambiental de las operaciones de la Empresa, incluyendo:

- Entradas: recursos materiales (ej.: materias primas, insumos procesados, materiales reciclados, agua), energía y servicios de apoyo (ej. aseo, seguridad, comunicaciones, alimentación, transporte, mantención).
- Diseño, instalación, operación y mantención de la infraestructura y equipos de la Empresa (incluyendo situaciones de emergencia y operación anormal).

- Salidas resultantes de las operaciones de la empresa (ej. productos, servicios, generación de residuos gaseosos, líquidos, sólidos y energéticos).

**TABLA 8.5: INDICADORES DE DESEMPEÑO OPERACIONALES,**

| **Aspectos Asociados al Consumo de Materiales** |
|---|
| • Cantidad de materiales utilizados por unidad de producto<br>• Cantidad de materiales procesados, reciclados o reutilizados<br>• Cantidad de materias primas reutilizadas en el proceso de producción<br>• Cantidad de agua consumida por unidad de producto<br>• Cantidad de agua reutilizada<br>• Cantidad de materiales peligrosos usados en el proceso de producción |
| **Aspectos Energéticos** |
| • Cantidad de energía usada por año o por unidad de producto<br>• Cantidad de cada tipo de combustible/energía usada<br>• Cantidad de energía generada por corrientes de proceso<br>• Cantidad de energía ahorrada debido a programas de conservación |
| **Aspectos Asociados a Servicios de Apoyo** |
| • Cantidad de materiales peligrosos usados por contratistas<br>• Cantidad de agentes de limpieza usados por contratistas<br>• Cantidad de materiales reciclables y reutilizados usados por contratistas<br>• Cantidad de cada tipo de residuo generados por contratistas |
| **Aspectos Asociados a Instalaciones y Equipamiento** |
| • Nº de piezas de equipos con partes de fácil desmontaje, reciclables<br>• Nº de horas de operación de una pieza especifica de un equipo crítico<br>• Nº de eventos (ej: explosiones) u operaciones anormales<br>• Área total de terreno para fines de producción<br>• Área de terreno para fines de conservación o restauración<br>• Nº de horas por año de mantención preventiva de los equipos |
| **Aspectos Asociados a Transporte por Suministro y Entrega de Productos** |
| • Consumo promedio de combustible de los camiones de transporte<br>• Nº de cargas de reparto por tipo de transporte por día<br>• Nº de camiones de transporte con bajas emisiones de contaminantes<br>• Nº de viajes de negocios realizados por otras vías de transporte<br>• Nº de viajes de negocios realizados por vía de transporte |
| **Aspectos Asociados a Productos** |
| • Nº de productos que pueden ser reusados o reciclados<br>• % de un producto que puede ser reusado o reutilizado<br>• Tasa de productos defectuosos<br>• Cantidad de energía consumida durante el consumo de un producto<br>• Nº de productos fuera de especificación |

Continuación Tabla 8.5.

| Aspectos Asociados a los Residuos |
|---|
| • Cantidad de residuos sólidos por año o por unidad de producto<br>• Cantidad de residuos peligrosos, reciclables o reusables por año<br>• Residuos sólidos totales para disposición<br>• Cantidad de residuos sólidos almacenados al interior de la planta<br>• Cantidad de material enviado a relleno por unidad de producto<br>• Cantidad de residuos sólidos convertidos a material reutilizable por año<br>• Residuos peligrosos eliminados debido a sustitución de insumos.<br>• Cantidad de emisiones gaseosas especificas por año o por unidad<br>• Cantidad de emisiones gaseosas que afecten la capa de $O_3$ o clima global<br>• Cantidad de material especifico en los líquidos descargados a cuerpos de agua o alcantarillado por año o por unidad de producto<br>• Cantidad de energía calórica descargada a cuerpos de agua<br>• Cantidad de efluentes vertidos por unidad de servicio o cliente<br>• Ruidos medidos en cierta posición<br>• Cantidad de radiación emitida<br>• Cantidad de calor, vibración o luz emitida<br>• Cantidad de residuos peligrosos generados durante emergencias |

**Indicadores de Desempeño de la Gestión (IDA)**

Los IDA evalúan los esfuerzos en gestión, decisiones y acciones para mejorar el desempeño ambiental. Los IDA deben ser seleccionados de modo que proporcionen información en materias relevantes, tales como: capacitación, distribución y utilización eficiente de los recursos, gestión del costo ambiental, documentación, acciones correctivas, y otras, que pueden afectar directa o indirectamente el desempeño ambiental de la empresa. Los IDA pueden ser usados para apoyar y/o verificar:

- La implementación y efectividad de los programas de mejoramiento ambiental, incluidas las medidas de producción limpia
- Las acciones de gestión que influyen en el desempeño ambiental de la Empresa
- La capacidad de gestión ambiental de la Empresa, incluyendo la flexibilidad para adaptarse a los cambios, cumplir objetivos específicos o resolver problemas.
- La conformidad con los requerimientos legales y otros compromisos ambientales suscritos por la Empresa.

**TABLA 8.6: INDICADORES DE DESEMPEÑO DE LA GESTIÓN**

| **Asociados al Desempeño Financiero** |
|---|
| • Costos asociados con aspectos ambientales del proceso o del producto (ej. costos de disposición de residuos sólidos);<br>• TIR/VAN para proyectos de mejoramiento ambiental<br>• Ahorros por reducción en el uso de recursos (ej. agua, energía), prevención de la contaminación o reciclaje de residuos;<br>• Ingresos por ventas atribuibles a un nuevo subproducto, derivado del cumplimiento de un objetivo de mejoramiento ambiental;<br>• Recursos financieros utilizados en investigación y desarrollo, aplicada a proyectos con importancia ambiental;<br>• Obligaciones ambientales que tienen un impacto material en el estado del financiero de la empresa.<br>• Multas debido a transgresiones de la normativa ambiental |
| **Asociados a las Relaciones con la Comunidad** |
| • Nº de preguntas o comentarios ambientales efectuadas por la comunidad<br>• Nº de informes de prensa sobre el desempeño ambiental de la empresa<br>• Nº de programas ambientales educativos para la comunidad<br>• Recursos de apoyo a programas ambientales de la comunidad<br>• Nº de sitios con informes ambientales<br>• Progresos en las actividades locales<br>• Nº de iniciativas de reciclaje o limpieza local, patrocinadas por la empresa<br>• Opiniones a favor o en contra del desempeño ambiental de la empresa, obtenidas en encuestas públicas |
| **Asociados a la Estructura del Sistema de Gestión** |
| • Grado de cumplimiento con la normativa ambiental;<br>• Grado de conformidad con el servicio de los proveedores, con requisitos y expectativas especificadas por la Empresa;<br>• Tiempo de respuesta ante los incidentes ambientales;<br>• Nº de acciones correctivas que han sido resueltas o que están sin resolver;<br>• Costos atribuibles a multas y penalidades;<br>• Nº y frecuencia de auditorías ambientales;<br>• Nº de auditorías realizadas, comparada con aquellas programadas;<br>• Nº de no-conformidades o hallazgos resultantes de las auditorías;<br>• Frecuencia de revisión de los procedimientos de operación;<br>• Nº de entrenamientos para enfrentar situaciones de emergencia;<br>• Estado de preparación ante emergencias y los resultados de la evaluación de la respuesta durante los entrenamientos planeados. |

Continuación Tabla 8.6.

| **Asociados a la Implementación de Políticas y Programas** |
|---|
| • Nº de objetivos y metas ambientales cumplidas, en la Empresa<br>• Grado de implementación de las prácticas de gestión y operación, asociadas a mejoramiento ambiental;<br>• Nº de iniciativas implementadas para la prevención de la contaminación;<br>• Nº de empleados que tienen requerimientos ambientales en sus actividades de trabajo;<br>• Nº de empleados que participan en programas ambientales (ej. sugerencias propuestas, reciclaje, iniciativas limpias u otros);<br>• Nº de empleados que hayan obtenido premios y reconocimientos durante un programa ambiental;<br>• Nº de empleados capacitados en materias ambientales (o % respecto al total que requiere capacitación);<br>• Nº de contratistas capacitados en materias ambientales;<br>• Nivel de conocimiento obtenido por los participantes en cada capacitación;<br>• Nº de mejoras ambientales sugeridas por los empleados;<br>• Resultados de las auditorías a los empleados acerca de sus conocimientos sobre los aspectos o problemas ambientales de la Empresa;<br>• Nº de proveedores y contratistas que no conocen los aspectos o problemas ambientales;<br>• Nº de servicios contratados con un sistema de gestión ambiental implementado y certificado;<br>• Nº de productos diseñados para ser desmontables, reciclados o reutilizados;<br>• Nº de productos con instrucciones respecto a su uso y disposición ambientalmente seguros. |

**Indicadores de Condición (o Calidad) Ambiental (ICA)**

Los ICA entregan información acerca de la calidad del ambiente local, regional, nacional o global. La calidad ambiental puede evolucionar a través del tiempo o bajo situaciones específicas. Mientras los ICA no son mediciones del impacto sobre el ambiente directamente atribuibles a la empresa, algunos cambios pueden entregar información útil sobre las relaciones entre las condiciones del ambiente y las actividades, productos o servicios. Las organizaciones de gran envergadura de intervención ambiental están obligadas a considerar los ICA en sus evaluaciones de desempeño ambiental. Los ICA permiten apoyar los esfuerzos de la empresa en materias tales como:

- Identificar y gestionar sus aspectos ambientales significativos
- Evaluar la pertinencia de los criterios de desempeño ambiental
- Seleccionar los indicadores de desempeño operacionales y de gestión
- Establecer una línea base con respecto a la cual medir los cambios
- Determinar los cambios ambientales a través del tiempo, en relación a un programa ambiental de largo plazo
- Identificar medidas de mitigación

Una vez que se ha identificado los efectos sobre la calidad del ambiente, es posible seleccionar indicadores de desempeño ambiental que tengan relación directa con las características del ambiente que se desean cautelar.

**TABLA 8.7: EJEMPLO DE INDICADORES DE CONDICIÓN AMBIENTAL (ICA)**

**Indicadores de condición ambiental global**

- Espesor de la capa de ozono
- Temperatura global
- Tamaño de la población de peces en el océano

**Indicadores de condición ambiental regional o local: Aire**

- Concentración ambiental de un contaminante especifico en un lugar fijo
- Temperatura ambiental en lugares a una distancia especifica
- Frecuencia de eventos de smog fotoquímico en un área local definida
- Mediciones odoríferas a una distancia especifica

**Indicadores de condición ambiental regional o local: Agua**

- Concentración de un contaminante especifico en un cuerpo de agua
- Oxígeno disuelto en el cuerpo de agua
- Temperatura del agua en un cuerpo de agua adyacente a la Empresa
- Cambio en el nivel del agua
- Concentración de coliformes fecales en el cuerpo de agua

**Indicadores de condición ambiental regional o local: Suelo**

- Concentración de un contaminante especifico en el suelo en el área cercana
- Concentración de nutrientes seleccionados en suelos adyacentes
- Áreas rehabilitadas en una zona local definida
- Áreas dedicadas a rellenos, turismo o humedales en una zona definida
- Áreas pavimentadas e infértiles en un área local definida
- Áreas protegidas en un área local definida
- Medición de la erosión de la capa vegetal de un área local definida

**Indicadores de condición ambiental regional o local: Flora y Fauna**

- Concentración de un contaminante dado en el tejido de especies de plantas o animales específicos encontradas en el área local o regional
- Cosechas producidas en cultivos cercanos a la planta
- Poblaciones de especies de plantas o animales específicos,
- Nº de especies de la flora o fauna total en un área local definida;
- Nº y variedad de especies cosechadas en un área local definida;
- Calidad del hábitat para especies especificas en el área local;
- Medidas específicas de la cantidad de vegetación en un área definida;

**Indicadores de condición ambiental regional o local: Seres Humanos**

- Datos de esperanza de vida para sectores específicos de la población
- Incidencia de enfermedades específicas, a partir datos epidemiológicos
- Tasa de crecimiento de la población local o regional
- Niveles de plomo en la sangre de la población local o regional
- Densidad de población en el área
- Monumentos o lugares de importancia cultural/histórica/religioso

La información contenida en los Indicadores de Desempeño Ambiental puede ser expresada de diferentes maneras, tales como:

- **Valores Absolutos:** datos o información básica obtenida directamente de los instrumentos de medición o de otros registros; por ejemplo, toneladas de contaminante emitido, toneladas de materias primas consumidas, energía calórica (KJ) o energía eléctrica (KWh) consumida.
- **Valores Relativos:** datos o información comparada a otro parámetro (ej: nivel de producción, tiempo, ubicación o condición de fondo); por ejemplo, toneladas de un contaminante emitido por tonelada de producto fabricado, o por unidad de retorno por ventas, o por día, o por habitante.
- **Valores Indexados:** datos e información convertidos a unidades o a una forma tal que relacione la información a un estándar o línea base; por ejemplo, las emisiones de contaminante en el transcurso del año expresadas como un porcentaje de aquellas emisiones en un año base.
- **Valores Agregados:** datos o información del mismo tipo, provenientes de diferentes fuentes y que se expresan como un valor combinado; por ejemplo, toneladas totales de un contaminante dado emitidas durante la producción de un producto en un año dado, obtenidas mediante la suma de las emisiones de múltiples fuentes (equipos u operaciones unitarias) del proceso involucradas en la fabricación del producto.
- **Valores Ponderados:** datos e información modificada por aplicación de factores de ponderación relacionados a su nivel de importancia; por ejemplo, un índice de desempeño global que sea la suma ponderada de índices correspondientes a diferentes emisiones gaseosas (ej. emisiones como porcentaje de las emisiones correspondientes a un año base).

La mayoría de los indicadores de desempeño presentados en las tablas anteriores están expresados en la forma de valores absolutos (ej. medidas directas, eventos o números). En muchos casos será conveniente expresar algunos indicadores términos relativos, para facilitar su análisis (ej. como fracciones o porcentajes, números por unidad de tiempo, por empleado, por unidad de ventas, por unidad de producción o como fracción de un valor base).

Se debe tener presente que algunos aspectos ambientales son complejos y es necesario seleccionar una combinación de indicadores para obtener una evaluación adecuada. Por otra parte, en ciertos casos es útil seleccionar varios indicadores para la EDA derivados de un conjunto común de datos, según sean las partes interesadas a las que esté destinado cada indicador. Por ejemplo, una empresa que vierte residuos líquidos tratados a un lago puede seleccionar los siguiente indicadores, a partir de las mediciones de descargas de un contaminante específico:
Cantidad total de contaminante especifico descargado por año (de interés para la comunidad local y la comunidad científica)

- Concentración del contaminante en el efluente líquido (de interés para autoridades fiscalizadoras)
- Cantidad de contaminante descargado por unidad de producto (de interés para la gerencia y para los consumidores)

- Cambios en la cantidad de contaminante descargado por año relativo a la inversión en tecnología limpia o mejoras en el proceso (de interés para la gerencia y los inversionistas).

Aún cuando se trata de obtener valores con alto nivel de exactitud, en muchas no se debe olvidar un antiguo adagio: *"aproximado y útil es mejor que exacto e impracticable"* . Por otra parte, varios indicadores independientes que describen en forma aproximada un fenómeno pueden entregar un cuadro más completo que uno solo de mayor exactitud.

## 8.4) GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

La gestión ambiental forma parte de un ejercicio integral donde juegan un papel determinante las consideraciones de seguridad y calidad. En relación con los sistemas de gestión de seguridad, en las dos últimas décadas han surgido diferentes normas definiendo los contenidos de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional[2] . Por ejemplo, el Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) propone doce elementos básicos que debe poseer un sistema de gestión de seguridad:

1 Responsabilidad, política y objetivos.
2 Conocimiento y documentación del proceso.
3 Revisión de proyectos y procedimientos de diseño.
4 Gestión de los riesgos del proceso.
5 Gestión del cambio (modificaciones en las instalaciones, en los procedimientos de operación).
6 Adecuación del proceso y de los equipos.
7 Investigación de incidentes.
8 Formación y evaluación del desempeño del personal.
9 Factores humanos.
10 Normas, códigos y leyes
11 Auditorías y acciones correctivas.
12 Mejoramiento continuo del conocimiento sobre la seguridad de los procesos.

Por su parte, las Normas BS 8800 y OHSAS 18001 establecen los requerimientos para establecer un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional, dentro de un marco estructural análogo al SGA (BS 7750, ISO 14000) y al sistema de gestión de calidad (ISO 9000). Ello no es casualidad, ya que se reconoce la interdependencia de tales elementos, coincidiendo con el modelo de calidad total.

[2] En Chile, existen disposiciones legales para la prevención de riesgos profesionales, centradas en la Ley Nº 16744 y sus decretos, además de otras regulaciones. A ello se debe agregar la legislación que reglamenta las condiciones ambientales en el medio laboral (Decreto 594 de 2000).

En términos generales, las Normas BS 8800 y OHSAS 18001 consideran los siguientes elementos:

- **Revisión inicial**: implica evaluar la situación de seguridad y salud ocupacional de la empresa. La auditoría de seguridad debe establecer los requerimientos legales, las características del sistema de gestión de seguridad existente, los recursos destinados a dicha gestión, y las prácticas de seguridad consideradas como estado del arte para ese sector industrial. Además, debe entregar información preliminar acerca de los principales peligros y sus respectivos niveles de riesgo.
- **Política de seguridad y salud ocupacional**: Dicha política debe reconocer la importancia del tema, y el compromiso de cumplimiento con las normativas vigentes. Además, debe existir un compromiso explícito de proveer los recursos necesarios, involucrar a todos los empleados (entrenamiento, participación), e implementar las revisiones periódicas y el mejoramiento continuo.
- **Planificación**: Requiere de una clara identificación de objetivos y metas de seguridad y salud ocupacional, criterios de desempeño, estructura orgánica, responsabilidades, recursos asignados, y un programa de acciones tendientes a cumplir con los objetivos planteados. Para ello, se debe llevar a cabo un exhaustivo análisis de riesgos, incluyendo la identificación de peligros y alternativas para control de riesgos.
- **Implementación y operación**: Incluye llevar a cabo un exhaustivo entrenamiento de todo el personal, estableciendo los mecanismos de comunicación, sistemas de control de documentos, controles operacionales, y planes de respuesta a emergencias.
- **Monitoreo y acciones correctivas**: Se debe monitorear el desempeño en materias de seguridad y salud ocupacional, para determinar si los objetivos planteados se están cumpliendo, tomando las medidas correctivas adecuadas. Aparte del monitoreo rutinario, es necesario llevar a cabo auditorías periódicas para evaluar el desempeño, el cumplimiento con los requerimientos legales, e identificar fortalezas y debilidades del sistema de gestión.
- **Revisión de la gestión y mejoramiento continuo**: La revisión periódica del sistema de gestión sirve para evaluar de manera global la efectividad del sistema y de cada uno de sus componentes, tomando en consideración los resultados de las auditorías, e identificando los principales factores internos y externos que pueden tener efectos sobre el desempeño de seguridad de la empresa (ej.: cambios en la estructura orgánica de la empresa, nueva legislación, introducción de nuevas tecnologías, cambios en el proceso, en los procedimientos, en el software de control, etc.).

La mayor parte de los accidentes ocurren debido a acciones que se han llevado a cabo en forma incorrecta o descuidada. De ahí la importancia de mantener procedimientos de operación preparados sistemáticamente, claramente escritos y que recojan la experiencia acumulada respecto de dicha actividad. La Agencia de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos recomienda los siguientes contenidos para la descripción de un procedimiento, en el contexto de la gestión

de seguridad:

- Descripción y esquemas del proceso y de los equipos. Lazos de control.
- Procedimientos de puesta en marcha, parada y espera.
- Procedimientos de operación normal.
- Límites de operación normales.
- Registro de datos.
- Descripción de peligros y sus riesgos asociados.
- Procedimientos de operación fuera de condiciones normales.
- Descripción de las alarmas y sistemas de alivio de presión.
- Procedimientos de emergencia.
- Procedimientos para trabajos peligrosos.
- Equipos de seguridad personal.
- Procedimientos de comunicación.
- Programa de mantenimiento.

En este contexto, el análisis de riesgos es un componente clave en la implementación y operación de un sistema de gestión de seguridad. Los elementos asociados al análisis de riesgos se revisan en detalle en el Capítulo 11.

Por su parte, las auditorías de seguridad deben estar orientadas a revisar y evaluar el cumplimiento de las normas y procedimientos establecidos para cada actividad auditada (ver Capitulo 9). Algunos aspectos que se debe considerar son:

- Información de seguridad del proceso.
- Estudios de seguridad del proceso.
- Procedimientos de operación.
- Prácticas seguras de trabajo.
- Control de modificaciones de proceso y de planta.
- Mantención.
- Entrenamiento.
- Investigación e información de incidentes y accidentes.
- Planes de emergencia.
- Revisiones previas a una puesta en marcha.
- Procedimientos para puesta en marcha.
- Procedimientos para detención.
- Sistemas de permisos de trabajo.
- Procedimientos de muestreo.
- Procedimientos para carga y descarga de materiales peligrosos, etc.
- Inspecciones de seguridad (sistemas de alivio de emergencia, instrumentación crítica, alarmas y sistemas automáticos para detención de emergencia, sistemas de bloqueo y drenaje, alarmas y sistemas contra incendio, detectores de gases).

**BIBLIOGRAFÍA**

Cascio J., Woodside G., Mitchell P. “Guía ISO 14000”. McGraw Hill (1997)

Chemical Manufacturers Association. “Guiding Principles: Responsible Care: A Public Commitment”. Washington DC (1991)

Chemical Industries Association. “Responsible Care Management Systems”. Chemical Industries Association Publ. Londres (1992)

International Chamber of Commerce. "The Business Charter for Sustainable Development: Principles for Environmental Management"", ICC Publishing S.A., Paris (1990)

# CAPÍTULO 9

# PRINCIPIOS DE AUDITORÍA AMBIENTAL

## 9.1) INTRODUCCIÓN

La auditoría ambiental constituye una de las herramientas con que se cuenta para identificar las áreas ambientalmente críticas de un proceso, al mismo tiempo que permite formular aquellas soluciones tecnológicas y de gestión que sean apropiadas. La literatura especializada ha acuñado el término, bajo la siguiente definición:

**Auditoría Ambiental[1] :** Es una herramienta de gestión que consiste en una evaluación sistemática, documentada, periódica y objetiva de la efectividad de la organización, la gerencia y los equipos ambientales, para proteger el medio ambiente mediante un mejor control de las prácticas ambientales, y la evaluación del cumplimiento de las políticas ambientales de la empresa, incluyendo los requerimientos legales.

La auditoría ambiental es un examen metódico que implica análisis, tests y comprobaciones de las prácticas y procedimientos ambientales de una empresa o parte de ella. En sí mismo, el término "auditoría" es sinónimo de revisión y verificación de diversos aspectos de una empresa. En su expresión más moderna, la auditoría ambiental es el componente clave de un sistema de gestión ambiental (SGA). La auditoría ambiental permite obtener información acerca de la efectividad del sistema de gestión, identificar problemas asociados a su funcionamiento, identificar nuevos desafíos ambientales y proponer medidas de prevención y mitigación apropiadas.

## 9.2) TIPOS DE AUDITORÍAS AMBIENTALES

Existen diferentes tipos de auditoría ambiental, dependiendo de las condiciones que enmarcan dicho ejercicio, los objetivos específicos que la motivan y el nivel de desarrollo de la empresa. Aún cuando todas ellas comparten el objetivo común de entregar información documentada y validada sobre diferentes aspectos de la situación ambiental de una empresa, se puede identificar objetivos y contenidos particulares que marcan un sello especial a cada auditoría. Las auditorías ambientales utilizadas con mayor frecuencia se resumen en la Tabla 9.1.

Tal como se ilustra en la Figura 9.1, la evolución en el tiempo de un programa de auditoría ambiental muestra crecientes niveles de sofisticación, tanto en los procedimientos metodológicos como en los niveles de información que se

[1] Declaración sobre Auditoría Ambiental, International Chamber of Commerce, 1989. Coincide con la definición de BS7750 e ISO14000

manejan. Inicialmente, una auditoría focaliza su actividad hacia la identificación de los principales problemas, con vistas a mejorar el desempeño ambiental de la empresa. A medida que se logra resolver los problemas ambientales más relevantes, la auditoría se orienta a verificar el cumplimiento de los estándares ambientales relevantes.

**TABLA 9.1: TIPOS DE AUDITORÍAS AMBIENTALES**

| AUDITORÍA |
|---|
| • **Auditoría Ambiental Externa:** La realiza un equipo de auditores orgánicamente desvinculados de la empresa, totalmente independientes de ésta. Este tipo de auditoría permite una mayor objetividad de los resultados. |
| • **Auditoría Ambiental Interna**: En este caso, el equipo auditor forma parte de la empresa auditada. Permite establecer un sistema de control ambiental interno a menor costo, pero sacrificando objetividad. |
| • **Auditoría Preliminar o de Diagnóstico:** Identificación preliminar de los principales aspectos e impactos ambientales y las correspondientes medidas de mejoramiento y mitigación pertinentes. Es el primer paso para establecer un plan de mejoramiento ambiental y un sistema de gestión ambiental. |
| • **Auditoría de Verificación:** Verifica si la empresa cumple con la legislación ambiental vigente y con los acuerdos formales que limitan la envergadura de las descargas al ambiente. Es el tipo más frecuente de auditoría ambiental. |
| • **Auditoría de un Sistema de Gestión Ambiental:** Evaluación del SGA de una empresa. Incluye la verificación del cumplimiento de los procedimientos de gestión ambiental, su relevancia y efectividad. |
| • **Auditoría de Riesgos Ambientales:** Identifica los riesgos potenciales en los procesos y procedimientos de la empresa. Los accidentes constituyen una importante causa de impactos ambientales, pérdidas económicas, daños a las instalaciones y a las personas. |
| • **Auditorías de Residuos:** Identifica y cuantifica las diferentes líneas residuales, evalúa las prácticas y procedimientos para su manejo y control, y estima los costos asociados a éstos. Busca opciones para reducir la generación de residuos en su fuente misma y mejorar la gestión de éstos. |
| • **Auditoría de Procesos:** Verifica los niveles de eficiencia con que operan los procesos de interés. Implica cuantificar los flujos de materia y energía, así como la eficiencia operacional. Cubre aspectos comunes a una auditoría ambiental clásica. |
| • **Auditoría Energética:** Evalúa la eficiencia de utilización de los recursos energéticos de la empresa, al compararla con la eficiencia teórica. Además, permite identificar potenciales mejoras en dichos sistemas. Esto implica controlar los procedimientos empleados para identificar y cuantificar el uso de los recursos energéticos. |

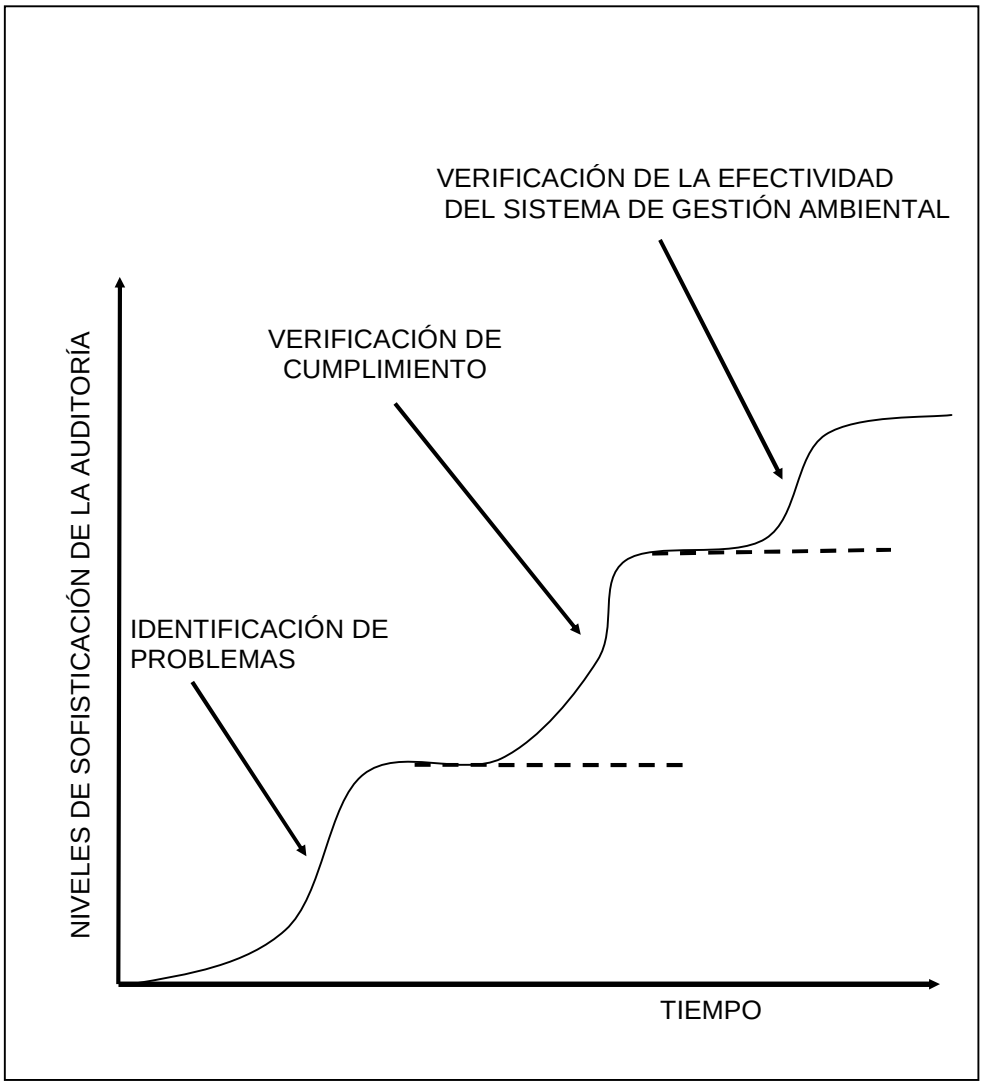



**FIGURA 9.1: EVOLUCIÓN DE UN PROGRAMA DE AUDITORÍA AMBIENTAL**

En un nivel de desarrollo superior, cuando la empresa ha establecido y formalizado un sistema de gestión ambiental, la auditoría tiene como objetivo la verificación de que dicho sistema se encuentra funcionando de acuerdo a los objetivos y planes estipulados. En estos dos últimos casos, el principal objetivo de la auditoría es verificar que los problemas identificados hayan sido solucionados y que se tenga una respuesta adecuada a los nuevos desafíos que aparecen.

Las auditorías de diagnóstico preliminar y de residuos son las de mayor relevancia para la realidad actual de la pequeña y mediana empresa nacional. La auditoría de diagnóstico permite identificar las principales fuentes de pérdidas y visualizar posibles alternativas de solución. En aquellas empresas con mayor trayectoria de control ambiental, la auditoría se orienta a la identificación de alternativas para la minimización de residuos, reducción de riesgos e identificación de opciones de mejoramiento continuo.

## 9.3) CONTENIDOS DE UNA AUDITORÍA AMBIENTAL

En términos generales, las áreas temáticas abordadas por la auditoría dependerán de las condiciones específicas de cada ejercicio, y podrán incluir todos o algunos de los siguientes tópicos:

### ASPECTOS TÉCNICOS

| |
|---|
| **Objetivo**: Reunir, analizar y evaluar información sobre la naturaleza del proceso y los problemas ambientales asociados a los desechos materiales y energéticos. Permite evaluar si la tecnología, los procesos, desechos y productos finales son apropiados o no. Este es un componente clásico de la auditoría ambiental. |
| • Caracterizar el Proceso Auditado: Identificar las operaciones/procesos unitarios. Diagrama del proceso.<br>• Identificar y cuantificar las materias primas, insumos, combustibles y servicios.<br>• Identificar, caracterizar y cuantificar los residuos sólidos, gaseosos y líquidos.<br>• Caracterizar el sistema de gestión, tratamiento y disposición final de los desechos de producción.<br>• Caracterizar el almacenamiento y gestión de materiales peligrosos.<br>• Elaborar un balance de materia y energía: Determinación de entradas, salidas, consumos, pérdidas y eficiencia de utilización (materias primas, insumos, agua, energía).<br>• Determinar los niveles de ruido.<br>• Identificar las condiciones de operación peligrosas y ambientalmente relevantes (alta temperatura, presión, pH extremo, compuestos peligrosos).<br>• Identificar las áreas del proceso con mayor impacto potencial.<br>• Comparar con otras alternativas tecnológicas (estado del arte). |

## ASPECTOS DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

**Objetivo**: Identificar, analizar y evaluar las áreas de riesgo potencial.

- Análisis de Riesgos (incluye varios aspectos técnicos señalados en el listado anterior).
- Políticas y programas en materia de seguridad y salud ocupacional.
- Planes de Emergencias
- Prevención de accidentes.
- Planes de seguridad, higiene y salud.
- Programas de entrenamiento.
- Estadísticas de accidentes.
- Registros de incidentes ambientales.

Condiciones del ambiente de trabajo (ruido, composición del aire, temperatura).

## ASPECTOS ECONÓMICO-FINANCIEROS

**Objetivo**: Estructurar un programa de inversiones para el mejoramiento ambiental.

- Costos directos e indirectos debido al incumplimiento de estándares ambientales: multas, cierre de planta, pérdida de clientes, incremento de pólizas de seguros.
- Costos asociados a accidentes: seguros, indemnizaciones, daños a personal y equipos, disminución de producción.
- Costos asociados al tratamiento y disposición de desechos de producción.
- Requerimientos de inversión para mejoramiento ambiental: reemplazo de unidades ineficientes, nuevos sistemas de control de procesos, modificaciones al proceso, nuevas líneas, etc.
- Costos de operación asociados al mejoramiento ambiental: incremento en costo de materiales y energéticos (ej.: de mejor calidad y, por lo tanto, de mayor costo unitario)
- Identificar y valorar potenciales beneficios por ahorros energéticos y de materiales, por incremento de eficiencia, por prevención de desechos; por reducción de accidentes, de incidentes ambientales, de costos de tratamiento y de disposición de desechos; por nuevos subproductos.
- Análisis de costo-beneficio para alternativas de mejoramiento ambiental.

**ASPECTOS LEGALES**

| |
|---|
| **Objetivo**: Verificar la situación de la empresa respecto a la legislación ambiental vigente. |
| • Identificar las normas y estándares ambientales relevantes, locales, nacionales, regionales e internacionales.<br>• Comparar los parámetros medidos con los estándares establecidos en las normas que regulan el medio atmosférico, acuático, terrestre, biótico, perceptual, sociocultural y económico.<br>• Identificar futuros desafíos en el plano legal. |

**ASPECTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

| |
|---|
| **Objetivo**: Evaluar la efectividad del sistema de gestión ambiental de la empresa. |
| • Organigrama de la empresa, jerarquías, funciones y responsabilidades ambientales.<br>• Recursos financieros asignados a la gestión ambiental.<br>• Mecanismos de comunicación: Dentro de la empresa, hacia la comunidad e instituciones ambientales.<br>• Imagen externa: comunidad, clientes, proveedores, instituciones.<br>• Mantención, control y accesibilidad de la documentación de relevancia ambiental.<br>• Programas de entrenamiento en materia de gestión ambiental.<br>• Niveles de sensibilidad/conciencia ambiental. Actitud de cuadros directivos.<br>• Verificar el cumplimiento de los objetivos y planes de gestión ambiental. |

## 9.4) METODOLOGÍA DE AUDITORÍA AMBIENTAL

La metodología para realizar una auditoría ambiental depende de las circunstancias específicas para cada ejercicio. Sin embargo, existe un cierto procedimiento más o menos común para todas ellas, cuyas diferentes etapas se pueden agrupar de acuerdo al instante en que ellas se llevan a cabo: actividades previas y actividades en terreno. Todas los tipos de auditoría presentan estas etapas, incluyendo actividades de recolección de información, análisis, elaboración de juicios acerca del desempeño ambiental de la empresa y presentación de informes y planes de acción. A continuación se resume las diferentes etapas de una auditoría.

### 9.4.1) Actividades Previas: Planificación de la Auditoría

La planificación de la auditoría se realiza antes de que se lleve a cabo la auditoría en terreno. Incluye la determinación de los objetivos y alcances de la auditoría, la selección del equipo auditor, la selección de los lugares donde se realizará y el cronograma de las actividades a desarrollar. Implica, además, recopilar y analizar información preliminar acerca de los procesos a auditar.

#### 9.4.1.1) Definición de Objetivos y Alcances

**Objetivos***:* Tal como se observa en la Tabla 9.1, existe un amplio rango de objetivos potencialmente cubiertos por una auditoría ambiental. El objetivo común en todos los casos es ***identificar*** *y* ***documentar el comportamiento ambiental de la empresa o actividad auditada***. En el contexto de este trabajo, interesa la auditoría como herramienta de diagnóstico preliminar, y como herramienta de gestión en el seguimiento y mejoramiento continuo.

**Alcances***:* En concordancia con los objetivos de la auditoría, se debe definir los niveles de profundidad y detalle, además de los límites en términos espaciales, temporales y funcionales. Generalmente, la definición del alcance de la auditoría es un proceso iterativo, dejando espacio para reformulaciones posteriores en la medida que se gana mayor experiencia respecto a la realidad de la empresa. Se recomienda comenzar por lo más conocido, simple y de menor tamaño, reduciendo a un mínimo el número de áreas funcionales, unidades y procesos a auditar y el número de parámetros a evaluar. Esto no es trivial, ya que toda empresa posee una amplia variedad de operaciones y unidades: selección y adquisición de materias primas, insumos y energía; almacenamiento y manejo de materiales; procesos de transformación, ensamblaje y embalaje; almacenamiento y manejo de desechos; tratamiento y disposición de desechos de producción; almacenamiento, transporte y distribución de productos y desechos; laboratorios de control de calidad e investigación. Una auditoría puede estar enfocada a algunas de ellas o al total.

#### 9.4.1.2) Selección del Equipo de Auditoría y Recursos Necesarios

El equipo de auditores deberá ser seleccionado de acuerdo a la envergadura y naturaleza del ejercicio. Una auditoría simple requerirá, al menos, de dos profesionales con experiencia y conocimientos en aquellos aspectos relevantes, tanto ambientales (es decir, legislación ambiental, impactos ambientales) como de procesos (es decir, de las actividades específicas a auditar). Aparte de las características técnicas de los miembros del equipo auditor, se debe poner énfasis en aquellas facetas personales y éticas, tales como madurez, capacidad de comunicación, discreción y confiabilidad, gentileza en el trato, tacto, responsabilidad, y otras, que facilitan el acceso a la información y la exitosa ejecución de las actividades en terreno (es decir, entrevistas, reuniones).

#### 9.4.1.3) Selección de los Lugares y Actividades a Auditar

Estos dependen del tipo de auditoría, sus objetivos y alcances. En el caso de una

auditoría en el contexto de un sistema de gestión ambiental, se cubre aquellas instalaciones, procesos o actividades identificadas dentro de la política ambiental de la empresa.

#### 9.4.1.4) Preparación del Plan y del Equipo Auditor

El plan de auditoría incluye todas aquellas etapas y actividades requeridas para completar el ejercicio. Una vez definidos los objetivos, alcances, áreas prioritarias, equipo auditor y lugares a auditar, se debe especificar las tareas a desarrollar antes, durante y después de las actividades en terreno.

- **Calendario de actividades, a través de todas las etapas del ejercicio.**

Definir la duración prevista para cada etapa y actividad, además de los recursos humanos y materiales involucrados.

- **Obtención y Análisis de la Información Preliminar Requerida**

Se requiere información preliminar sobre los procesos, procedimientos, legislación vigente, estándares ambientales, y otros datos, que permitan evaluar el desempeño ambiental de la actividad auditada (ver Tabla 9.2). Las fuentes de información incluyen archivos legales, documentos contables, expedientes de personal, registros de accidentes, planes de emergencia y de seguridad e higiene ambiental, registros de proveedores y materias primas, diagramas de procesos, bases de datos abiertas (ej.: vía Internet). Una parte importante de dicha información será entregada por la empresa auditada, en forma previa a la realización de las actividades en terreno. Se pueden utilizar listas de verificación como ayuda para orientar la búsqueda de información. Al final de este capítulo se anexa una lista de verificación típica para auditorías ambientales preliminares.

- **Comunicación con la empresa para lograr un clima de cooperación**

La colaboración activa de todos los funcionarios de la empresa auditada es una condición fundamental para el éxito del ejercicio. Para ello, es necesario que el responsable ambiental de la empresa explique claramente los objetivos que se persigue con la auditoría y los pasos a seguir en el ejercicio, evitando que ésta sea vista como una amenaza. La comunicación entre el equipo auditor y el interlocutor interno deberá ser fluida y expedita, de modo que cada acción del equipo auditor se lleve a cabo luego de que ésta haya sido aceptada y comprendida por los responsables de la empresa.

- **Distribución de tareas en el equipo auditor**

La evaluación de la información preliminar obtenida permitirá establecer con mayor precisión el plan de trabajo, así como las prioridades.

**TABLA 9.2: INFORMACIÓN REQUERIDA EN LA FASE DE PREPARACIÓN DE LA AUDITORÍA**

| |
|---|
| Descripción de la empresa, productos, prácticas y procesos, modo de operación. |
| Requerimientos materiales y energéticos. |
| Historial de problemas ambientales (con la comunidad, autoridades, etc.) |
| Identificación y cuantificación de los residuos (gases, líquidos, sólidos). |
| Fuentes de residuos en el proceso. Gestión (segregación, recuperación, reuso). |
| Tratamiento y control de residuos. |
| Identificación, cuantificación y gestión de compuestos peligrosos. |
| Identificación de otros agentes de impacto potencial sobre el medio ambiente. |
| Planes de emergencia. |
| Historial de accidentes. |
| Planes de entrenamiento. Información sobre riesgos operacionales. |
| Informes médicos acerca de seguridad, salud e higiene ocupacional |
| Controles ambientales existentes, señales de alerta, alarmas, documentación. |
| Programa de vigilancia ambiental. Grado de cumplimiento. |

- **Análisis preliminar de las actividades a auditar**

La información preliminar deberá ser analizada en profundidad, en conjunto con los factores del entorno que pueden ser afectados por las actividades de la empresa, para identificar y evaluar las relaciones entre ellos. Ello permitirá apoyar el establecimiento de prioridades previo al programa en terreno.

- **Identificación de los estándares para evaluar el desempeño ambiental**.

Este aspecto es importante, particularmente en aquellas auditorías que impliquen verificación del comportamiento ambiental. Los estándares son valores que fijan mínimos de calidad ambiental o máximos para las emisiones. Los estándares pueden ser internos (es decir, establecidos por las políticas ambientales de la empresa) o externos (es decir, establecidos por la legislación o normas sectoriales). Es importante acordar desde el principio cuales serán los estándares utilizados, existiendo un consenso al respecto entre el equipo auditor y la empresa auditada.

- **Definición de los métodos y procedimientos a utilizar en terreno**

Los procedimientos de muestreo y análisis serán especificados en esta etapa. Ellos permitirán llevar a cabo el trabajo en terreno para comprobar el grado de veracidad de la información disponible.

- **Preparación de las herramientas de auditoría**

Las herramientas básicas para obtener información en terreno son: los documentos de trabajo, las reuniones, y los análisis u observaciones técnicas. Es fundamental contar con documentos de trabajo que permitan abordar en forma

estructurada la auditoría. Las entrevistas deben realizarse personalmente, para así poder apreciar las reacciones del entrevistado y darle mayor interacción a la comunicación. Los cuestionarios sirven para darle una mayor orientación a la entrevista, estableciendo criterios previamente definidos, permitiendo además generar un documento de trabajo. Los resultados de los análisis y observaciones técnicas efectuadas en terreno, deben ser comparados con los estándares correspondientes.

### 9.4.2) Actividades en Terreno

Las actividades específicas a realizar en terreno dependen del tipo de auditoría ambiental, aún cuando ellas tienen una base común: la búsqueda y verificación de información en terreno.

#### 9.4.2.1) Reuniones de Apertura

Estas reuniones permiten establecer claramente los objetivos de la auditoría, sus motivaciones, los procedimientos metodológicos a emplear y el programa a desarrollar.

#### 9.4.2.2) Identificación y Comprensión del Sistema de Gestión Ambiental

Esta es una de las actividades iniciales del trabajo en terreno. Implica conocer los procesos y controles internos, la organización de la planta, responsabilidades, parámetros ambientales bajo control, problemas pasados y presentes, entre otros.

#### 9.4.2.3) Evaluación del Sistema de Gestión Ambiental

En el caso de las auditorías de verificación del sistema de gestión ambiental, se debe evaluar la eficacia de los controles internos y los efectos de su posible falla.

Se deberá verificar los siguientes aspectos claves:

- Nivel de preparación y experiencia del personal.
- Responsabilidades claramente definidas y asignadas.
- Controles internos adecuados.
- Existencia de sistemas de autorización.
- Existen procedimientos internos de verificación de cumplimiento.
- Existen medidas de protección, ej.: sistemas de seguridad, alarmas.
- Procedimientos y resultados claramente documentados.

Es muy importante incluir aquí aspectos relacionados con seguridad, salud ocupacional y aseguramiento de calidad. Para tales efectos, se debe verificar la efectividad del sistema de aseguramiento de calidad (si existe) y los procedimientos asociados a la prevención de riesgos. En caso de no existir, dichos aspectos deben ser abordados por el auditor y se debe recomendar la implementación de medidas respectivas.

### 9.4.2.4) Recopilación de Información en Terreno

Esta información permitirá verificar el cumplimiento de las leyes, regulaciones, políticas internas u otros estándares ambientales. Esta evidencia se obtiene a partir de 3 fuentes generales:

- **Preguntas (Entrevistas, cuestionarios)**

Las técnicas de conducción de entrevistas y confección de cuestionarios están ampliamente documentadas en la literatura especializada. En general, la entrevista requiere de una cuidadosa planificación y preparación. El entrevistador debe tener un buen nivel de entrenamiento y características de personalidad idóneas. Los cuestionarios deben ser claros y precisos. La Tabla 9.3 muestra algunas recomendaciones básicas acerca de los documentos de trabajo.

- **Observaciones directas (Inspecciones a las instalaciones)**

Las visitas a las instalaciones ofrecen una buena oportunidad para identificar fuentes de emisiones no definidas en los diagramas de proceso (ej.: venteos, derrames, pérdidas). Se recomienda efectuar estas inspecciones en las primeras etapas del ejercicio, para lograr una adecuada familiaridad con los procesos a auditar. Se debe privilegiar inspecciones en condiciones críticas (ej.: cambios de turnos, puesta en marcha o parada de equipos claves, vaciado o llenado de estanques y reactores, etc.). Es importante que el auditor tenga algún registro físico de sus observaciones (ej.: videos, fotografía, dibujos).

**TABLA 9.3: RECOMENDACIONES RESPECTO A LOS DOCUMENTOS DE TRABAJO**

| |
|---|
| • Escritura legible. Identificación de entrevistador y entrevistado. Fecha. |
| • Indicar las fuentes de información. |
| • Relacionar la información entregada con las etapas del plan. |
| • Resumir cada sección y señalar las conclusiones. |
| • Copiar cualquier documento que sirva de apoyo a las conclusiones (negativas o positivas). |
| • Enumerar las páginas en forma consecutiva, y ordenar los documentos en forma lógica. |
| • No dejar ninguna pregunta sin respuesta. |
| • Repasar todos los documentos de trabajo para verificar su coherencia. |

- **Verificación de datos (Muestreos y análisis, revisión de cálculos y registros)**

Aquí se incluye: tomas de muestra de efluentes, registros de asistencia a cursos de capacitación, registros de disposición de residuos, validación de análisis de laboratorio, etc. Es importante identificar las deficiencias por ausencia de registros, incumplimiento de los procedimientos, fallas en los sistemas de control, etc..

### 9.4.2.5) Evaluación de los Resultados

Las evidencias y documentación obtenidas anteriormente deberán ser evaluadas exhaustivamente en el contexto de los objetivos de la auditoría. Se deberá identificar aquellas deficiencias de carácter general, y aquellas que correspondan a aspectos parciales del sistema de gestión. Además, se debe analizar su nivel de importancia. Los aspectos más importantes a evaluar son:

- Verificar cumplimiento con la legislación ambiental.
- Verificar la efectividad de acciones correctivas.
- Identificar potenciales mejoras.
- Formular recomendaciones.

### 9.4.2.6) Reunión de Cierre

Los resultados de las acciones de auditoría son comunicados a la empresa a medida que progresa el ejercicio. Los resultados finales se analizan en conjunto, auditores-empresa, dando cierre a las actividades en terreno, permitiendo aclarar cualquier error o ambigüedad antes de elaborar el informe final.

### 9.4.3) Actividades Finales: Informe Final y Plan de Seguimiento

Los informes de auditoría ambiental son el resultado final de la ejecución de todos los pasos estipulados en el plan de auditoría. La estructura y contenido son específicos a cada tipología de auditoría. La Tabla 9.4 muestra un ejemplo típico de la estructura de un informe final.

Las recomendaciones deberán incluir un Plan de Acción, para asegurar el cumplimiento de las medidas destinadas a corregir las deficiencias del sistema de gestión ambiental. El seguimiento del plan de acción permitirá garantizar el cumplimiento de los procedimientos y plazos establecidos.

**TABLA 9.4: CONTENIDO DEL INFORME FINAL DE AUDITORÍA**

- Índice
- Resumen ejecutivo
- Identificación de la empresa
- Objetivos y alcances de la auditoría
- Metodología empleada. Plan de auditoría
- Observaciones y resultados:
    - Residuos generados
    - Cumplimiento con los estándares
    - Eficacia del sistema de control interno
    - Áreas de riesgo
    - Medidas de corrección. Priorizaciones.
    - Plan de seguimiento
- Conclusiones y Recomendaciones
- Anexos (con toda la documentación de apoyo, glosario)

## 9.5) AUDITORÍA DE RESIDUOS

Es importante señalar que las auditorías para identificar opciones de minimización de residuos siguen un procedimiento similar al descrito anteriormente. En este caso, el análisis de los balances de materia y energía constituye uno de los pilares de este tipo de auditoría, ya que permite evaluar los flujos de recursos a través del proceso e identificar aquellas actividades que presentan mayor potencial de pérdidas.

Para llevar a cabo este ejercicio, es conveniente comenzar considerando la totalidad de la planta, definiendo claramente las corrientes de entrada y salida:

Las corrientes de entrada incluyen:

- Materias primas
- Insumos
- Suministros (vapor, agua)
- Combustibles, energía eléctrica

Las corrientes de salida, normalmente incluyen:

- Productos semielaborados
- Productos terminados
- Residuos (líquidos, sólidos, gaseosos, energéticos)

Es importante tener una completa descripción del proceso, el tipo de operación (ej.: continua, discontinua), frecuencia de operación y estacionalidad.

En esta primera fase, el auditor debería tener respuesta a las siguientes preguntas guía:

- ¿Cuáles son los residuos asociados al proceso?
- ¿Dónde se vierten los residuos líquidos?
- ¿Existe un sistema de tratamiento de residuos líquidos?
- ¿Existen sistemas de depuración de gases residuales?
- ¿Cómo se tratan y disponen los residuos sólidos?
- ¿Dónde se verifican los principales consumos de energía?
- ¿Cuáles son los principales usos del agua?
- ¿Cuáles son los insumos químicos peligrosos?
- ¿Existen procedimientos establecidos para su manejo?
- ¿Existe una adecuada identificación de los principales peligros?
- ¿Se observa una efectiva implementación de medidas de prevención de accidentes?
- ¿Existen planes de emergencia para enfrentar las principales contingencias?
- ¿Se conocen los costos asociados al control ambiental?
- ¿Cuál es la impresión sobre el nivel de motivación, entrenamiento y compromiso del personal?

- ¿Cuál es la actitud de la gerencia hacia el control ambiental?
- ¿Existen monitoreos periódicos de los residuos generados?
- ¿Existen planes de mejoramiento ambiental?

Una vez obtenida una primera base de información general acerca del proceso de producción, se procede a dividirlo en sus principales etapas, siguiendo el orden lógico de las operaciones, sin entrar en mayores detalles técnicos. Interesa definir, para cada etapa, los flujos de materiales y energía, así como las condiciones de operación básicas (temperatura, presión, concentraciones). Se debe identificar todas las corrientes de entrada y salida para cada etapa, y los flujos másicos respectivos (ej. kg/día). Es importante identificar la presencia de compuestos peligrosos (es decir, tóxicos, explosivos, inflamables, corrosivos, etc.) y la existencia de condiciones operacionales extremas (es decir, temperaturas y presiones extremas, reacciones exotérmicas). Ello permite identificar peligros potenciales y evaluar el nivel de riesgo operacional involucrado.

En base a estos resultados, se debe determinar la importancia de cada etapa, en base a la cantidad y tipo de residuos que genera, los recursos consumidos, los niveles de riesgos involucrados y su importancia en el proceso. De este modo, se puede identificar aquellas etapas que deben ser estudiadas con mayor detalle.

En una fase posterior, se detalla las operaciones incluidas en dichas etapas críticas y se identifican y cuantifica sus respectivas corrientes de entrada y salida. Aquellas operaciones que demuestren ser principales fuentes de residuos, de consumo de recursos, de pérdidas y que representan un significativo riesgo operacional, deben evaluarse detalladamente, con la ayuda de expertos en el tema. Al respecto, es importante conocer la opinión de quienes están encargados de operar las unidades críticas y discutir con ellos los cursos de acción posible.

El auditor deberá identificar posibles fallas en los procedimientos de mantención, en los sistemas de medición/monitoreo de variables claves, fallas en el control de calidad, debilidades en el nivel de entrenamiento, falta de motivación/compromiso, u otras causas.

Conjuntamente, es necesario recopilar datos sobre las características del entorno y de los recursos directamente afectados por la actividad industrial, para así evaluar los efectos ambientales más significativos. Con dicha información, el auditor estará en condiciones de formular y evaluar diferentes alternativas para minimizar tales pérdidas, y por consiguiente, reducir el impacto ambiental. Estos conceptos se ilustran en la Figura 9.2.

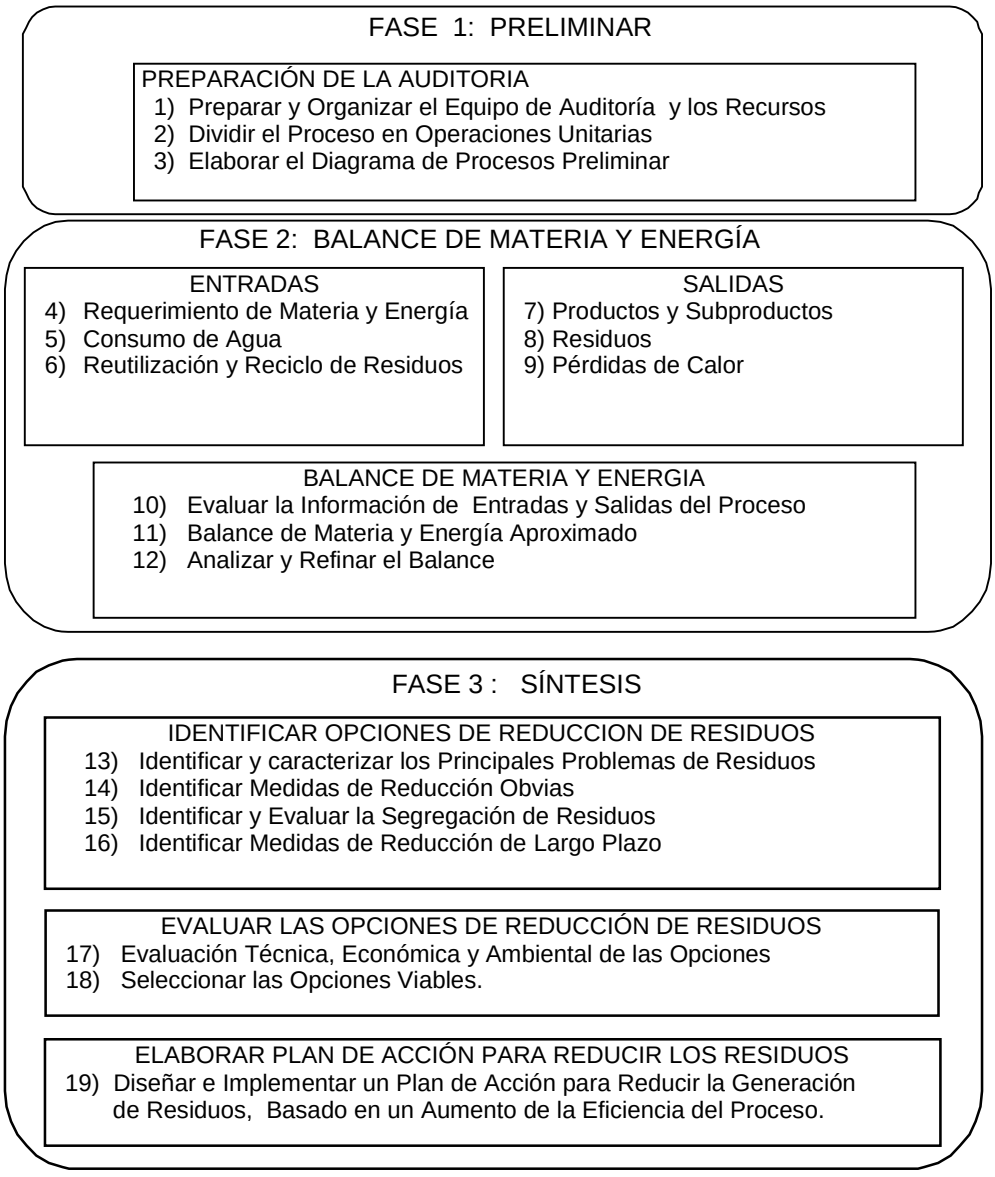



**FIGURA 9.2 : ACTIVIDADES TÍPICAS DE UNA AUDITORÍA DE RESIDUOS**

## 10.6) UN EJEMPLO DE AUDITORIA

A continuación, se presenta un ejemplo de auditoría efectuada a una industria del rubro forestal, especializada en la producción de madera aserrada y paneles remanufacturados. El objetivo general de la auditoría fue diagnosticar la situación ambiental de la empresa e identificar opciones de mejoramiento. Los objetivos específicos planteados fueron los siguientes:

- Diagnosticar la situación de la empresa en materias de medio ambiente, seguridad y salud ocupacional y calidad.
- Verificar el cumplimiento con la legislación ambiental.
- Identificar las unidades o áreas de proceso que son críticas desde el punto de vista ambiental, de seguridad y salud ocupacional y de la calidad del producto
- Identificar las áreas de proceso, unidades o equipos críticos que afectan la eficiencia operacional y que deben ser reemplazadas o reparadas.
- Identificar las opciones obvias para reducir pérdidas de materiales y energía, y minimizar los residuos
- Identificar las opciones para mejorar la capacidad de monitoreo y control de proceso, de registro y evaluación de la información obtenida.

La auditoría se llevó a cabo en dos etapas:

- En una primera etapa, se realizó una evaluación preliminar utilizando listas de verificación, similares a aquellas presentadas en la sección siguiente. Ello permitió obtener información básica sobre la empresa, su sistema de gestión, medio ambiente, seguridad e higiene ocupacional.
- En una segunda fase, se llevó a cabo el trabajo en terreno para actualizar el diagrama de proceso, efectuar mediciones en la planta, y estimar los diferentes flujos de materiales y residuos generados.

Los requerimientos de información para llevar a cabo la auditoría, y las principales fuentes de información se resumen en la Tabla 9.5.

**Descripción del Proceso:**

El proceso consiste en transformar madera en bruto, en madera aserrada y paneles madera de alto valor agregado. La Figura 9.3 muestra el diagrama general del proceso. De acuerdo a la naturaleza de las operaciones, se distinguen cuatro etapas en el proceso:

- almacenamiento de los troncos en cancha de acopio,
- aserradero
- secado de la madera aserrada
- fabricación de paneles

***Almacenamiento***: La cancha de acopio posee en una superficie de 9.000 $m^2$, donde se almacenan los trozos de pino insigne que sirven de materia prima. Los trozos son regados con agua utilizando un sistema de aspersión, alimentado

desde una napa subterránea con un flujo máximo de 1.500 $m^3$/día. Ello permite mantener la madera con un alto contenido de humedad para proteger su estructura física, minimizar riesgos de incendio espontáneo, y evitar el ataque de hongos.

***Aserradero:*** El aserradero procesa los trozos de pino insigne, con un volumen mensual de 5.100 $m^3$ (sólidos con corteza). Antes de ingresar a las operaciones de aserrío, los troncos son descortezados mecánicamente en un descortezador. Luego, los troncos son transportados hacia diferentes tipos de sierras. De esta unidad se obtienen 200 $m^3$ /mes de madera aserrada verde para venta regional, y 1.300 $m^3$/mes de madera aserrada verde, seleccionada para su posterior secado y utilización en la fabricación de paneles.

***Secador:*** Los 1.300 $m^3$/mes se alimentan en un secador discontinuo, utilizando carros especiales, donde se reduce su contenido de agua hasta llegar a una humedad de la madera cercana al 9%. El secador, tipo túnel con aire a alta velocidad, posee una capacidad de carga cercana a 80 $m^3$ de madera/lote. El secador utiliza vapor generado por una caldera con capacidad de 4,5 ton vapor por hora. Los residuos sólidos de madera que se generan en la planta, tales como chicotes, despuntes, corteza, aserrín y virutas, son utilizados como combustibles en la caldera. Los gases de combustión generados son depurados mediante ciclones, previo a su emisión a la atmósfera a través de una chimenea de 18 m de altura. La caldera funciona en forma continua, operando a un nivel mínimo cuando no se realiza operaciones de secado de madera.

***Fabricación de Paneles***: La madera aserrada seca se transforma en paneles remanufacturados para exportación. En una primera fase, la madera es cepillada en sus 4 caras utilizando una máquina cepilladora especial. Luego, la madera cepillada se corta en trozos de dimensiones específicas utilizando máquinas trozadoras. Este proceso implica cortes de alta precisión, y tiene como objetivo eliminar los nudos y otros defectos. Dichos trozos se alimentan a un sistema altamente automatizado, donde se fabrican paneles de madera sólida. Estos paneles se dimensionan de acuerdo a especificaciones y, finalmente, son lijados y cepillados para lograr una fina terminación.

Los principales resultados se resumen en las Tablas 9.6, 9.7 y 9.8.

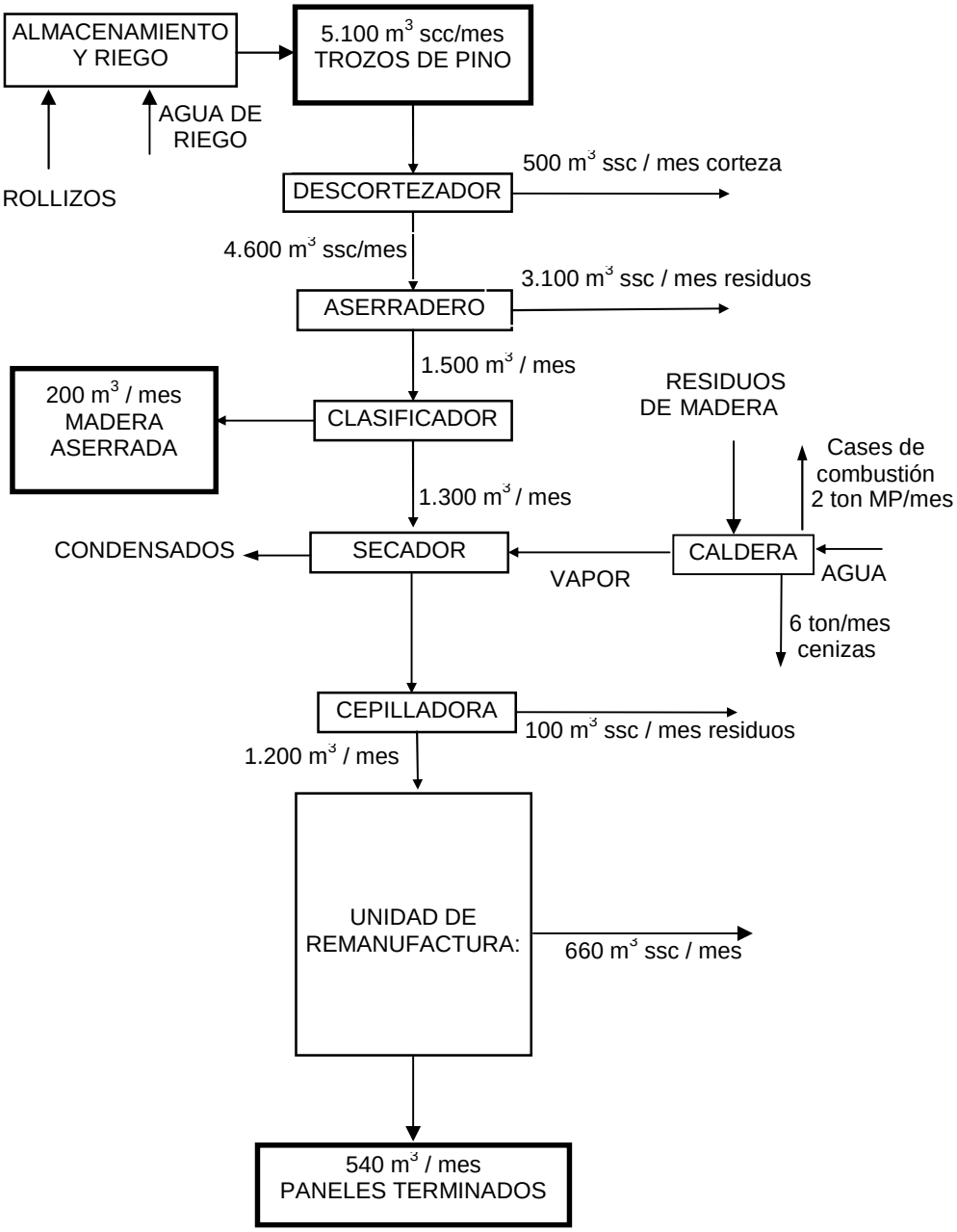



**FIGURA 9.3: DIAGRAMA DEL PROCESO**

| TABLA 9.5 : INFORMACION REQUERIDA PARA LA AUDITORIA | |
|---|---|
| **Información** | **Fuentes** |
| • Descripción de la empresa, productos, prácticas y procesos, modo de operación. | • Cuestionario a la empresa. |
| • Compromisos ambientales y legislación aplicable. | • Estudio de impacto ambiental y resolución de calificación ambiental. |
| • Requerimientos materiales y energéticos. | • Registros de adquisiciones y ventas. |
| • Historial de problemas ambientales (con la comunidad, autoridades, etc.) | • Encuestas a la comunidad local. Entrevistas con autoridades fiscalizadoras. |
| • Identificación de los residuos. Cantidades. | • Registros. Información del proceso y balances de masa. Datos de diseño. Trabajo en terreno. |
| • Fuentes de residuos en el proceso. Gestión (segregación, reciclo, recuperación). | • Información proporcionada por la empresa. Trabajo en terreno. |
| • Tratamiento y control de residuos. | • Datos de diseño, visitas a terreno y resultados de análisis rutinarios. |
| • Identificación de compuestos peligrosos. Cantidades, transporte, almacenamiento, etc. | • Información sobre el proceso, hojas de seguridad, registros de adquisiciones, y control de inventario. |
| • Identificación de otros agentes de impacto potencial sobre el medio ambiente. | • Registros de accidentes, resultados de encuestas a la comunidad local, observaciones durante trabajo en terreno. |
| • Prevención de riesgos y planes de emergencia. Salud ocupacional. | • Documentación sobre prevención de riesgos. Entrevistas a personal responsable. Registros sobre accidentes, enfermedades laborales, informes médicos. |
| • Historial de accidentes | • Registros de accidentes e incidentes. Entrevistas al personal y encuesta la comunidad local. |
| • Planes de entrenamiento. Información sobre riesgos operacionales. | • Registros de capacitación. Entrevistas al personal. Verificación en terreno. |
| • Controles ambientales existentes, señales de alerta, alarmas, documentación. | • Documentación. Verificación en terreno. |
| • Compromisos ambientales. Grado de cumplimiento | • Documentación. Resultados de monitoreo. |

| TABLA 9.6: REQUERIMIENTOS MATERIALES Y ENERGETICOS | |
|---|---|
| Madera | 5.100 $m^3$scc./mes, Pino insigne |
| Adhesivos para molduras | 5,6 ton/mes |
| Pinturas | 1,8 $m^3$ /mes. |
| Energía Eléctrica | 210 MWh / mes |
| Combustible | 7 $m^3$ diesel / mes |
| Agua para riego | 45.000 $m^3$ /mes |
| Agua para caldera | 1.130 $m^3$ /mes |
| Agua para uso doméstico | 430 $m^3$ /mes |

| TABLA 9.7: RESIDUOS GENERADOS | | |
|---|---|---|
| **Residuos** | **Cantidad** | **Destino** |
| Residuos sólidos:<br>• Residuos de madera (aserrín, polvo)<br>• Cenizas de caldera y de ciclones<br>• Residuos de oficina y casino | <br>280 ton/mes<br>6 ton/mes<br>1 ton/mes | <br>Acopio interno.<br>Vertedero municipal.<br>Vertedero municipal. |
| Residuos líquidos<br>• Condensados y aguas domésticas<br>• Efluente de riego de trozos | <br>1.560 ton/mes<br>45.000 ton/mes | <br>Fosa séptica.<br>Infiltración local. |
| Residuos gaseosos<br>• Material particulado | 3 ton/mes | Emisión por chimenea de 18 m, previa depuración con ciclones. |

| TABLA 9.8: RESULTADOS PRINCIPALES | |
|---|---|
| Gestión ambiental. | La empresa carece de un sistema de gestión ambiental, aún cuando existe cierta preocupación por materias de seguridad y salud ocupacional, que son consideradas en la gestión de la empresa. |
| Unidades o áreas de proceso que son críticas desde el punto de vista ambiental, de seguridad y salud ocupacional y de la calidad del producto | • Se deberá instalar o mejorar la aislación acústica de las unidades generadoras de ruido. Se requiere un estudio sonométrico previo.<br>• La zona de acopio de residuos sólidos es inadecuada. Se debe diseñar un sistema que evite el arrastre de aserrín y polvo de madera por acción del viento.<br>• Las bodegas de almacenamiento de madera seca y aditivos, la zona de acopio de residuos de madera, la unidad de remanufactura, y la caldera, son las áreas críticas en materia de seguridad. Se debe establecer un procedimiento más afinado para la prevención de incendios, e instalación de detectores de humo en todas las zonas críticas. Se recomienda efectuar un análisis de riesgos preliminar.<br>• La zona de acceso a la planta presenta serios problemas de seguridad de tráfico. Se debe rediseñar el acceso y establecer una señalización adecuada. Se requiere una urgente acción para establecer procedimientos seguros con los transportistas y contratistas que acceden a la planta. Se debe contactar las autoridades pertinentes.<br>• La calidad del producto depende fuertemente de la calidad de la materia prima y de la eficiencia operacional de cada una de las máquinas de la unidad de remanufactura. Se debe establecer un control de calidad apropiado. |
| Areas de proceso y equipos críticos que afectan la eficiencia operacional, y que deben ser reemplazadas o reparadas. | • Utilizar sierras de mejor calidad en la operaciones de aserrío. En la actualidad, casi el 45% de la madera a aserrar se transforma en aserrín; ello se puede reducir a alrededor de 30% con nuevas sierras. Con esta medida se lograría, además, incrementar la producción de madera aserrada verde en aproximadamente 600 $m^3$ al mes y reducir sustancialmente el excedente de residuos de madera.<br>• Reparación exhaustiva de los ciclones. La auditoría detectó una eficiencia depurativa de 50%, mientras que la de diseño es 85%. Una mejor operación de los ciclones reduciría la emisión de material particulado de 3 ton/mes a 0,9 ton/mes.<br>• Mantener la caldera en condiciones óptimas. Estructurar un procedimiento de mantención preventiva. |
| Opciones para reducir la generación de residuos, y pérdidas de materiales y energía. | Aparte de las medidas señaladas anteriormente, se recomienda estudiar la factibilidad técnico-económica de las siguientes opciones:<br>• Construir un silo de almacenamiento de aserrín y otros residuos, para un mejor control de la humedad del material y una operación más estable de la caldera.<br>• Este sistema debería incluir correas transportadoras para evacuar todo el material de desecho (aserrín, corteza y astillas) del aserradero hacia el silo.<br>• Instalar un sistema neumático de recolección de polvo en la unidad de remanufactura, facilitando una mejor gestión y su utilización como combustible.<br>• Priorizar el uso de aserrín, viruta y polvo de madera en la caldera. Evitar la combustión de tapas y despuntes ya que pueden ser comercializados como astillas.<br>• Impermeabilizar el suelo de la cancha de acopio. Instalar un sistema para recolección del agua de riego, para ser tratada con un filtro de arena o en un estanque de decantación, y recirculada al sistema de riego (reduciría el consumo de agua en más de 80%). |
| Medidas de Gestión. | • Establecer una estructura orgánica para una adecuada gestión ambiental. Nominar encargados por áreas, con responsabilidades a nivel gerencia.<br>• Establecer un programa de mantención preventiva. Se sugiere realizar una mantención rutinaria semanal a aquellos equipos que operan un turno diario, mensual a los que operan 2 turnos diarios, anual a toda la planta y a la caldera.<br>• Mantener un registro periódico de los residuos generados.<br>• Establecer mayores controles en el riego de trozos. Diseñar procedimientos para la operación de riego de trozos, para evitar el excesivo consumo de agua en la época estival. Establecer contacto con los otros usuarios locales de la napa.<br>• Realizar análisis de calidad de agua de la napa subterránea.<br>• Controles periódicos de emisiones de material particular. |

## 9.7) LISTA DE VERIFICACIÓN PARA AUDITORIAS PRELIMINARES [2]

### A - INFORMACIÓN GENERAL

1) ¿Existe en la empresa un plan de gestión medioambiental, escrito y actualizado?

SI NO

2) ¿Existe un plan de emergencia escrito y actualizado, en caso de accidente grave?

SI NO

3) ¿Existe un plan, escrito y actualizado, de mantenimiento de la planta? (revisión y control de la maquinaria de los sistemas de producción, de seguridad y de emergencia)

SI NO

4) ¿Existe un sistema de seguridad, higiene y protección en el trabajo y, si existe, se cumple?

SI NO

5) ¿Existe un sistema de formación e información al trabajador sobre el manejo de la maquinaria, así como de la composición, propiedades, manipulación y eliminación de cualquier producto o sustancia utilizados?

SI NO

6) ¿Existe una copia de todos los informes, permisos y autorizaciones administrativas a nivel local, regional o nacional?

SI NO

7) ¿Existen todos los contratos, por escrito y actualizados, de los gestores y transportistas externos?

SI NO

8) ¿Existe un sistema de tratamiento, depuración o eliminación de los residuos líquidos, sólidos o gaseosos, y documentación escrita al respecto?

SI NO

9) ¿Están calibrados todos los sistemas de medición y control de las plantas de fabricación, almacenaje y tratamiento?

SI NO

10) ¿Existe una amplia base de datos que permita a la empresa evaluar sus resultados, y los documentos necesarios para confrontar el control de los resultados?

SI NO

[2] Publicada por M. Seoanez et al "Auditorías Medioambientales". Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 1995

## B - MATERIAS PRIMAS Y ALMACENAMIENTO

11) Materias primas consumidas. Inventario (anual o mensual).

| | |
|---|---|
| Combustibles | ..... |
| Energía Eléctrica | ..... |
| Agua | ..... |
| Materias primas | ..... |

12) ¿Las materias primas y los productos se almacenan selectivamente? (en función de sus propiedades, composición, manejo y riesgos, etc.).

SI NO

13) ¿Existen registro y copias, actualizados, del abastecimiento y compra de materias primas y de sus proveedores?

SI NO

14) ¿Conoce el personal las características de cada materia prima (composición y propiedades, riesgos y manejo, etc.) y toma las medidas necesarias para su manipulación?

SI NO

15) ¿La empresa utiliza sustancias consideradas peligrosas (tóxicas, inflamables, corrosivas, reactivas)?

SI NO

¿Cuáles? .....
.....

16) ¿Tiene todas las autorizaciones y permisos para abastecerse y hacer uso de dichas materias primas y del resto, aunque no sean peligrosas?

SI NO

17) ¿Existe un sistema, actualizado y escrito, y la documentación necesaria para una gestión correcta de las materias primas?

SI NO

## C - RESIDUOS SÓLIDOS

18) Productos fabricados.

| | |
|---|---|
| Tipo | ..... |
| Cantidad | ..... |

19) ¿Los residuos sólidos generados se almacenan selectivamente? (en función de sus características, propiedades, riesgo, vida activa, eliminación o tratamiento, manipulación, etc.).

SI NO

20) ¿Conoce el personal las características antes mencionadas de estos residuos y toma las medidas necesarias para su manipulación?

SI NO

21) ¿Existe un sistema, actualizado y escrito, así como la documentación necesaria para la correcta gestión de los residuos sólidos? (almacenamiento, tratamiento, eliminación, transporte)

SI NO

22) ¿Existe documentación escrita sobre los métodos de análisis de residuos y los límites máximos permitidos para evacuarlos?

SI NO

23) ¿Las cantidades de residuos sólidos almacenadas superan los límites máximos permitidos?

SI NO

24) ¿El almacenamiento de residuos sólidos se realiza en envases adecuados para evitar fugas y accidentes?

SI NO

25) ¿Existen registros y copias actualizados de todas las operaciones de salida y entrada de los residuos? (transporte, destino, procedencia, tipo de tratamiento o eliminación, etc.).

SI NO

26) ¿Gestiona y trata sus propios residuos?

SI NO

**D - RESIDUOS PELIGROSOS**

27) ¿Produce residuos tóxicos, corrosivos, reactivos o inflamables?

SI NO

28) ¿Existe un método de caracterización de sus residuos tóxicos y peligrosos? (propiedades físico-químicas, composición química, volumen, peso).

SI NO

29) ¿Ha realizado algún estudio sobre las cantidades producidas?

SI NO

30) ¿Cumplen con las normas técnicas de almacenamiento y envasado de residuos peligrosos?

SI NO

31) ¿El tiempo de almacenamiento supera los límites máximos permitidos?

SI NO

32) ¿Tiene registros de residuos peligrosos?

SI NO

33) ¿El personal de la planta conoce los riesgos y características de estos residuos peligrosos y cumple todas las recomendaciones de manipulación?

SI NO

34) ¿Los almacenes de residuos peligrosos están separados y señalizados?

SI NO

35) ¿Existen planos actualizados de las vías de salida de los residuos peligrosos?

SI NO

36) ¿Existe un sistema de control y mantenimiento de dichas vías de salida?

SI NO

37) ¿Existe un sistema de emergencia en caso de fugas o averías en dichas vías de salida?

SI NO

38) ¿Produce aceites usados, PCB o PCT?

SI NO

39) ¿Los almacena adecuadamente?

SI NO

40) ¿Los envasa y etiqueta adecuadamente?

SI NO

41) ¿Se le entrega información acerca de los compuestos peligrosos a las autoridades correspondientes?

SI NO

## E – RESIDUOS GASEOSOS

42) ¿Se conoce la composición y las características de los residuos que se emiten al aire?

SI NO

43) Residuos emitidos a la atmósfera:

Tipo .....

Cantidad .....

44) ¿Existe un sistema, actualizado y escrito, así como la documentación necesaria para la correcta gestión de estas emisiones?

SI NO

45) ¿Se trata estos residuos antes de su emisión al aire?

SI NO

46) ¿Existe documentación escrita sobre los métodos de análisis de estas emisiones y de los límites máximos permitidos?

SI NO

47) ¿Se conoce la cantidad anual de residuos emitidos a la atmósfera, así como su fuente en el proceso de producción?

SI NO

48) ¿Existe documentación escrita sobre las propiedades y los efectos (sobre el hombre, sobre la flora, sobre la fauna y sobre los materiales) de cada compuesto que se emite al aire?

SI NO

## F – RESIDUOS LÍQUIDOS

49) ¿Se conoce la composición de todos los efluentes líquidos que se producen en la planta?

SI NO

50) Efluentes líquidos.

Tipo (agua de lavado, de refrigeración, etc.) .....
Cantidad .....

51) Compuestos que contienen los efluentes.

Tipo .....
Cantidad .....

52) ¿Existe un sistema, actualizado y escrito, así como la documentación necesaria para la correcta gestión de estos efluentes?

SI NO

53) ¿Se trata estos efluentes antes de su vertido?

SI NO

54) ¿Cuáles son los procesos de depuración?

.....

55) Tipo de receptor sobre el cual se vierten estos efluentes .....

56) ¿Se conoce todas las características (físicas, químicas y biológicas) de estos efluentes líquidos?

SI NO

57) ¿Existe documentación escrita sobre los métodos de análisis de estos

vertidos y de los límites máximos permitidos?

SI NO

58) ¿Existe documentación escrita sobre los daños y efectos de estos vertidos en los receptores? (cursos de agua, zonas costeras, embalses, suelos, acuíferos).

SI NO

## G - GESTIÓN AMBIENTAL

59) ¿Existe un encargado de medio ambiente en la empresa a nivel gerencial?

SI NO

60) ¿Existe una política ambiental de la empresa, conocida por todos los miembros de la organización?

SI NO

61) ¿Existen objetivos y metas ambientales?

SI NO

62) ¿Existe un programa ambiental?

SI NO

63) ¿Existen registros escritos de todos los parámetros que afectan a la gestión ambiental? (volúmenes de residuos, tipo y características, almacenamiento, tratamientos, sistemas de emergencia, etc.).

SI NO

62) ¿Existe y se aplica un plan de auditorías ambientales?

SI NO

63) ¿Se guarda todos los informes de las auditorías precedentes?

SI NO

64) ¿Existe una copia del CV actualizado de cada miembro del departamento de medio ambiente?

SI NO

65) ¿Existe un plan escrito y actualizado de reducción de residuos?

SI NO

66) ¿Existe un plan escrito y actualizado para la transformación, modificación o inertización de residuos peligrosos y el desarrollo de productos ambientalmente aceptables?

SI NO

67) ¿Existe un plan escrito y actualizado de formación del personal en técnicas y métodos de control ambiental?

SI NO

68) ¿Existe un registro de reclamos de tipo ambiental por parte de la comunidad?

SI NO

69) ¿Existe un registro de accidentes que hayan ocasionado daño ambiental o transgresiones a las normas ambientales?

SI NO

70) ¿Existe un procedimiento para la identificación de los aspectos ambientales significativos, en caso de modificaciones a los procesos, nuevas inversiones u otros cambios?

SI NO

71) ¿Se evalúa periódicamente las condiciones ambientales internas de la planta?

SI NO

72) ¿Se lleva a cabo mantenciones periódicas de aquellos equipos con mayor potencial de impacto ambiental?

SI NO

**BIBLIOGRAFÍA**

Conesa Fdez.-Vitoria V., "Auditorías medioambientales: Guía Metodológica", Editorial Mundi Prensa, Madrid (1995)

Harrison L. “Manual de Auditoría Medioambiental, Higiene y Seguridad, 2ªed. McGraw-Hill, Madrid (1996)

International Chamber of Commerce, "Effective Environmental Auditing", ICC Publishing S.A., Paris (1991)

Kuhre W.L. “ISO 14010: Environmental Auditing”. Prentice Hall PTR. New Jersey (1996)

Nordic Council of Ministers. “Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment”, The Nordic Council, Stockholm (1995)

# CAPÍTULO 10

# ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

## 10.1) INTRODUCCION

En los últimos años se ha desarrollado un enfoque sistémico para el análisis de los impactos ambientales asociados a procesos y productos. Los procesos industriales no sólo generan residuos, sino que también consumen recursos naturales, requieren infraestructura de transporte, utilizan insumos químicos, agua y energía, y generan productos que deben ser transportados, consumidos y, en algunos casos, reutilizados antes de su eliminación final (ver Figura 10.1). En cada una de estas instancias se generan impactos ambientales diversos, los que deben ser tomados en consideración cuando se desea evaluar el efecto de un proceso sobre el medio ambiente. El **análisis del ciclo de vida (ACV)** consiste en evaluar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida del producto, vale decir, desde las fuentes de recursos primarios (ie. desde su "cuna"), hasta el consumo y disposición final (ie. hasta su "tumba"). Ello permite identificar los impactos sobre los diferentes compartimentos ambientales más allá de los límites de la planta productiva. Dichos impactos inducidos pueden, en muchos casos, ser de mayor relevancia que aquellos ocasionados directamente por el proceso de manufactura del producto. Por ejemplo, la sobre-explotación y una gestión inadecuada del recurso forestal pueden degradar significativamente la calidad del suelo, con los consiguientes impactos negativos sobre la tasa de renovabilidad del recurso y sobre la calidad de las aguas superficiales, debido al arrastre de sedimentos y material orgánico disuelto derivados de procesos erosivos.

El análisis del ciclo de vida fue originalmente desarrollado en la década del 70 a raíz de la crisis energética. Inicialmente, se limitó a simples balances de materia y energía a lo largo del proceso de generación y consumo energético, con vistas a identificar oportunidades de ahorro de energía a través de la cadena de producción y consumo. Dada la estrecha relación existente entre el consumo energético, el consumo de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV tal como se le conoce en la actualidad. De acuerdo a la literatura, el primer ACV fue comisionado por Coca Cola en 1969, para evaluar diferentes tipos de envases desde el punto de vista del consumo de recursos y de la generación de residuos. Dicho estudio fue realizado por el Midwest Research Institute de EEUU y se definió como un análisis de recursos y perfil ambiental. A partir de ese entonces, se sucedieron decenas de estudios similares con vistas a minimizar el consumo de recursos y la generación de residuos. A mediados de la década de los ochenta, se había logrado constituir una buena base de información acerca de los atributos ambientales de diferentes tipos de envases y embalajes, en cuanto al consumo de energía y materiales, y a las emisiones de residuos. En la medida que el requerimiento de minimización de consumo de recursos y de generación de emisiones se generalizó en el mundo industrializado, la herramienta de ACV fue madurando progresivamente. El gran salto metodológico fue dado a comienzos de la presente década, con las contribuciones de la EPA-EEUU, e

instituciones ambientales europeas, tales como la BUWAL-Suiza, el CML-Holanda, el IVL-Suecia, entre otros.

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes (ver Figura 10.2). Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de ecoetiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de "productos ambientalmente favorables" y en las normas ISO. Las normas ISO poseen varios estándares asociados a la conducción de ACV:

| | |
|---|---|
| Norma ISO 14040: | presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios. |
| Norma ISO 14041: | guía para determinar los objetivos y alcances de un estudio de ACV y para realizar el análisis de inventario. |
| Norma ISO 14042: | guía para llevar a cabo la fase de evaluación de impacto ambiental de un estudio de ACV. |
| Norma ISO 14043: | guía para la interpretación de los resultados de un estudio de ACV. |
| Norma ISO 14048: | entrega información acerca del formato de los datos que sirven de base para la evaluación del ciclo de vida. |
| Norma ISO 14049: | posee ejemplos que ilustran la aplicación de la guía ISO 14041. |

Junto al ACV existe un conjunto de herramientas complementarias que permiten evaluar las cargas ambientales, con diferente resolución y con distintos límites del sistema estudiado. Algunas de éstas se describen a continuación:

*Evaluación de impacto ambiental*: herramienta para la toma de decisiones que incluye la identificación, cuantificación y valoración de los impactos ambientales asociados a un proyecto (ver Capítulo 7).

*Evaluación de tecnologías:* herramienta de diseño de procesos menos contaminantes, cuyo objetivo es evaluar comparativamente diferentes opciones tecnológicas, sobre la base de sus atributos ambientales, técnicos, económicos, sociales, etc. (ver Capítulo 6) .

*Análisis de riesgos*: evalúa posibles accidentes, considerando la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias sobre las personas, las instalaciones y el medio ambiente. Permite identificar y evaluar medidas de prevención y control (ver Capítulo 11).

*Análisis de intensidad de recursos*: evalúa la cantidad de materiales y energía que se utiliza en un sistema de producción asociado a un producto o servicio, a lo largo de su ciclo de vida. Trabaja sobre el total de materia y energía, sin especificar la naturaleza y composición específica.

*Evaluación de desempeño ambiental*: es una herramienta interna que provee al sistema de gestión con información ambiental objetiva y verificable sobre el desempeño de una organización. Se debe seleccionar indicadores ambientales

adecuados para describir la interacción con el medio ambiente. Se aborda en las normas ISO 14031 (ver Capítulo 8).

Las técnicas específicas para el análisis del ciclo de vida de un producto o proceso aún se encuentran en pleno desarrollo. Aspectos tales como el modelamiento y análisis de los flujos de materia y energía a través del ciclo de vida, y su relación con los diferentes compartimentos ambientales, representan un gran desafío de investigación. La *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, la ISO, agencias ambientales y agrupaciones industriales diversas, han desarrollado y propuesto diferentes enfoques para la realización del ACV. En tal sentido, se hace necesario un consenso entre todas las partes interesadas para que la información que se obtenga de los ACV sea comparable sobre una base común. Al respecto, el *Journal of Life Cicle Analysis* y el *Journal of Cleaner Production* se han especializado en la publicación de artículos sobre diferentes aspectos del ACV, constituyendo un foro internacional de reconocido prestigio para la discusión de las herramientas metodológicas y resultados de estudios específicos.

**Definición de Análisis del Ciclo de Vida:**

Las definiciones más utilizadas para el ACV, son las siguientes:

Norma ISO 14040: *"el Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio"*

Norma española UNE 150-040-96: *"El Análisis de Ciclo de Vida es una recopilación y evaluación de las entradas y salidas de materia y energía, y de los impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a la función del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida"*

Consejo Nórdico de Ministros: *"El Análisis de Ciclo de Vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos".*

El ACV permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de cada interacción ambiental. A pesar de postular una cobertura sobre todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos resulta difícil abarcar todas las actividades desde la "cuna a la tumba", por lo que se debe definir claramente el sistema requerido para que el producto cumpla con una determinada función.

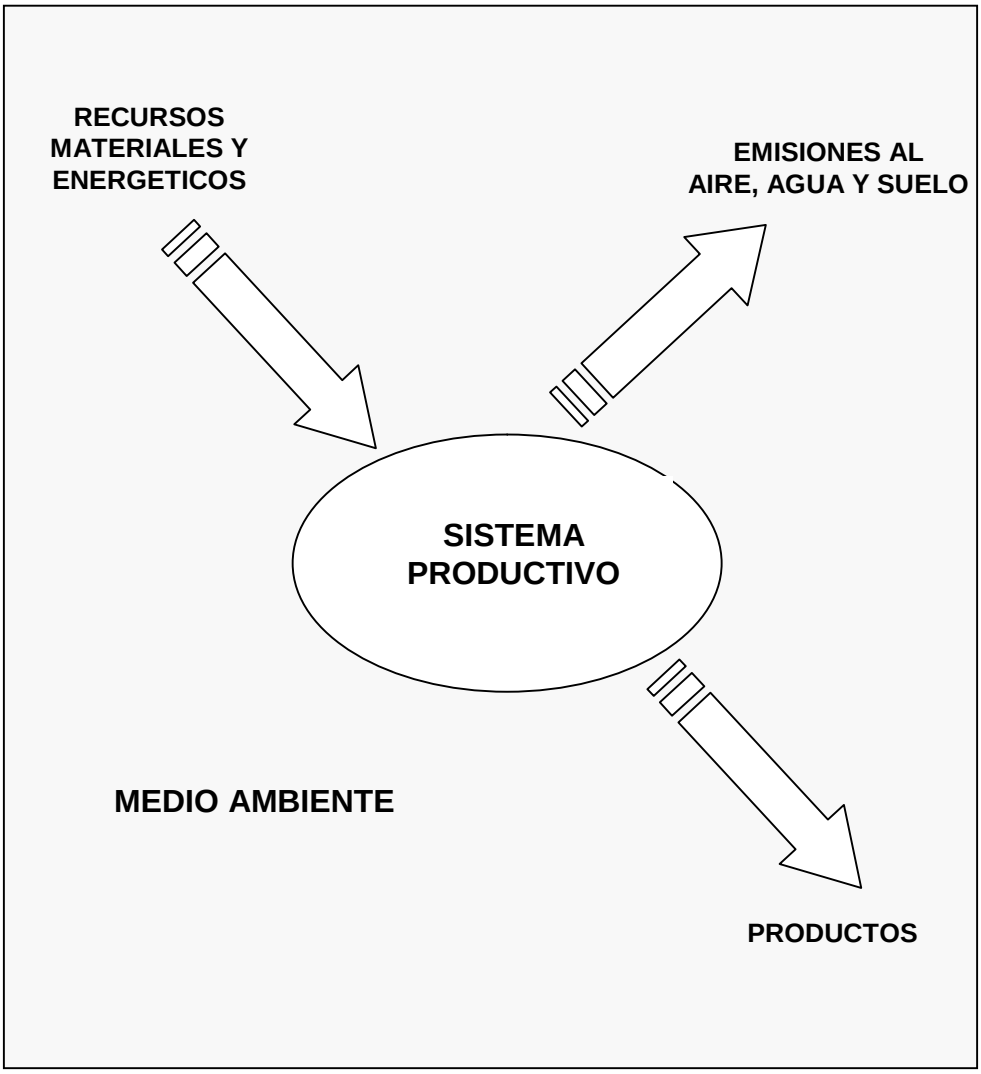



**FIGURA 10.1: CARGAS AMBIENTALES DE UN SISTEMA DE PRODUCCION**

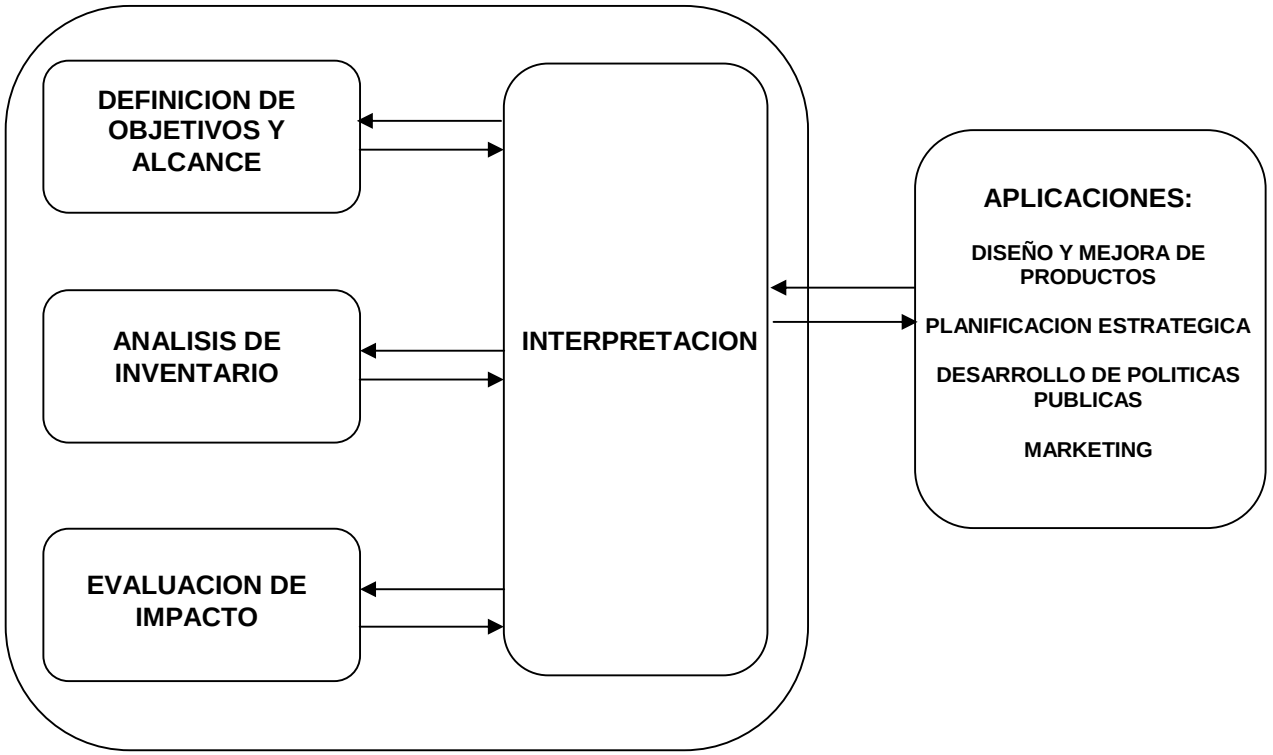



**FIGURA 10.2 MARCO DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA**

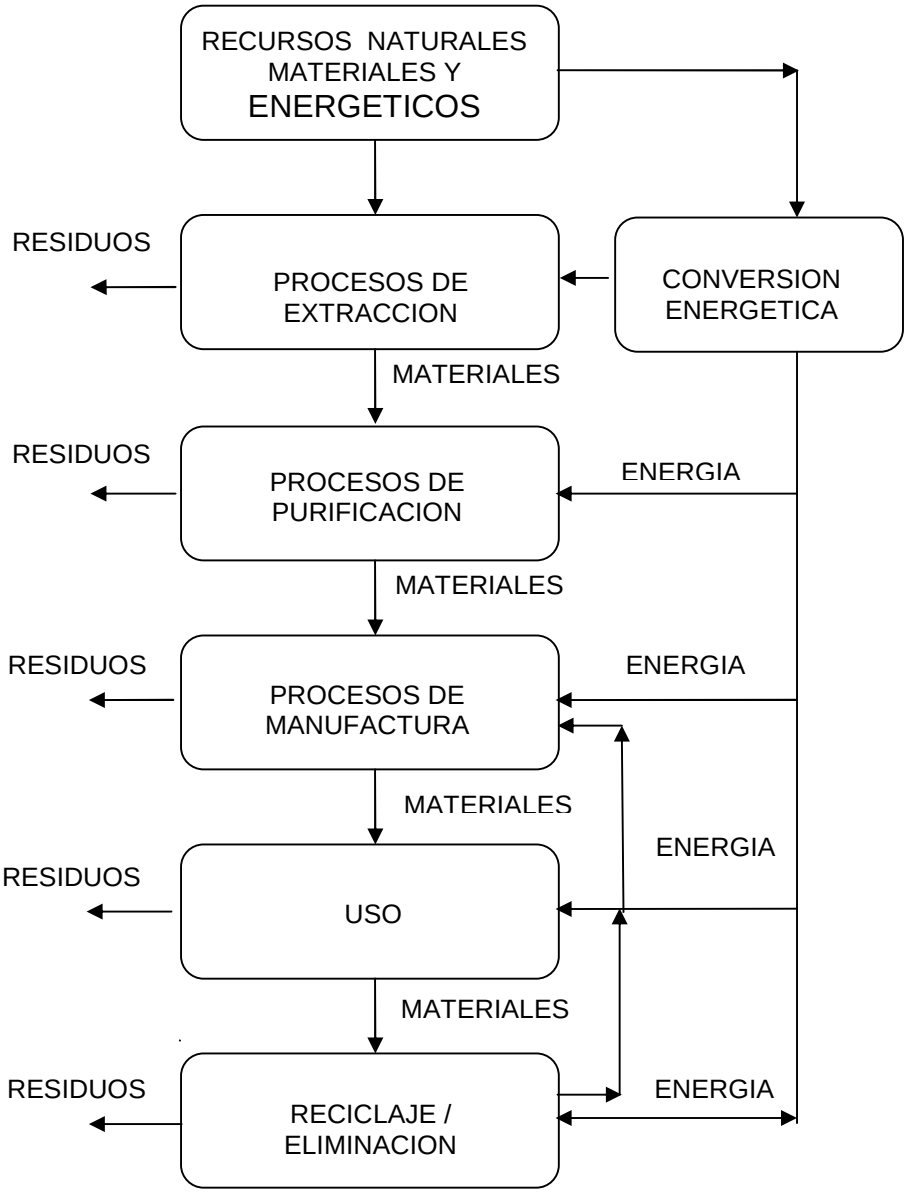



**FIGURA 10.3: CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO**

## 10.2) METODOLOGIA DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

En su expresión más general, el análisis del ciclo de vida consiste de 4 componentes:

a) **Definición de objetivos y alcance:** se debe precisar los objetivos que motivan el estudio, así como los límites del sistema a analizar e identificar los componentes del ciclo de vida (ej. extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final de residuos, etc) (ver Figura 10.3).

b) **Análisis de inventario**: se desarrolla aquí los balances de materia y energía a través de los diferentes componentes del ciclo de vida.

c) **Evaluación de los impactos ambientales potenciales:** debe considerar la salud y seguridad de las personas, y las cargas ambientales. Se debe identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.

d) **Interpretación**: en base al análisis anterior, se debe identificar y evaluar medidas de mejoramiento que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

## 10.3) DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado. Debido a su naturaleza global, un ACV podría ser interminable y debe establecerse límites a su extensión. La definición de los límites del sistema a estudiar es una de las etapas críticas del ACV. Al respecto, se debe considerar los siguientes aspectos para definir el alcance del ACV:

### a) Función del sistema:

Se deben describir las funciones que definen el sistema en estudio. Esto es importante en aquellos casos donde el producto puede cumplir varias funciones. Por ejemplo, un computador multimedia puede ser utilizado como procesador de información y, además, puede servir para comunicación telefónica/fax. Si el ACV se realiza para comparar ambientalmente varios sistemas, se debe garantizar que cumplan la misma función.

### b) Unidad funcional:

La unidad funcional se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materias y energía. En el caso de ACV comparativos, se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar. Por

ejemplo, el ACV para comparar dos tipos de detergentes puede considerar, como unidad funcional, el “lavado de 1000 kg de ropa de algodón”.

**c) Límites del sistema:**

Se debe identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Ello incluye la obtención de los recursos primarios, todos los procesos de fabricación y transporte de los componentes del producto y sus materias primas, además de todas las fases del ciclo de vida del producto terminado (ver Figura 10.3). Es necesario decidir qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV. Por ejemplo, se puede excluir del análisis los componentes que se encuentren bajo un % límite (ej. menor de 0,5% del peso del producto). Es importante establecer los límites geográficos de las actividades a incluir en el ACV, ya que pueden ser afectadas por condiciones locales (ej. los sistemas de generación de energía eléctrica, los sistemas de transporte, los sistemas de tratamiento y disposición de residuos).

## 10.4) ANALISIS DE INVENTARIO

El análisis de inventario es un balance de materia y energía del sistema, aunque puede incluir otros parámetros, tales como: utilización del suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, etc. Comprende la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado (ver Figura 10.1):

**Entradas:** son las materias primas y las fuentes de energía
**Salidas:** son las emisiones al aire, al agua y al suelo, y los productos

Parte de los flujos materiales y energéticos proceden de la naturaleza o se destinan a ella, mientras que otros flujos tienen su origen o destino en la tecnósfera. Algunos ejemplos se presentan en la Tabla 10.1 siguiente:

**TABLA 10.1: ORIGEN Y DESTINO DE FLUJOS MATERIALES Y ENERGETICOS**

| FLUJO | DESTINO/ORIGEN | MEDIO |
|---|---|---|
| Residuo líquido tratado | Destino: Vertido al mar | Natural |
| Combustible diesel | Origen: Refinería de petróleo | Tecnósfera |
| Agua de procesos | Origen: Río | Natural |
| Residuos sólidos | Destino: Procesamiento de residuos | Tecnósfera |
| Gases de incineración de residuos sólidos | Destino: Emisión a la atmósfera | Natural |

El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que existe los nuevos datos y el mayor conocimiento obtenido durante el desarrollo del trabajo permiten redefinir con mayor precisión las fases del ciclo o los flujos materiales y energéticos.

El procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventario incluye las siguientes etapas:

- Construcción del diagrama de flujo
- Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos)
- Definir los límites del sistema
- Recolección de los datos y cálculos de balances
- Redefinición de los objetivos y alcances

Una vez construido el diagrama de flujo, el sistema se subdivide en subsistemas y estos a su vez en procesos unitarios, para facilitar los cálculos de balance. Los balances de materia y energía se deben ordenar en forma sistemática, especificando las entradas y salidas, y sus destinos/orígenes, tal como se muestra en la Tabla 10.2.

**TABLA 10.2: BALANCE DE MATERIALES Y ENERGIA EN ANALISIS DE INVENTARIO**

| **ENTRADAS** | | |
|---|---|---|
| | **Desde la Naturaleza** | **Desde la Tecnósfera** |
| Materias primas | | |
| Insumos | | |
| Agua | | |
| Combustibles | | |
| Electricidad | | |
| **SALIDAS** | | |
| | **Hacia la Naturaleza** | **Hacia la Tecnósfera** |
| Productos | | |
| Residuos a tratamiento | | |
| Emisiones líquidas | | |
| Emisiones gaseosas | | |
| Emisiones sólidas | | |

Generalmente, se especifica las unidades de medida (ej., toneladas, kJ), los niveles de incertidumbre de los datos y las fuentes. En el caso de los flujos energéticos, se debe identificar las cantidades de energía térmica y de combustible utilizado, y el consumo eléctrico. Algunos valores típicos de emisiones asociadas al consumo de gas natural y petróleo diesel se presentan en las Tablas 10.3, 10.4 y 10.5.

Es importante señalar que el consumo de combustible en el transporte depende del medio utilizado, del tipo de combustible, de la carga y del recorrido. Por ejemplo, para transporte mediante camiones en base a diesel, se considera un consumo

específico en el rango 0,8-2,2 (MJ /km /ton), mientras que el transporte por ferrocarril eléctrico presenta un consumo de 0,1-0,3 (MJ /km /ton).

**TABLA 10.3: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE GAS NATURAL**

| **EMISIONES AL AIRE** | **(kg/ ton gas natural)** |
|---|---|
| Material particulado | 0,018 |
| $CO_2$ | 2.364 |
| CO | 0,58 |
| Hidrocarburos volátiles | 28,9 |
| $NO_X$ | 4,3 |
| $SO_2$ | 2,0 |
| $N_2O$ | 3,1 |
| **EMISIONES AL AGUA** | **(kg/ ton gas natural)** |
| Sólidos disueltos | 0,16 |
| Aceite | 0,04 |
| **EMISIONES AL SUELO** | **(kg/ ton gas natural)** |
| Residuos sólidos | 3,5 |
| **OTROS DATOS DE INTERES** | |
| Poder calorífico ($MJ/m^3$) | 36,6 |
| Densidad ($kg/m^3$) | 0,795 |

**TABLA 10.4: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE DIESEL**

| **EMISIONES AL AIRE** | **(kg/ ton diesel)** |
|---|---|
| Material particulado | 4,2 |
| $CO_2$ | 3.341 |
| CO | 20,3 |
| Hidrocarburos volátiles | 16,8 |
| $NO_X$ | 55,4 |
| $SO_2$ | 7,9 |
| $N_2O$ | 0,05 |
| Aldehidos y otros orgánicos volátiles | 0,09 |
| Amoníaco | 0,02 |
| **EMISIONES AL AGUA** | **(kg/ ton diesel)** |
| Sólidos disueltos | 12,7 |
| Aceites | 0,2 |
| Sólidos suspendidos | 0,006 |
| DBO | 0,006 |
| DQO | 0,05 |
| N total | 0,008 |
| **EMISIONES AL SUELO** | **(kg/ ton diesel)** |
| Residuos sólidos | 1,6 |
| **OTROS DATOS DE INTERES** | |
| Poder calorífico (MJ/kg) | 42,5 |
| Densidad ($kg/m^3$) | 840 |

**TABLA 10.5 : DATOS PARA EL ANALISIS DE INVENTARIO ASOCIADO AL TRANSPORTE MEDIANTE CAMIONES**

| | **Larga distancia (20-40 ton)** | **Transporte local (7-14 ton)** | **Asociadas a la producción de combustible** |
|---|---|---|---|
| Consumo de combustible (kg diesel/ km/ ton carga) | 0,02 | 0,05 | 2,81 (MJ/kg diesel) |
| **Emisiones** | (g / km /ton carga) | (g / km /ton carga) | (g/kg diesel) |
| Material particulado | 0,09 | 0,22 | 0,02 |
| $CO_2$ | 66 | 161 | 170 |
| CO | 0,31 | 0,75 | 0,004 |
| $NO_X$ | 0,81 | 1,98 | 0,17 |
| $SO_2$ | 0,085 | 0,21 | 0,60 |
| Hidrocarburos volátiles | 0,08 | 0,20 | 0,34 |

A pesar de que la definición de los límites del sistema es una decisión que se toma al inicio del ACV, es esencial precisar tal definición en el análisis de inventario. Los límites pueden ser fijados de acuerdo a criterios de tipo geográfico. Ello es importante, en la medida que al extender los límites geográficos se pierde precisión y se incrementa la incertidumbre de los resultados. En muchos ACV se prefiere fijar los límites en áreas donde se conozca la naturaleza de las actividades incluidas en el estudio; por ejemplo, considerar solamente aquellas que se realizan dentro del país. La selección de tales fronteras de estudio puede afectar significativamente los resultados del ACV. Por ejemplo, como ya se mencionó, pueden existir grandes diferencias en los consumos energéticos y emisiones asociadas a sistemas de transporte alternativos, o a diversos sistemas de generación de energía eléctrica (ej: termoeléctrica, hidroeléctrica, nuclear). Al respecto, se recomienda separar los resultados relativos a consumo eléctrico y explicitar las fuentes utilizadas.

Junto a los límites geográficos, es importante definir los límites temporales. Por ejemplo, en el caso de los residuos depositados en vertederos, las emisiones gaseosas derivadas de la descomposición de los residuos dependen de la escala de tiempo considerada, ya que los materiales poseen diferente estabilidad frente a la acción microbiana u otros agentes degradativos. Estos aspectos metodológicos aún no han sido resueltos y se encuentran en plena evolución.

Finalmente, se debe mencionar que existe controversia respecto a la inclusión de las emisiones y los requerimientos materiales y energéticos, asociados a la construcción de la infraestructura productiva y a la fabricación de los equipos utilizados en los procesos. En general, tales aspectos ambientales se excluyen de los ACV de productos elaborados, a menos que se desee comparar alternativas que presenten grandes diferencias en la intensidad de recursos infraestructurales y de equipamiento.

**Asignación de Cargas Ambientales**

En el caso de sistemas que desarrollan más de una función o que fabrican más de un producto, se debe distribuir los aspectos ambientales entre los productos que genera. La asignación de las cargas ambientales a diferentes productos es necesaria en los siguientes casos:

- Procesos con salidas múltiples, donde se generan diferentes productos, algunos de los cuales cruzan los límites del sistema.
- Procesos con entradas múltiples, donde es difícil establecer relaciones de causalidad entre entradas y emisiones.
- Procesos con reciclo de lazo abierto, donde los residuos que salen de un sistema son utilizados como materias primas para otro sistema, fuera de los límites del sistema en estudio.

Tomemos como ejemplo, una refinería de petróleo que produce gasolinas de diferentes tipos, petróleo combustible, diesel, gas licuado, etileno, propileno, etc., a partir de petróleo crudo ¿Cuál de estos productos es el causante de las emisiones generadas durante el proceso (ej. $SO_2$, $CO_2$)? En este caso, las cargas ambientales deben distribuirse entre los productos de acuerdo a criterios de asignación claramente especificados.

Cuando no es posible establecer una relación de causalidad, entre el producto y las cargas ambientales, se debe recurrir a métodos de asignación basados en valor económico, cantidad física (ej. masa, concentración) o una combinación de ambos. Por ejemplo, las cargas ambientales derivadas del proceso de refinación de petróleo se pueden distribuir proporcionalmente a la masa de productos generados, o proporcionalmente al valor comercial de cada producto.

## 10.5) EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA

Una vez completada la fase de inventario, es necesario evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste. El inventario puede constar de cientos de datos de consumos y emisiones para un gran número de compuestos, lo que es muy difícil de interpretar. En la práctica del ACV, se habla de **impactos ambientales potenciales**, ya que las actividades o subsistemas del sistema en estudio están ubicadas en diferentes lugares y se pueden llevar a cabo en distintas épocas. En muchos casos, no se trata de sistemas localizados en una ubicación espacial específica, ni de consumos y emisiones que se efectúa en el mismo instante de tiempo. Por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de los impactos esperados en cada subsistema. Ello es más crítico en el caso de impactos muy locales o de ámbito temporal reducido. Sin embargo, en el caso de impactos globales o de efectos prolongados (ej. calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico), es posible sumar las contribuciones de cada fase del ciclo de vida.

La evaluación de impacto ambiental en el contexto de un ACV aún es materia de debate. Sin embargo, existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV, a saber: Clasificación, Caracterización y Valoración.

### 10.5.1) Clasificación

En esta fase las cargas ambientales se clasifican de acuerdo a diferentes categorías de impacto, según el tipo de efecto ambiental esperado. Las categorías de impacto se agrupan de acuerdo a 3 áreas de protección ambiental, según la proposición de SETAC (adoptada por la mayoría de las metodologías de ACV en uso actual):

- Recursos Naturales
- Salud humana
- Salud ecológica

La Tabla 10.6 muestra una lista de categorías de impacto, utilizadas en la fase de clasificación de un ACV, asociadas a las entradas y salidas de materiales y energía.

**TABLA 10.6 CATEGORIAS DE IMPACTO PARA EL ACV**

| Categorías de Impacto | Relacionada con: | Alcance Espacial | Unidad de Medida |
|---|---|---|---|
| 1. Recursos Abióticos | Entradas | Global, Local | ¿? |
| 2. Recursos Bióticos | Entradas | Global, Local | ¿? |
| 3. Suelo | Entradas | Local | ¿? |
| 4. Salud humana: Impactos toxicológicos | Salidas | Global, Local | ¿? |
| 5. Salud humana: Impactos no toxicológicos | Salidas | Global, Local | ¿? |
| 6. Impactos ecotoxicológicos | Salidas | Global, Local | ¿? |
| 7. Alteración de hábitats /biodiversidad | Salidas | Regional, Local | ¿? |
| 8. Calentamiento Global | Salidas | Global | Kg $CO_2$ |
| 9. Agotamiento de la capa de $O_3$ | Salidas | Global | Kg CFC 11 |
| 10. Acidificación | Salidas | Regional, Local | Kg $SO_2$ |
| 11. Eutrofización | Salidas | Regional, Local | Kg $PO_4^{-3}$ |
| 12. Formación de foto-oxidantes | Salidas | Regional, Local | Kg eteno |

En el caso de los recursos abióticos, se puede subdividir entre recursos materiales y energéticos, o entre recursos renovables y no renovables, explicitando los recursos hídricos. Los impactos no toxicológicos sobre la salud humana se refieren a impactos físicos, alteraciones psicológicas, efectos por radiación, ruidos, malos olores, infecciones, u otros.

### 10.5.2) Caracterización

En esta fase, se aplica modelos a cada categoría de impacto para obtener indicadores ambientales. Por ejemplo, en la categoría de impacto acidificación, se incluye las emisiones de gases que pueden tener efecto sobre el pH del agua o del suelo, tales como $SO_2$, $NO_X$, HCl, HF y $NH_3$. Cada uno de estos contaminantes posee una capacidad diferente para alterar el pH en un sistema acuático/terrestre. Por lo tanto, se utiliza factores de ponderación, que permiten expresar el potencial acidificante sobre una base común. Dichos factores son estimados en base a las características químicas de los compuestos. Factores similares pueden ser derivados para otras categorías de impacto, tal como se describe más adelante.

Estos factores de ponderación permiten calcular la suma de todos los contaminantes que están dentro de una misma categoría de impacto, obteniendo así un valor total expresado en base a un solo compuesto equivalente. Por ejemplo, la contribución total al impacto acidificación, expresada en términos de kg de $SO_2$ equivalentes, se calcula como:

$$\text{Acidificación (kg } SO_2) = m_{SO2} + f_{NOx}\, m_{NOx} + f_{HCl}\, m_{HCl} + f_{NH3}\, m_{NH3}$$

donde $m_K$ representa la masa del contaminante k y $f_K$ es el factor de ponderación correspondiente.

Esta forma de cálculo para estimar la contribución total de las entradas y salidas, a una categoría de impacto dada, se puede generalizar de la siguiente forma:

$$C_M = \Sigma\ C_{MK} = \Sigma\, M_K\, f_{MK}$$

donde $C_M$ es la contribución total a la categoría de impacto M de todas la entradas y salidas relevantes; $M_K$ es la masa o energía emitida o consumida por la entrada o salida K, y $f_{MK}$ es el factor de ponderación respectivo.

Los diferentes métodos propuestos en la literatura especializada varían en la forma como se calculan los factores de ponderación. A continuación, se revisa brevemente los diferentes enfoques utilizados para llevar a cabo la selección de los factores de ponderación para caracterizar los impactos ambientales en cada categoría.

#### a) Categoría de Impacto: Recursos Materiales y Energéticos:

Generalmente, el agotamiento y uso de los recursos naturales y energéticos se trata en forma separada, especificando la naturaleza renovable o no renovable de tales recursos:

- Recursos materiales renovables
- Recursos materiales no renovables
- Recursos energéticos renovables
- Recursos energéticos no renovables

En cada caso, se puede incluir una gran variedad de materiales y formas energéticas, por lo que se deben agregar utilizando factores de ponderación que reflejen la importancia relativa de cada uno de ellos respecto a su impacto sobre el inventario de recursos naturales.

Las guías nórdicas (Nordic Council, 1995) revisan una serie de enfoques utilizados para llevar a cabo la agregación.

- ***Agregación en base a recursos totales.***

Este método consiste en asignar un factor de ponderación unitario a cada uno de los materiales y formas de energía considerados, de modo que se obtiene la masa (kg) y la energía totales (kJ). A pesar de su simpleza, permite identificar aquellas actividades con mayor importancia en cuanto al uso intensivo de recursos. La debilidad de este enfoque es que no toma en cuenta la fragilidad o estado de escasez de cada recurso.

- ***Agregación, considerando las reservas globales:***

Aquí se calcula el factor de ponderación en base a las reservas físicas existentes en la actualidad, lo que permite considerar la "escasez" del recurso. Existen 4 variantes para el cálculo de los factores de ponderación considerando las reservas:

Considerando sólo las reservas: $f_{MK} = 1/ R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo: $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo(modificado): $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}^2$

Considerando los costos de reposición del recurso: $f_{MK} = V_{MK}$

Donde $R_{MK}$ son las reservas mundiales explotables del recurso K, $U_{MK}$ corresponde al consumo anual mundial de dicho recurso y $V_{MK}$ es una función del valor monetario (expresado en UCA, "unidades de carga ambiental") requerido para recuperar el recurso utilizado.

Algunos valores sugeridos por el Nordic Council of Ministers (NCM) se muestran en la Tabla 10.7 a modo de ilustración.

**TABLA 10.7: DATOS PARA EL CALCULO DE FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS NATURALES**

| | $R_{MK}$ | $R_{MK}/U_{MK}$ (años) | $V_{MK}$ (UCA/kg) |
|---|---|---|---|
| Petróleo | $1{,}24\ 10^{14}$ kg | 40 | 0,4 |
| Gas Natural | $1{,}09\ 10^{14}$ $m^3$ | 60 | 0,4 |
| Cobre | $3{,}50\ 10^{11}$ kg | 36 | 30,2 |
| Zinc | $1{,}47\ 10^{11}$ kg | 21 | 21,3 |
| Estaño | $4{,}33\ 10^{9}$ kg | 28 | 1.170,0 |

Fuente: NCM (1995)

**b) Categoría de impacto: Salud Humana – Impacto Toxicológico:**

Existen diversos métodos para estimar los factores de ponderación correspondientes a esta categoría de impacto.

- ***Enfoque utilizando un concepto de Volumen Crítico:***

El factor de ponderación se calcula como: $f_K = 1/Q_K$

Donde $Q_K$ es un estándar de calidad ambiental correspondiente al contaminante K para el medio receptor aire, agua o suelo. En el caso del agua, se utiliza el estándar de calidad de agua potable, mientras que en el caso del aire se usan los niveles máximos de inmisión o los límites de exposición ocupacional.

Normalmente, $Q_K$ posee unidades de concentración másica (ej. $g/m^3$), resultando un factor de ponderación con unidades ($m^3/g$); por lo tanto, al multiplicar por la cantidad total de contaminante (g), se obtiene un resultado con unidades de volumen ($m^3$). Por esa razón, se denomina método de volumen crítico.

**TABLA 10.8: ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AIRE PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO**

| Contaminantes atmosféricos | $Q_K$ ($g/m^3$) |
|---|---|
| Material Particulado | $7{,}0\ 10^{-5}$ |
| CO | $8{,}0\ 10^{-3}$ |
| $NO_x$ | $3{,}0\ 10^{-5}$ |
| $NH_3$ | $5{,}0\ 10^{-5}$ |
| HCl | $1{,}0\ 10^{-4}$ |
| $SO_2$ | $3{,}0\ 10^{-5}$ |
| $H_2S$ | $1{,}5\ 10^{-4}$ |
| Hidrocarburos | $1{,}5\ 10^{-2}$ |

Fuente: NCM (1995)

**TABLA 10.9: ESTANDARES DE CALIDAD DE AGUA PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO**

| Contaminantes | $Q_K$ ($g/m^3$) |
|---|---|
| Sólidos suspendidos | $2{,}0\ 10^{-2}$ |
| $DBO_5$ | $2{,}0\ 10^{-2}$ |
| $NH_3$ | $1{,}0\ 10^{-3}$ |
| Grasas y Aceites | $2{,}0\ 10^{-2}$ |
| Organoclorados lipofílicos | $1{,}0\ 10^{-4}$ |
| Compuestos Fenólicos | $5{,}0\ 10^{-5}$ |
| Hidrocarburos Totales | $1{,}0\ 10^{-2}$ |

Fuente: NCM (1995)

- ***Enfoque utilizando factores toxicológicos:***

***Método CML***: El Centro de Ciencias Ambientales de Leiden–Holanda (CML) ha desarrollado un conjunto de metodologías para apoyar el ACV. En relación al cálculo de los factores de ponderación para impactos toxicológicos sobre la salud humana, CML sugiere un método basado en criterios toxicológicos (ie. factores de potencia para compuestos cancerígenos, dosis diarias límite). Los factores propuestos, expresados en unidades (kg peso/kg contaminante), cubren un amplio rango de compuestos. La contribución total del contaminante a los impactos toxicológicos humanos, $C_K$ , se obtiene sumando las contribuciones de dichos efectos en el agua (W), aire (A) y suelo (S):

$$C_K = M_{KA}\, f_{KAire} + M_{KW}\, f_{KAgua} + M_{KS}\, f_{KSuelo}$$

Donde los factores $f_K$ son los factores de ponderación, para cada compartimento ambiental (ver Tabla 10.10). Al calcular la contribución total de los contaminantes al efecto toxicológico, se obtiene valores con unidades de (kg peso humano). Esto se interpreta como los kilos de peso de un individuo afectados por el contaminante.

**TABLA 10.10: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO CML)** Fuente: NCM (1995)

| | $f_{KAire}$ | $f_{Kagua}$ | $f_{Ksuelo}$ |
|---|---|---|---|
| | **kg peso/kg contaminante** | | |
| As | $4{,}7\ 10^{3}$ | 1,4 | $4{,}3\ 10^{-2}$ |
| Cd | $5{,}8\ 10^{2}$ | 2,9 | $1{,}9\ 10^{-2}$ |
| Hg | $1{,}2\ 10^{2}$ | 4,7 | $1{,}5\ 10^{-1}$ |
| Ni | $4{,}7\ 10^{2}$ | $5{,}7\ 10^{-2}$ | $1{,}4\ 10^{-2}$ |
| $NH^{+}_{4}$ | $2{,}0\ 10^{-2}$ | $1{,}7\ 10^{-3}$ | - |
| $NO^{-}_{3}$ | $9{,}1\ 10^{-3}$ | $7{,}8\ 10^{-4}$ | - |
| NOx | $7{,}8\ 10^{-1}$ | - | - |
| Fenol | $5{,}5\ 10^{-1}$ | $4{,}8\ 10^{-2}$ | $6{,}2\ 10^{-1}$ |
| Clorobencenos | $1{,}9\ 10^{-1}$ | 5,7 | - |
| Atracina | 6,7 | $5{,}7\ 10^{-1}$ | 3,2 |

***Método Tellus:*** El Tellus Institute desarrolló un procedimiento basaso en el factor de potencia cancerígena (en kg equivalente a isoforeno) y la dosis de referencia oral para contaminantes no-cancerígenos (en kg equivalente a xileno). El método Tellus permite combinar los efectos cancerígenos y no-cancerígenos en un solo factor de ponderación combinado, en base a una equivalencia de 3 unidades de xileno por cada unidad de isoforeno (ver Tabla 10.11).

**TABLA 10.11: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO TELLUS)**

| | $f_{CANCERIGENO}$ | $f_{NO\ CANCERIGENO}$ | $f_{COMBINADO}$ |
|---|---|---|---|
| | **kg isoforeno (equivalente)** | **kg xileno (equivalente)** | |
| $NH_3$ | - | 2,0 | 2,0 |
| As | $1,3\ 10^4$ | $2,0\ 10^3$ | $2,0\ 10^4$ |
| Benceno | 7,0 | - | 22,0 |
| Cd | $1,6\ 10^3$ | $4,0\ 10^3$ | $4,4\ 10^3$ |
| Ni | $2,2\ 10^2$ | $1,0\ 10^2$ | $3,7\ 10^2$ |
| Pentaclorofenol | - | 67,0 | 67,0 |
| Fenol | - | 3,0 | 3,0 |
| 2,3,7,8 TCDD | $3,9\ 10^7$ | - | $1,2\ 10^8$ |
| Tolueno | - | 7,0 | 7,0 |

Fuente: NCM (1995)

**c) Categoría de impacto: Calentamiento Global.**

Los factores de ponderación utilizados tienen base científica y están ampliamente aceptados. Se expresan en términos de kg de $CO_2$ equivalente:

**TABLA 10.12: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL**

| **Compuesto** | **Factor de Ponderación (kg $CO_2$ equiv./kg)** |
|---|---|
| $CO_2$ | 1 |
| $CH_4$ | 62 |
| $N_2O$ | 290 |
| CFC-11 | 5.000 |

Fuente: NCM (1995)

**d) Categoría de impacto: Agotamiento de la capa de ozono.**

Al igual que en el caso del calentamiento global, estos factores están avalados por una base científica. Se expresan en base a equivalente de CFC-11, como se muestra en la Tabla 10.13.

**TABLA 10.13: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS POR AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO**

| Compuesto | Factor de Ponderación (kg CFC11 equiv/kg) |
|---|---|
| CFC 11 | 1 |
| CFC 114 | 0,80 |
| HCFC 22 | 0,055 |
| HCHC 141 | 0,11 |

Fuente: NCM (1995)

**e) Categoría de impacto: Acidificación.**

Tal como se mencionó anteriormente, los factores de ponderación permiten expresar el potencial de acidificación en términos de equivalente a kg $SO_2$ :

**TABLA 10.14: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS DE ACIDIFICACIÓN**

| Compuesto Acidificante | Factor de Ponderación (kg $SO_2$ equiv./kg) |
|---|---|
| $SO_2$ | 1 |
| $NO_X$ | 0,70 |
| HCl | 0,88 |
| $NH_3$ | 1,88 |

Fuente: NCM (1995)

**f) Categoría de impacto: Eutrofización.**

Aquí se incluye, además, el efecto de demanda de oxígeno debido a emisiones de compuestos orgánicos biodegradables. Se incluyen las emisiones de $DBO_5$, N total al agua, P total al agua y N total al aire:

**TABLA 10.15: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE EUTROFIZACION**

| Compuesto | Factor de Ponderación (kg $PO_4^{-3}$ equiv./kg) |
|---|---|
| $PO_4^{-3}$ | 1 |
| N total al agua | 0,42 |
| N total al aire | 0,13 |
| DQO | 0,022 |

Fuente: NCM (1995)

**g) Categoría de impacto: Formación de foto-oxidantes.**

En este caso, se considera sólo el potencial para formar ozono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. En la Tabla 10.16 se presenta algunos valores típicos para caracterizar el potencial de formación de fotooxidantes:

**TABLA 10.16: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL FORMACION DE FOTOOXIDANTES**

| Compuesto | Factor de Ponderación (kg eteno equiv./kg) |
|---|---|
| Eteno | 1 |
| Alcanos (promedio) | 0,40 |
| Cetonas (promedio) | 0,33 |
| Esteres (promedio) | 0,22 |
| Olefinas (promedio) | 0,91 |
| Hidrocarbono (promedio) | 0,337 |
| Aromáticos (promedio) | 0,761 |

Fuente: NCM (1995)

## 10.6) VALORACIÓN

Aquí se evalúa cuantitativamente o cualitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto. Si la valoración es cuantitativa, se utiliza factores de valoración en base a criterios socioeconómicos. Ello permite obtener un perfil ambiental ponderado que facilita el cálculo de un índice ambiental global para el sistema en estudio. Los factores de ponderación para las distintas categorías pueden basarse en valores monetarios (ej. costos de los daños ocasionados al medio, costos para la prevención de las emisiones). En el seno de ISO se está evaluando si es pertinente incluir la valoración en la evaluación de los impactos en el ACV, dada la falta de rigurosidad científica de esta fase.

## 10.7) UN EJEMPLO: ANALISIS DE INVENTARIO DE LA PRODUCCION DE CELULOSA KRAFT BLANCA

La producción de celulosa kraft blanca constituye uno de los principales rubros de la industria forestal chilena. Esta actividad implica una intensiva utilización de recursos naturales (ej.: suelo, agua), genera importantes cantidades de residuos, y tiene gran impacto en el ciclo del carbono. A continuación se presentan los resultados del análisis de inventario de esta actividad, recientemente publicado por González (1999)[1]. El objetivo de este análisis de inventario es entregar información sobre los flujos de materiales y energía a través de los principales componentes del ciclo de vida. En este caso, se evalúa comparativamente el uso de pino y eucalipto como materia prima, ya que ambas especies constituyen la única fuente de fibra celulósica en Chile. El estudio considera la utilización de la tecnología de mayor potencial de implementación en la actualidad:

- Cocción extendida
- Predeslignificación con oxígeno
- Blanqueo libre de cloro elemental (ECF).

[1] González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile. (1999).

Para mayores detalles de la descripción del proceso de producción de celulosa kraft blanca, ver el Capítulo 4.

El ciclo de vida de la celulosa comienza en el recurso forestal, donde los compuestos lignocelulósicos son producidos a partir de la fotosíntesis. Este subsistema forestal provee la materia prima para el procesamiento industrial, donde se genera la pulpa celulósica. En el caso chileno, la celulosa se comercializa principalmente en el extranjero y se destina a diferentes usos como fuente de fibra papelera, material adsorbente u otros. Finalmente, los residuos generados por el consumo final se pueden reciclar, incinerar o disponer en vertederos. En este estudio, los límites del sistema se fijan en aquellas actividades que se realizan en Chile, es decir, la generación de materia prima forestal y la producción de pulpa blanca. Los diferentes componentes de los subsistemas forestal e industrial se ilustran en la Figura 10.4. Los otros componentes del ciclo de vida (ej. producción de reactivos, producción de papel, disposición final de residuos) son evaluados en forma general, con vistas a analizar los consumos energéticos y las emisiones de $CO_2$.

Las Tablas 10.17 y 10.18 resumen los principales resultados del análisis de inventario, correspondientes a los subsistemas forestal e industrial, respectivamente. Estos valores corresponden a las cargas ambientales asociadas al todo el Ciclo de Vida de la producción de pulpa química kraft blanca. Ellos están referidos a una base de cálculo de 365.000 (ton celulosa/año), siendo esta la producción típica de las plantas nacionales actuales. Cabe señalar que más del 50% de la madera de pino cosechada se destina directamente como materia prima para pulpa, mientras que el resto se utiliza en aserrío donde un 30% se puede recuperar como residuo pulpable. Por su parte, casi la totalidad de la madera de eucalipto se destina a producción de pulpa.

En la Tabla 10.17 se observa que las plantaciones de eucalipto demandan sólo un tercio de la extensión de terreno requerida por las plantaciones de pino, para sostener una producción de pulpa similar. Ello se debe al menor ciclo de rotación del eucalipto (10 años, comparados con 20 años para el pino), y a su mayor densidad y contenido de celulosa. Esto último conlleva a que los requerimientos de área a plantar anualmente para el eucalipto son inferiores al 60% de lo necesario para el pino. Por esta misma razón, los consumos de pesticidas y nutrientes usados en establecimiento de una plantación con eucalipto son proporcionalmente menores que para el caso del pino.

El mayor contenido de lignina presentado por el pino resulta en un menor rendimiento de proceso, por lo que se requiere 15% menos madera de eucalipto que de pino, para una misma cantidad de pulpa química blanca. En consecuencia, el procesamiento del pino consume mayores cantidades de reactivos de proceso, principalmente aquellos asociados al blanqueo (ej.: cloro, clorato, metanol, ácido sulfúrico), lo que se traduce en mayores emisiones de contaminantes organoclorados.

**TABLA 10.17 ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA SILVÍCOLA**
**Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)**

| SUBSISTEMA SILVICOLA | EUCALIPTO (toneladas/año) | PINO (toneladas/año) |
|---|---|---|
| **Vivero** | | |
| ***Principales entradas:*** | | |
| Requerimientos de suelo (ha) | 2,6 | 6,7 |
| Agua para regadío | 1.300 | 2.300 |
| Fijación Neta de $CO_2$ | 14.300 | 24.400 |
| Pesticidas (como agente activo) | 0.04 | 0.12 |
| Nutrientes (como NPK) | 7,8 | 13,3 |
| Requerimientos de Energía (MJ/año) | $0,1\ 10^6$ | $0,3\ 10^6$ |
| ***Principales Salidas:*** | | |
| Plantas (plantas/año) | $7,8\ 10^6$ | $13,3\ 10^6$ |
| Emisión $CO_2$ (combustible fósil) | 6,4 | 19 |
| Residuos Sólidos | 0,1 | 0,22 |
| **Establecimiento de la Plantación** | | |
| ***Principales entradas:*** | | |
| Uso de Suelo para Rotación Sustentable (ha) | 49.000 | 166.000 |
| Area a plantar (ha / año) | 4.900 | 8.300 |
| Fijación Neta de $CO_2$ | 1.530.000 | 3.086.900 |
| Pesticidas (como agente activo) | 70 | 170 |
| Nutrientes (como NPK) | 190 | 330 |
| Requerimientos de Energía (MJ/año) | $1,8\ 10^6$ | $3,1\ 10^6$ |
| ***Principales salidas:*** | | |
| Emisión $CO_2$ (combustible fósil) | 115 | 195 |
| Residuos Sólidos | 3,4 | 8,3 |
| **Poda, Raleo y Cosecha** | | |
| ***Principales entradas***: | | |
| Requerimientos de Energía (MJ/año) | $45\ 10^6$ | $102\ 10^6$ |
| Area a cosechar (ha / año) | 4.900 | 8.300 |
| ***Principales Salidas***: | | |
| Madera pulpable (ton ssc/año) | 735.000 | 627.500 |
| Madera a aserradero (ton ssc/año) | 0 | 812.240 |
| Emisiones $CO_2$ (combustible fósil) | 2.700 | 6.540 |
| Emisiones de$CO_2$ (renovable) | 26.800 | 383.000 |
| Emisiones de $NO_X$ | 16 | 39 |

Fuente: González (1999)

**TABLA 10.18. ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA INDUSTRIAL**
**Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)**

| SUBSISTEMA PROCESAMIENTO INDUSTRIAL | EUCALIPTO | PINO |
|---|---|---|
| | Tonelada/año | Tonelada/año |
| **Principales Entradas** | | |
| Requerimientos de Terreno (hectáreas) | 50 | 50 |
| Requerimientos de Madera de pulpable (ton) | 735.000 | 871.000 |
| Requerimientos de agua de Proceso | $14\ 10^6$ | $16\ 10^6$ |
| Requerimientos de Energía Neta (MJ/año): | | |
| Industria de Proceso | $670\ 10^6$ | $910\ 10^6$ |
| Transporte de Materias Primas y Productos | $156\ 10^6$ | $309\ 10^6$ |
| Producción de Reactivos Químicos | $95\ 10^6$ | $138\ 10^6$ |
| Sulfato de Sodio | 1.800 | 1.800 |
| Hidróxido Sodio | 8.000 | 9.900 |
| Carbonato de Calcio | 8.000 | 9.900 |
| Oxido de Calcio | 730 | 730 |
| Cloro | 0 | 0 |
| Clorato de Sodio | 3.520 | 6.700 |
| Metanol | 1.070 | 2.050 |
| Acido Sulfúrico | 3.600 | 6.900 |
| Oxígeno | 7.420 | 7.600 |
| Peróxido de Hidrógeno | 730 | 730 |
| **Principales Salidas** | | |
| Pulpa | 365.000 | 365.000 |
| Madera Aserrada | 0 | 406.000 |
| Venta Energía Eléctrica (MJ/año) | $432\ 10^6$ | $972\ 10^6$ |
| Descarga de Residuos Líquidos | $13\ 10^6$ | $15\ 10^6$ |
| DQO en RIL | 3.080 | 7.595 |
| AOX en RIL | 81 | 144 |
| Emisiones de $CO_2$ (fósil) | 68.830 | 100.120 |
| Emisiones de $CO_2$ (renovable) | 813.100 | 1.490.000 |
| Emisiones de $SO_2$ | 790 | 940 |
| Emisiones de Material Particulado | 440 | 550 |
| Emisiones de TRS | 170 | 200 |
| Emisiones de $NO_x$ | 1.310 | 1.500 |
| Emisiones de HAP | 110 | 180 |
| Residuos Sólidos | 11.000 | 12.400 |

Fuente: González (1999)

Por su parte, los requerimientos de agua del procesamiento industrial son responsables de la casi totalidad del consumo en todo el ciclo de vida. Se debe señalar que el agua requerida para mantener el crecimiento de los árboles se obtiene en su totalidad de los procesos hidrológicos naturales (ej. lluvias, escorrentía); los valores mostrados en la Tablas 10.17 y 10.18 sólo incluyen el agua suministrada artificialmente. Por otro lado, las principales emisiones atmosféricas se generan en el subsistema industrial y corresponden a $SO_2$, NOx, TRS y compuestos orgánicos volátiles peligrosos (HAP).

La actividad forestal tiene una gran importancia en el ciclo del carbono ya que durante el crecimiento del árbol se fija el $CO_2$ atmosférico en la biomasa forestal, gracias al proceso de fotosíntesis. Por otra parte, durante las actividades de cosecha, procesamiento industrial, y transporte se genera $CO_2$ debido principalmente al consumo de combustibles fósiles y derivados de la madera. La Tabla 10.19 presenta el balance de $CO_2$ asociado al sistema de estudio. En ella se puede observar que existe un excedente de fijación mayor para el pino que para el eucalipto. La mayor captación neta de $CO_2$ en el pino se debe a que se requiere una mayor cantidad de biomasa para elaborar los productos y, además, se genera una gran cantidad de producto aserrado que mantiene el carbono fijado. Estos excedentes representan una interesante contribución al ciclo global del carbono y son equivalentes al $CO_2$ emitido anualmente por un parque automotriz de 83.000 y 152.000 vehículos, para el caso del eucalipto y pino, respectivamente (lo cual es equivalente a la combustión de 214.000 y 400.000 toneladas de gasolina, respectivamente). Si se considera las emisiones generadas en la producción de papel (fuera del sistema en estudio), el excedente de $CO_2$ fijado se reduce en 28% y 16% para eucalipto y pino , respectivamente.

**TABLA 10.19. BALANCE $CO_2$, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO**

| Etapa del Ciclo | $CO_2$ (ton/año) | |
|---|---|---|
| | **Eucalipto** | **Pino** |
| Subsistema Silvícola | $-1{,}515\ 10^6$ | $-2{,}72\ 10^6$ |
| • Fijación | $-1{,}544\ 10^6$ | $-3{,}11\ 10^6$ |
| • Emisión | $+0{,}029\ 10^6$ | $+0{,}39\ 10^6$ |
| Transporte | $+0{,}009\ 10^6$ | $+0{,}019\ 10^6$ |
| Subsistema Industrial | $+0{,}872\ 10^6$ | $+1{,}568\ 10^6$ |
| Balance sin producción de papel | **$-0.633\ 10^6$** | **$-1{,}137\ 10^6$** |
| Producción de papel | $+0{,}18\ 10^6$ | $+0{,}18\ 10^6$ |
| Balance con producción de papel | **$-0{,}453\ 10^6$** | **$-0{,}957\ 10^6$** |

Fuente: González (1999)

Para efectos de completar el ciclo del carbono dentro del concepto “de la cuna a la tumba”, se considera las emisiones de $CO_2$ generadas por la incineración final de la totalidad de la pulpa celulósica. Estas emisiones corresponden a 0,54 ton $CO_2$/año, para ambas materias primas. Por lo tanto, el balance global de $CO_2$ para todo el ciclo es de +0,087 y –0,417 ton $CO_2$/año, para el eucalipto y pino respectivamente. Para el caso del eucalipto, el $CO_2$ emitido a lo largo de todo el ciclo de vida supera en

5,5% al $CO_2$ fijado en el subsistema silvícola. Por el contrario, el pino mantiene un excedente de fijación neto de $CO_2$ correspondiente a un 14% del $CO_2$ total emitido en el ciclo de vida, aún cuando se incinere el 100% del papel producido. Dicho excedente de fijación de $CO_2$ se reduciría a cero con la incineración de 0,21 $10^6$ (ton madera/año), es decir, un 52% de la madera aserrada producida en el subsistema industrial del pino.

La Tabla 10.20 presenta los consumos y generación de energía para todo el ciclo de vida de producción de pulpa. Es importante tener en cuenta que en el procesamiento industrial, una parte de la energía se obtiene de la combustión de los residuos combustibles y licor negro generados en el procesamiento de las materias prima. Además, se genera un excedente energético que es exportado como energía eléctrica.

**TABLA 10.20. BALANCE DE ENERGÍA, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO**

| Etapa del Ciclo | ENERGIA (MJ/año) | |
|---|---|---|
| | **Eucalipto** | **Pino** |
| Consumo subsistema silvícola | -46,9 $10^6$ | -105,4 $10^6$ |
| Consumo Transporte | -156 $10^6$ | -309 $10^6$ |
| Consumo en producción de celulosa | -670 $10^6$ | -910 $10^6$ |
| Consumo en producción de químicos | -95 $10^6$ | -138 $10^6$ |
| Total Consumo | **-967,9 $10^6$** | **-1462,4 $10^6$** |
| Generación excedente en producción de celulosa | +432 $10^6$ | +972 $10^6$ |
| Balance neto | **-535 $10^6$** | **-490 $10^6$** |

Fuente: González (1999)

Se observa que el procesamiento de pino requiere 30% más energía que el eucalipto. Por su parte, una planta de pulpa en base a pino puede generar el doble de energía eléctrica excedente que en el caso del eucalipto, debido a la mayor cantidad de residuos sólidos combustibles y al mayor contenido orgánico del licor negro generado por el procesamiento del pino. Sin embargo, el balance total de energía del sistema estudiado demuestra que existe un déficit energético a lo largo de todo ciclo de vida, equivalente a 1,47 y 1,34 GJ/ton de pulpa, para eucalipto y pino respectivamente.

A partir de este análisis de inventario se puede completar las siguientes fases del ACV. Este ejemplo permite visualizar la importancia de tipo de análisis ya que entrega información acerca de la relevancia ambiental de cada una de las actividades del ciclo de vida, facilitando la identificación de medidas de mejoramiento en las áreas de mayor impacto.

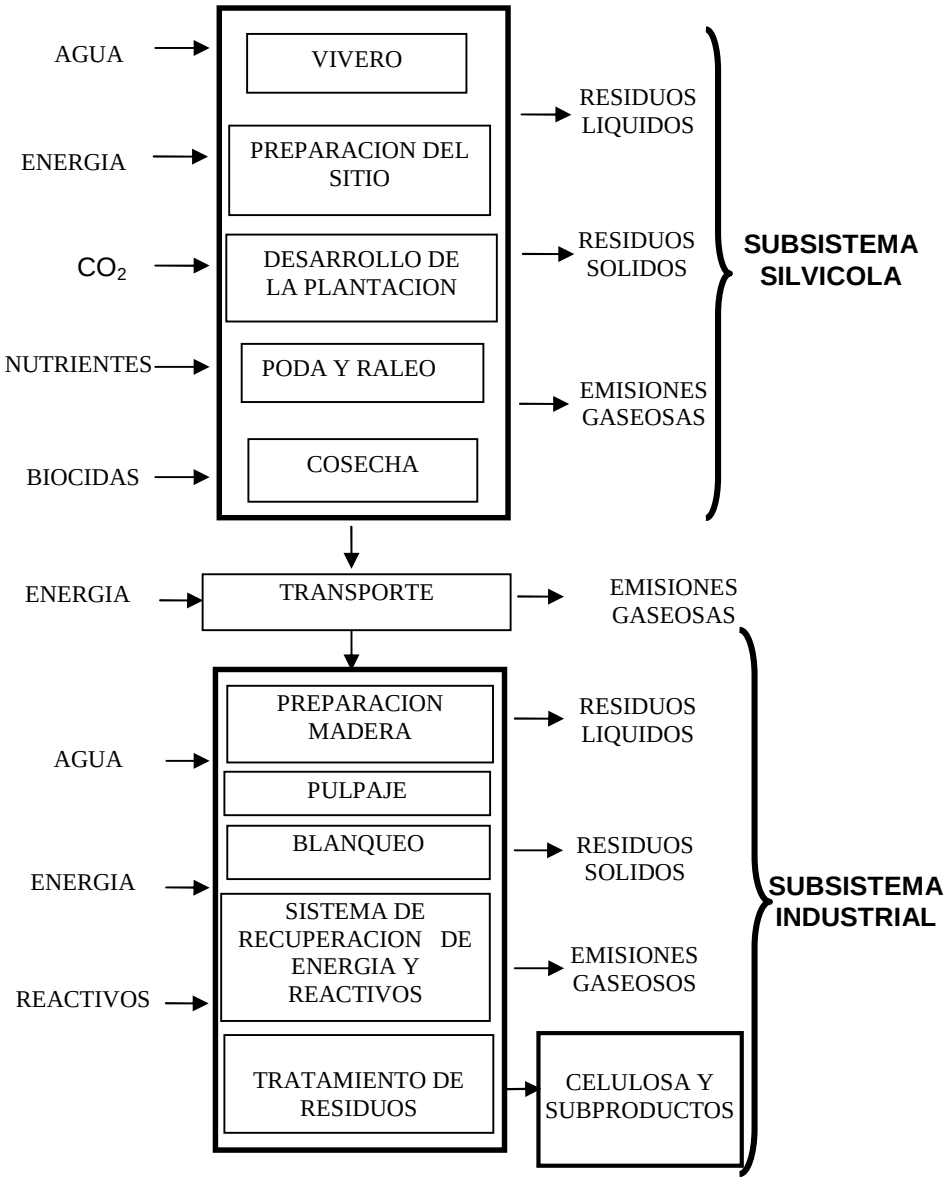



**FIGURA 10.4: PRODUCCION DE PULPA KRAFT BLANCA**

**BIBLIOGRAFIA**


Fullana P., Puig R. “Análisis del Ciclo de Vida”. Ed. Rubes. Barcelona (1997).

González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile (1999).

Heijungs R. *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, Centre of Environmental Science, Leiden (1992)

Henn C., Fava J, “LCA and Resource Management”, cap. 14 en “Environmental Strategies Handbook”, R.V. Kolluru, McGraw Hill NY (1994).

Nordic Council of Ministers, “Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment”, The Nordic Council, Stockholm (1995).

SETAC, “Guidelines for LCA: A Code of Practice”, Society for Environmental Toxicology and Chemistry, Bruselas, (1993).

# CAPÍTULO 11

# PRINCIPIOS DE ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS

## 11.1) INTRODUCCIÓN

***Una historia de la vida real...***

*"El Sr. Kulshresh miró el rostro plácido de su hijo mayor, quién dormía en su lecho junto a sus tres hermanos menores. Se sintió orgulloso y feliz al verlo allí, transformado en un joven candidato a la carrera de medicina, en la Universidad de Nueva Delhi. ¡Cómo han pasado los años, desde que él también era un estudiante, lleno de ilusiones y temores! La voz de su esposa lo sacó de sus reflexiones y recordó que mañana tendría que regresar muy temprano a su trabajo, en la capital. Recordó, también, que ya era tiempo de comprar los regalos de Navidad para los niños, y enviar las tarjetas a la larga lista de amigos y parientes. Sus piernas difícilmente podían sostenerlo, después de las agitadas horas de fútbol en las festividades del colegio local. Había sido un domingo especial, con toda la vecindad reunida en torno a comidas familiares, juegos infantiles y actividades deportivas. Una vez en su cama, apagó la luz, y se dejó llevar hacia su sueño. Lo último que escuchó fue el reloj del comedor marcando la medianoche y el sonido distante de una sirena... tal vez de la planta Union-Carbide ubicada a unas pocas cuadras de su hogar. A la mañana siguiente, todos los canales de televisión alrededor del mundo informaron que se había producido un accidente en una fábrica de un exótico lugar de la India. Una nube tóxica de 25 toneladas de gas isocianato de metilo, escapó de su lugar de almacenamiento, dispersándose en un entorno de 50 $km^2$. Las cifras preliminares estimaron alrededor de 2.500 muertos y más de 100.000 heridos. El Sr. Kulshresh, su esposa, sus cuatro hijos, sus vecinos y muchos otros habitantes de Bophal nunca despertaron de su sueño esa helada noche del 17 de diciembre de 1984, para saber lo que sucedió. Nunca podrán declarar a los periodistas o a los jueces su verdad..."*.

Esta corta y triste historia se ha repetido por muchas décadas, con distintos personajes, diferentes escenarios y argumentos. Al contarla en estas páginas, he querido rendir un pequeño homenaje a los 500 muertos de la inflamación de gasolina derramada por la ruptura de un poliducto en Cubatao (Brasil) en febrero de 1974; a los 28 muertos debido a la explosión de 80 toneladas de ciclohexano en Flixborough (Gran Bretaña) en junio de 1974; a los 215 muertos de la explosión de 45 $m^3$ de propileno en el Camping de Los Alfaques (España) en julio de 1978; a los 452 muertos, 100 desaparecidos y 4.200 heridos de la explosión de balones de LPG en San Juan de Ixhuatepec (México) en noviembre de 1984; a los 200 muertos y 1.500 heridos de la explosión de combustibles vertidos en la red de alcantarillado urbano en Guadalajara (México) en abril de 1992; a los incontables muertos y heridos del accidente nuclear de Chernobyl... y a los miles y miles de seres humanos que cada año son víctimas de las consecuencias de emisiones tóxicas, de explosiones, de incendios, y de exposiciones a sustancias corrosivas o radioactivas en todo el mundo, la gran mayoría de los cuales ni siquiera aparecen

en los titulares de los noticieros. A este catálogo del horror, habría que agregar los costos económicos debido a las evacuaciones masivas, a la secuela de destrucción de infraestructura urbana e industrial y de daños al medio ambiente natural, derivados de accidentes industriales en todo el mundo, incluyendo aquellos ocurridos durante el transporte y el almacenamiento de productos y materias primas. Basta mencionar los serios impactos derivados de la contaminación del medio marino debido a los accidentes sufridos por los petroleros Amoco-Cádiz en 1978 y EXXON Valdez en 1989, que produjeron el derrame al mar de 220.000 y 40.000 toneladas de crudo, respectivamente, dejando centenares de kilómetros de costa contaminados, y una mortandad masiva de especies marinas. Muchos de estos daños representan pérdidas económicas directas, por costos asociados a las operaciones de limpieza y restitución del entorno, indemnizaciones, multas y otros cargos. Sólo en la explosión de Guadalajara, se estima un daño del orden de US$ 7.000 millones. Por ello no debería extrañar que, durante 1985, las industrias norteamericanas invirtieran cerca de US$ 8.000 millones en medidas para incrementar la seguridad de las instalaciones y proteger la integridad de sus trabajadores.

Es interesante constatar que algunos accidentes han motivado fuertes modificaciones legales, aún cuando no han tenido consecuencias en términos de vidas humanas. En Europa, la Planta de Icmesa en Seveso (Italia), protagonizó un serio accidente en julio de 1976, cuando una reacción química fuera de control provocó el venteo a la atmósfera de cerca de 2 kg de tetraclorodibenzodioxina (TCDD). Dicha sustancia tiene un fuerte potencial mutagénico y presenta una dosis letal de 0,1 mg, para una persona normal. Como consecuencia, se produjo una vasta contaminación del suelo, daños a la salud de la población (alteraciones cutáneas, abortos espontáneos) y daños económicos considerables. La masiva evacuación de la población del área afectada evitó una catástrofe mayor. Este accidente dio origen a la Directiva Seveso de la Comunidad Europea, que establece normativas acerca de la identificación de peligros y evaluación de riesgos por parte de las industrias, el desarrollo de planes de emergencia internos y externos, mecanismos de información y entrenamiento del personal, entre otros.

El accidente de la Planta nuclear de Three Mile Island (Pennsylvania,EEUU), ocurrido en marzo de 1979, fue la primera gran crisis (conocida públicamente) sufrida por la industria nuclear, ante los ojos de cientos de millones de televidentes, quienes observaron la evacuación de 200.000 personas que habitaban el área afectada. El horror nuclear amenazaba con desencadenarse a través de “su opción pacífica”, y no debido a la explosión de misiles enemigos. Afortunadamente, este accidente no tuvo consecuencias en términos de vidas humanas, pero afectó seriamente la confianza de la población respecto a la seguridad de las instalaciones nucleares. Su espectacularidad y potencial de daño, lanzó fuertes señales de alarma en el mundo industrializado; sin embargo, ello no fue suficiente para evitar la gran catástrofe ocurrida en Chernobyl (Ucrania), siete años más tarde...

En Chile, existen innumerables ejemplos de daños al medio ambiente y a la salud de las personas producidos por eventos accidentales, muchos de los cuales se deben a una pésima gestión de seguridad. Bastaría mencionar los incendios

ocurridos en los últimos años en plantas industriales ubicadas en zonas urbanas densamente pobladas (por ejemplo, la fábrica Molypac de Santiago), el incendio de la Bahía de San Vicente en Talcahuano, la contaminación del Río Loa con vertidos de relaves de la minería, el problema generado por el acopio de plomo en el Norte, los cotidianos accidentes de tránsito que involucran camiones cargados con substancias peligrosas, los daños a la salud provocados por la inadecuada manipulación de biocidas de uso agrícola, etc. Ello ha despertado la conciencia pública en relación con los riesgos asociados a la actividad productiva.

**Peligro y Riesgo**

Es importante comenzar este capítulo con las definiciones de dos conceptos utilizados con frecuencia, pero no siempre de manera correcta: peligro y riesgo.

***Peligro:*** *Se utiliza para designar una condición física o química, que puede causar daños a las personas, el ambiente o la propiedad (Ej.: incendio, explosión, intoxicación). Diccionario Larousse: "Situación en la que es posible que ocurra un mal". (Inglés: hazard).*

***Riesgo:*** *Implica la posibilidad de sufrir pérdidas económicas o daños a las personas, al ambiente o a la propiedad, expresada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y la magnitud de las consecuencias. Dic.Larousse: "Estar expuesto a la desgracia". (Inglés: risk).*

Ningún sistema tecnológico, por muy sofisticado que sea, desde el punto de vista técnico, está a salvo de lo imprevisto o de la falibilidad de la intervención humana. La complejidad y la envergadura de los desarrollos tecnológicos, están limitados por la imposibilidad de tener en cuenta todos los eventuales casos de fallo, no ya de la tecnología propiamente tal, sino de la interrelación hombre-máquina. Todos los grandes accidentes industriales de este siglo, presentan una característica común: la acción del hombre aparece como la causa primaria e inmediata[1].

En el caso de la industria de procesos, muchos de los materiales utilizados poseen una gran reactividad y toxicidad, lo que sumado a las altas temperaturas y presiones frecuentemente encontradas en los procesos, implican un alto potencial de daño. El transporte, almacenamiento y procesamiento de tales materiales, presenta niveles de riesgos que, en muchos casos, no son evaluados adecuadamente ni son considerados en la toma de decisiones. Mientras mayor sea nuestro conocimiento acerca de los peligros asociados a la actividad productiva, de los eventos indeseados que puedan tener lugar, de sus causas y de sus consecuencias, mayor será nuestra capacidad para **prevenir** su ocurrencia o **mitigar** sus consecuencias.

En este contexto, el desafío que enfrentan los profesionales involucrados en el diseño y operación de una planta industrial es claro:

[1] Sobre este tema, se recomienda el texto: P. Lagadec. "La Civilización del Riesgo". Editorial Fundación MAPFRE (1983).

*No sólo se debe satisfacer los requerimientos de rentabilidad económica, calidad, cantidad de productos y protección ambiental, sino que también se debe garantizar que los niveles de riesgos involucrados en las diferentes etapas del proceso sean aceptables*.

De aquí surge una pregunta obvia e ineludible: ¿Cuál es el nivel de riesgos aceptable? Este tema ha sido objeto de amplio debate en los países industrializados a partir de los años 70. La percepción pública respecto a los peligros asociados a la actividad industrial, ha sido modelada a la luz de muchos accidentes, tales como aquellos mencionados en párrafos anteriores. Vivimos rodeados de peligros en cada ámbito, en cada actividad, en todo momento. Aceptamos la existencia de una amplia gama de peligros, mientras que tendemos a rechazar otros. Tal como lo expresó J.D. Rimington, Director General de Health and Safety Executive (GB)[2], *toleramos* la existencia de cierta circunstancia peligrosa, cuando existen claros beneficios derivados de dicha situación, y cuando tenemos la certeza de que se puede mantener bajo control. Muchas situaciones potencialmente peligrosas se *aceptan* como parte del diario vivir, particularmente, aquellas sobre las cuales el individuo ha tomado una decisión voluntaria. En aquellos casos donde la situación de peligro ha sido impuesta externamente, sin que el individuo tenga capacidad de decisión, la actitud de rechazo aparece como la primera respuesta. Tal actitud hacia el riesgo proviene de un balance de *Riesgos vs. Beneficios,* que cada uno de nosotros efectúa, consciente o inconscientemente, dentro de los marcos de referencia cultural, ético y psicológico personal. Evidentemente, la calidad de la información respecto a la naturaleza de los peligros, la probabilidad de ocurrencia de los eventos indeseados y de sus consecuencias, jugará un papel fundamental en la actitud que el individuo asuma. Es importante reconocer la gran complejidad del tema, y el importante componente de subjetivismo involucrado en la percepción de los peligros y sus riesgos asociados. La gestión de seguridad en una empresa debe considerar tales características para lograr una mayor efectividad en el control preventivo de accidentes e incidentes.

[2] J.D. Rimington, "Overview of Risk Assessment", *Trans.I.Chem.E*., vol.71, part B, pp.112-115 (1993).

## 11.2) ANÁLISIS DE RIESGO COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO Y GESTIÓN

Para poder decidir si el riesgo asociado a una actividad es aceptable o no, se requiere estimar de alguna manera el nivel de peligro potencial, en términos del daño a las personas, a los bienes y al ambiente, así como la probabilidad de que tal peligro se materialice. Para ello, se debe llevar a cabo un **análisis de riesgo**, cuyos resultados permitan tomar las medidas de gestión y/o tecnológicas que se requiera. La Norma Británica BS 8800 define el análisis de riesgo como:

***Análisis de Riesgo**: Es el proceso de estimar la magnitud del riesgo y decidir si dicho riesgo es aceptable o tolerable.*

En general, el análisis de riesgo para la prevención de accidentes sigue las siguientes etapas:

**TABLA 11.1: ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGO**

| ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGO | PREGUNTAS A RESOLVER |
|---|---|
| 1) Identificación de los peligros y de los eventos que pueden llevar a la materialización de tales peligros. | *¿Qué accidentes pueden ocurrir?* |
| 2) Análisis de los mecanismos que dan lugar a estos eventos. | *¿Porqué y cómo pueden suceder?* |
| 3) Estimación de los efectos (severidad) debido a la materialización de dichos eventos. | *¿Cuales son las consecuencias?* |
| 4) Estimación de la probabilidad de ocurrencia de tales eventos. | *¿Con qué frecuencia podría ocurrir un accidente?* |
| 5) Estimar el riesgo y determinar su aceptabilidad o tolerabilidad. | *¿Es aceptable o tolerable el riesgo?* |

El análisis de riesgo se ha constituido en una poderosa herramienta de gestión, donde se utiliza el conocimiento acerca de los procesos para identificar los potenciales accidentes que pueden ocurrir, sus causas, sus consecuencias y su frecuencia estimada. Los resultados de dicho análisis permiten jerarquizar diferentes opciones para reducir los riesgos de mayor envergadura.

La aplicación del análisis de riesgo debe comenzar desde las primeras etapas del diseño de un proceso (ingeniería conceptual), de modo que las modificaciones necesarias para reducir el nivel de riesgo sean incorporadas en las etapas sucesivas (ingeniería básica e ingeniería de detalle) (ver la Figura 11.1).

Las consecuencias derivadas de un potencial accidente y su probabilidad de ocurrencia permiten estimar el riesgo asociado. Normalmente, el riesgo se estima como:

**RIESGO = CONSECUENCIAS x PROBABILIDAD**

El riesgo asociado a una circunstancia peligrosa puede ser alto, debido a que las consecuencias del accidente pueden ser muy altas y/o debido a que exista una alta probabilidad de ocurrencia. Es importante comparar las medidas para reducir el riesgo con los beneficios que se deriven de ellas, para así decidir cuales son más apropiadas, tanto por su efectividad, como por sus atributos económicos. Si las consecuencias se expresan monetariamente, entonces el riesgo representa el costo esperado, asociado al accidente. Al incrementar las inversiones en medidas de reducción de riesgos, se reducen las consecuencias de un accidente y/o disminuye su probabilidad de ocurrencia. Ello permite efectuar una evaluación de "costo-beneficio".

Tal como lo muestra la Figura 11.2, existe un nivel de seguridad "óptimo", donde el costo total (costo de las medidas de seguridad más el costo asociado a accidentes) alcanza un valor mínimo. Es importante incluir todos los factores de costo en el cálculo monetario de las consecuencias. Se debe considerar todos aquellos aspectos que impliquen costos debido a un accidente, tales como: pérdida de mercado, pérdidas por disminución de la producción, daño a la imagen de la empresa, costos legales, etc..

La implementación de un sistema de gestión de seguridad trae considerables beneficios iniciales en materia de prevención de riesgos. Ello se debe a que se obtiene un mayor conocimiento de los peligros existentes, de los eventos iniciadores y propagadores, de los niveles de riesgo involucrados y de las medidas necesarias para su control. Ello se ve reflejado en la Figura 11.2, donde se ilustra la importante reducción en el costo potencial, asociado a las circunstancias peligrosas, a través de inversiones relativamente bajas. Si se desea avanzar hacia un estado de mucho mayor seguridad operacional (es decir, de menor riesgo), se requerirá inversiones en nuevos equipos, cambios en los procesos, sistemas de control y emergencia más sofisticados, etc..

Desgraciadamente, resulta difícil efectuar un análisis de riesgo expresado en términos económicos precisos. En la práctica, en la mayoría de los casos se recurre a una estimación de riesgos en base cualitativa o utilizando escalas numéricas relativas. En tal caso, es fundamental que se establezca claramente los criterios acerca de los niveles de riesgo. Un buen ejemplo se encuentra incluido en la Norma BS 8800, donde se clasifica los riesgos de acuerdo a 5 categorías: Bajo, Tolerable, Moderado, Sustancial e Intolerable, de acuerdo a los criterios presentados en Tabla 11.2. En este caso, se define como "Riesgo Tolerable" aquel riesgo que ha sido reducido al más bajo nivel posible, dentro de los medios "prácticamente razonables". En este mismo ejemplo, se establece claramente las acciones que emanan para cada categoría de riesgo definida aquí.

**TABLA 11.2: CRITERIOS PARA DEFINIR CATEGORÍAS DE RIESGOS Y ACCIONES RECOMENDADAS, DE ACUERDO A LA NORMA BS 8800**

| CONSECUENCIA | PROBABILIDAD DE OCURRENCIA | NIVEL DE RIESGO |
|---|---|---|
| Daño Leve (1) | Probabilidad Baja (1) | Bajo (trivial) |
| Daño Leve (1) | Probabilidad Media (2) | Tolerable |
| Daño Leve (1) | Probabilidad Alta (3) | Moderado |
| Daño Moderado (2) | Probabilidad Baja (1) | Tolerable |
| Daño Moderado (2) | Probabilidad Media (2) | Moderado |
| Daño Moderado (2) | Probabilidad Alta (3) | Sustancial |
| Daño Extremo (3) | Probabilidad Baja (1) | Moderado |
| Daño Extremo (3) | Probabilidad Media (2) | Sustancial |
| Daño Extremo (3) | Probabilidad Alta (3) | Intolerable |

| NIVEL DE RIESGO | ACCIONES |
|---|---|
| Riesgo Bajo (trivial) (1) | No se requiere acciones adicionales |
| Riesgo Tolerable (2) | No se requiere controles adicionales. Se recomienda buscar medidas de bajo costo para reducir aún más el riesgo. Se requiere monitoreo para asegurar que los controles existentes se mantengan. |
| Riesgo Moderado (3,4) | Se debe hacer esfuerzos para reducir el riesgo, pero sin incurrir en costos de prevención excesivos. En aquellos casos donde existan consecuencias potenciales con daños extremos, se recomienda hacer una nueva evaluación de la probabilidad de ocurrencia, para decidir acerca de nuevas medidas de control. |
| Riesgo Sustancial (6) | No se recomienda iniciar las operaciones hasta que el riesgo no haya sido reducido. En caso de operaciones en curso, éstas deberían cesar. Se debe destinar recursos importantes para reducir el riesgo. |
| Riesgo Intolerable (9) | La operación no debe comenzar ni continuar, hasta que el riesgo haya sido reducido. Se debe destinar todos los recursos necesarios para tal objetivo. |

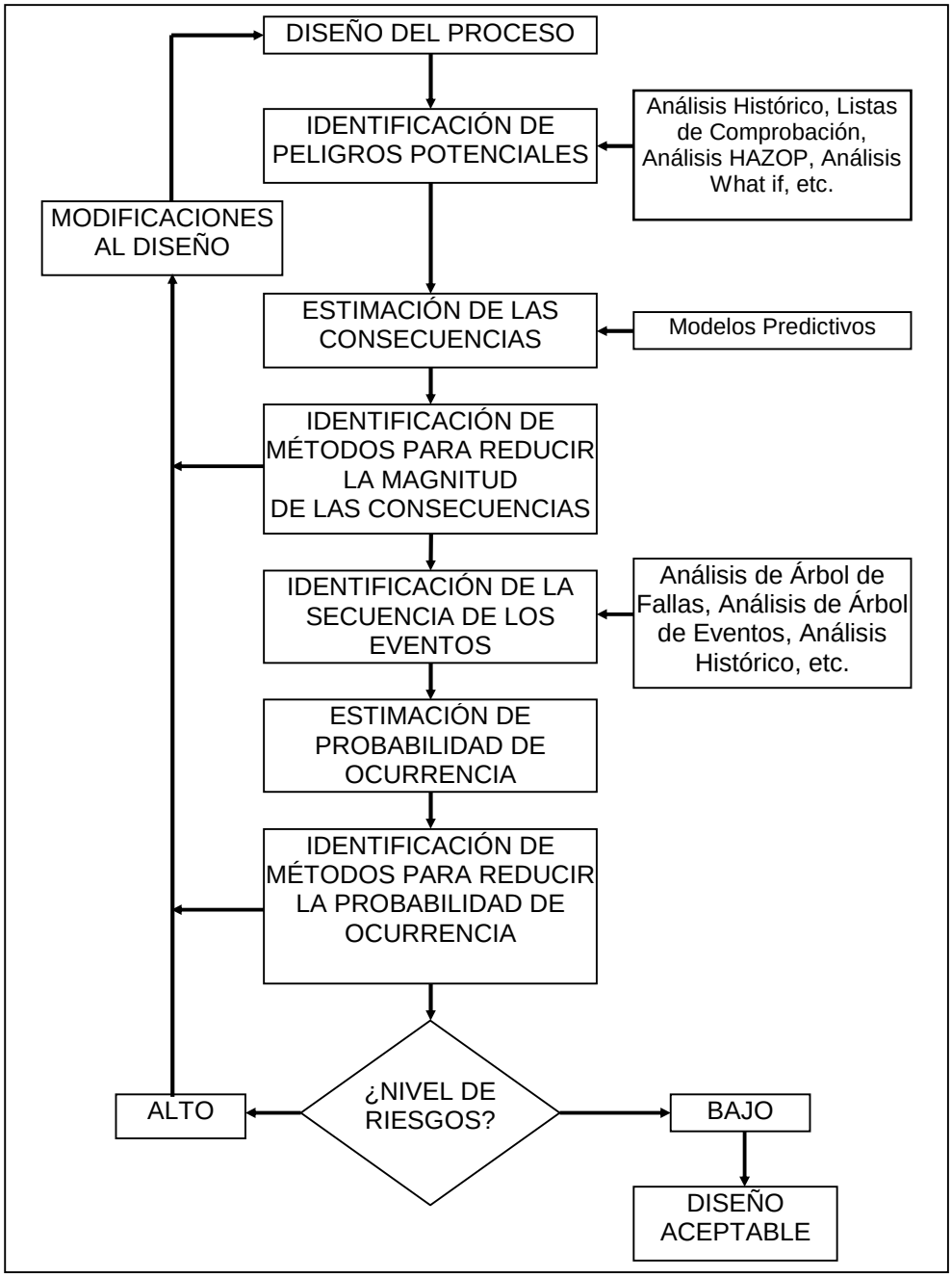



**FIGURA 11.1: ETAPAS TÍPICAS DE UN ANÁLISIS DE RIESGO EN EL CONTEXTO DEL DISEÑO DE PROCESOS MÁS SEGUROS**

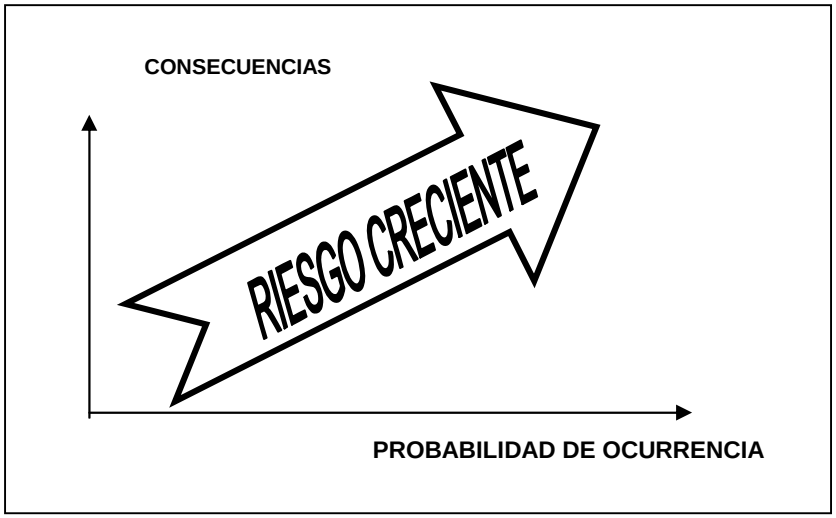



**FIGURA 11.2: GRÁFICO DE CONSECUENCIAS V/S PROBABILIDAD DE OCURRENCIA**

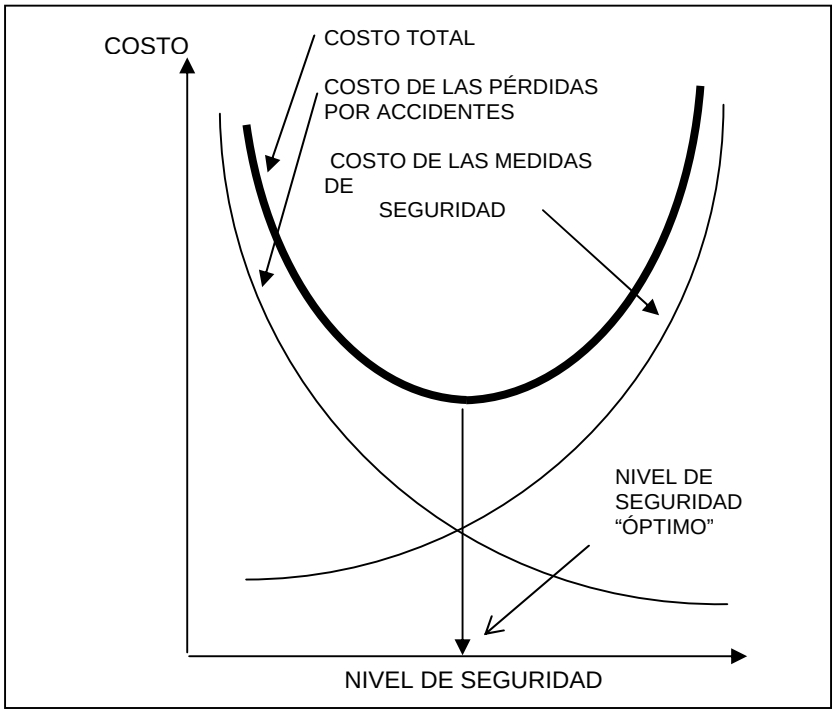



**FIGURA 11.3: COSTOS Y BENEFICIOS EN CONTROL DE RIESGOS**

Las principales ventajas de utilizar el análisis de riesgo como herramienta en la toma de decisiones, tanto en la fase de diseño como durante la operación, son las siguientes:

- Permite identificar los eventos iniciadores de un potencial accidente, los mecanismos de desarrollo, sus consecuencias y frecuencia de ocurrencia.
- Permite establecer una jerarquía de riesgos y de las prioridades de reducción.
- Permite seleccionar las opciones de reducción con mayor factibilidad de éxito.
- Permite disponer de elementos de análisis sistemáticos, para justificar las decisiones en materia de prevención y seguridad.
- Permite establecer los niveles de confiabilidad de los equipos, maquinarias, sistemas de control, y otros componentes del proceso industrial.
- Permite disponer de una herramienta de apoyo a la formación de los cuadros técnicos, en materias de seguridad.
- Permite anticipar el aumento de los riesgos de accidentes debido a obsolescencia tecnológica, desgaste, cambios en los procesos (ej.: equipos, instrumentación y sistemas de control, distribución física, procedimientos de operación, variables claves), cambios en la estructura orgánica, etc..

En la actualidad, existe amplio consenso acerca de la necesidad de abordar el desafío de mantener un eficiente sistema de gestión de seguridad, como requisito para mantener una operación segura, tal como se discute en el Capítulo 8.

La importancia del análisis de riesgo, en el contexto de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional, es evidente. Constituye la herramienta que permite identificar los peligros, cuantificar los riesgos y decidir si estos son tolerables, además de evaluar la efectividad de acciones alternativas para reducir los riesgos.

Todo el personal de una empresa tiene la responsabilidad de conocer los riesgos asociados a su actividad de trabajo. En los países industrializados, esto constituye una obligación legal y tiene como objetivo **prevenir** la ocurrencia de accidentes.

Existen muchos métodos para la evaluación de riesgos, y todos ellos siguen las etapas mencionadas en párrafos anteriores, con diferentes niveles de complejidad en los procedimientos para la identificación de peligros y para la estimación de la probabilidad y las consecuencias. Es importante seleccionar una metodología para evaluación de riesgos, cuyo nivel de complejidad sea coherente con el objetivo que se persigue con el análisis, y con la calidad de la información que esté disponible:

- En una fase inicial del diseño de procesos o del desarrollo de un sistema de gestión de seguridad, se requiere de una evaluación de riesgos que permita establecer aquellos de mayor relevancia, que requieran de acciones para su control. En ese contexto, es suficiente utilizar métodos cualitativos para el análisis preliminar de riesgos.

- En el caso de procesos con altos niveles de riesgo, se puede recurrir a métodos más rigurosos para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental, o utilizar modelos matemáticos para predecir las

consecuencias de un accidente (ej.: explosión, incendio, escape de sustancias peligrosas). Estos métodos cuantitativos son más especializados y requieren de mayor información acerca del proceso en estudio.

En las próximas secciones se revisará brevemente los componentes del análisis de riesgo, poniendo énfasis en aquellos aspectos relevantes al análisis preliminar de riesgos. Además, se entrega antecedentes generales sobre los métodos cuantitativos, indicando las referencias que permitan una mayor profundización.

## 11.3) TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

La identificación de peligros es una de las etapas fundamentales en el análisis de riesgo. Todos aquellos peligros que no sean debidamente identificados, no serán considerados como objeto de estudio posterior y, por lo tanto, no se tomará medidas para reducir sus riesgos asociados. Las principales preguntas que se deben responder como resultado de la identificación de peligros son:

1. -¿Existe alguna fuente de peligro?
2. -¿Quién o qué puede ser dañado?
3. -¿Cómo puede ocurrir dicho daño?

La identificación y caracterización de los peligros se debe llevar a cabo durante **toda la vida útil** de un proyecto, incluyendo las fases de diseño, construcción, puesta en marcha, operación y cierre de la actividad (abandono o cierre temporal) de la planta.

En la literatura especializada se encuentra diferentes formas de clasificar los peligros. Dichas tipologías constituyen una excelente ayuda en el ejercicio de identificar los peligros potenciales, asociados a las actividades de una industria. Dentro de este contexto, es útil clasificar los peligros de acuerdo a su naturaleza física/química:

- Peligros de fuego y explosión.
- Peligros asociados a materiales tóxicos, corrosivos y reactivos.
- Peligros de naturaleza mecánica.
- Peligros de naturaleza eléctrica.
- Peligros asociados a compuestos radioactivos.
- Peligros asociados a materiales biológicamente activos.

En términos generales, se puede decir que un accidente puede ocurrir cuando alguna forma de energía es liberada de manera no controlada, por ejemplo:

- Energía potencial: Se libera cuando un estanque a presión se rompe, cuando colapsa un edificio, o cuando se produce una avalancha.
- Energía eléctrica: Produce daño cuando un rayo cae sobre personas o instalaciones, o cuando se produce un cortocircuito en un sistema eléctrico.
- Energía cinética: Produce daños en los accidentes de transporte, o debido a la acción de fuertes vientos u olas, durante una tormenta.
- Energía calórica: Produce daños cuando materiales a alta temperatura (agua caliente, metales derretidos) escapan de sus recipientes de contención.
- Energía química: Se libera durante reacciones químicas fuera de control, y en el caso de fuegos y explosiones.
- Energía radiante: En el caso de incendios, se libera luz y calor por radiación; en el caso de fuentes radioactivas, se libera radiación.

Dicha energía puede ser liberada por causas humanas o naturales. Estas últimas no deben ser dejadas de lado, ya que la capacidad destructiva de los eventos naturales, tales como sismos, erupciones volcánicas, avalanchas, tormentas, etc., está fuera de toda duda. A pesar de que sobre ellos no tenemos ningún control, estos eventos deben ser considerados y evaluados en detalle, con el fin de identificar todas las medidas que sean necesarias para minimizar sus consecuencias. Dichas circunstancias juegan un papel determinante en la selección de la ubicación de la planta, y en las medidas de protección a incorporar en el diseño de las instalaciones.

Las circunstancias peligrosas y el tipo de accidentes que podrían tener lugar pueden ser identificadas en base a la información sobre el tipo de materiales y las condiciones de operación. Dichos datos se pueden obtener sin dificultad, ya que forman parte de la información base de cualquier proyecto o actividad industrial.

Las ***circunstancias peligrosas*** en una planta industrial incluyen:

- Almacenamiento de cantidades importantes de sustancias peligrosas.
- Transporte y procesamiento en condiciones de presión y temperatura extremas.
- Transporte y procesamiento de sustancias peligrosas (insumos químicos, productos, subproductos, compuestos intermedios, residuos).
- Reacciones químicas (exotérmicas o endotérmicas), muy sensibles a parámetros del proceso o impurezas (sistemas catalíticos, baja energía de activación, sensibles a pH).
- Sistemas de Alto Voltaje.
- Presencia de sustancias radioactivas.

***Sustancias peligrosas*** son aquellas que, por su cantidad, concentración, o por sus características químicas, físicas o biológicas, pueden afectar la salud humana o producir daños al medio ambiente o a la propiedad.

La Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) define una sustancia peligrosa si ella posee alguna de las siguientes características: reactividad, inflamabilidad, corrosividad o toxicidad. Estas características se definen como:

***Sustancias reactivas***: Son inestables bajo condiciones normales; pueden causar explosiones y/o liberar humos, gases y vapores tóxicos, cuando se mezclan con agua.

***Sustancias inflamables***: Son aquellas que pueden inflamarse y quemarse (ej.: solventes cuyos vapores se inflaman a menos de 60ºC).

***Sustancias corrosivas***: Incluyen líquidos a pH menor de 2 y mayor de 12,5, y aquellos fluidos que son capaces de corroer los envases metálicos.

***Sustancias tóxicas***: Son aquellas que producen daños para la salud o son letales cuando se ingieren o absorben.

Las Naciones Unidas clasifican las sustancias peligrosas de acuerdo a sus características de explosividad, inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad, tal como se muestra en la Tabla 11.3.

Dicha clasificación es utilizada en la Guía de Respuestas en Caso de Emergencia, publicada por el Departamento de Transporte de Estados Unidos[3]. Esta Guía constituye una buena ayuda para el análisis preliminar de peligros asociados a materiales de uso industrial, y puede ser utilizada en conjunto con las Hojas de Datos para las diferentes sustancias presentes en la planta.

[3] "Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (ERG93)". US Department of Transportation. Washington DC 1993. En Chile, el Decreto Supremo Nº298/94 (Reglamento sobre el transporte de cargas peligrosas) incorpora las Normas Chilenas NCh 382/98 y NCh 2.245/93 sobre clasificación de substancias peligrosas y hojas de datos de seguridad de productos químicos, respectivamente.

**TABLA 11.3: CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS. NACIONES UNIDAS**

| CLASIFICACIÓN | |
|---|---|
| • **Clase 1:** | **Explosivos** |
| 1.1 | Explosivos con peligro de explosión masiva. |
| 1.2 | Explosivos con un peligro de proyección. |
| 1.3 | Explosivos con un peligro predominante de incendio. |
| 1.4 | Explosivos sin ningún peligro significativo de estallido. |
| 1.5 | Explosivos muy insensibles; los agentes explosivos. |
| 1.6 | Sustancias de detonación muy insensibles. |
| • **Clase 2:** | **Gases:** |
| 2.1 | Gas inflamable. |
| 2.2 | Gas comprimido, no inflamable, no venenoso. |
| 2.3 | Gas venenoso por inhalación. |
| 2.4 | Gas corrosivo. |
| • **Clase 3:** | **Líquidos Inflamables** |
| • **Clase 4:** | **Sólidos Inflamables:** |
| 4.1 | Sólidos inflamables. |
| 4.2 | Material espontáneamente combustible. |
| 4.3 | Material peligroso cuando entra en contacto con el agua. |
| • **Clase 5:** | **Sustancias Oxidantes** |
| 5.1 | Sustancias Oxidantes. |
| 5.2 | Peróxidos orgánicos. |
| • **Clase 6:** | **Sustancias Venenosas y Sustancias Infecciosas** |
| 6.2 | Sustancias venenosas. |
| 6.3 | Sustancias infecciosas. |
| • **Clase 7** | **Sustancias Radiactivas** |
| • **Clase 8** | **Materiales Corrosivos** |
| • **Clase 9:** | **Materiales Peligrosos Misceláneos** |

Existe una amplia gama de métodos utilizados para la identificación de peligros, los que se pueden clasificar como:

**TABLA 11.4: MÉTODOS PARA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS**

| **MÉTODOS** |
|---|
| **1) Métodos Comparativos**: Se basan en la experiencia previa acumulada en un sector industrial determinado. Son muy utilizados en análisis preliminar de riesgo. Incluyen:<br>• Listas de Comprobación<br>• Análisis Histórico de Accidentes<br>• Normas y Códigos de Diseño |
| **2) Métodos Generalizados:** Requieren de mayor información acerca del proceso a analizar y constituyen poderosas herramientas para la identificación de peligros y análisis de los riesgos asociados. Generalmente se utilizan en una etapa posterior al análisis de riesgo, cuando se ha seleccionado aquellos que ameritan una evaluación con mayores niveles de detalle.<br>Entre los métodos generalizados destacan[4] :<br>• Análisis de Peligro y Operatividad (HAZOP)<br>• Análisis "¿Qué sucedería sí...?" (What if?)<br>• Análisis de modalidades de falla y sus efectos (FMEA)<br>• Análisis de árbol de fallas (FTA)<br>• Análisis de árbol de eventos (ETA) |
| **3) Índices de Riesgos:** Estos son métodos directos y simples para estimar y jerarquizar los riesgos asociados a un proceso. En rigor, no son métodos creados para identificar peligros, pero ayudan a seleccionar áreas donde los riesgos son mayores. Utilizan las características de los materiales utilizados (toxicidad, reactividad, volatilidad, etc.), así como la ubicación y disposición de las unidades en la planta. Destacan, entre otros:<br>• Índice DOW (de Fuego y Explosión)<br>• Índice ICI Mond<br>• Índice de Exposición Química<br>• Índice de Peligro de una Substancia (SHI) |

[4] Estos métodos se introducen en: Santamaría J.M. y Braña P.A. "Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química". Editorial Fundación MAPFRE. Madrid. 1994.
Para mayores detalles, se consultar: "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, AIChE, New York 1990

### 11.3.1) Métodos Comparativos para la Identificación de Peligros

- Una ***lista de comprobación*** es una guía que permite revisar un proceso e identificar carencias de seguridad o áreas que requieren un estudio más profundo. Al final de este capítulo se anexa un ejemplo de Lista de Comprobación, compilada en base a la referencia de Santamaría y Braña[5], que puede ser utilizada para un diagnóstico preliminar del estado de seguridad de una instalación.

- El ***análisis histórico de accidentes*** utiliza los registros de accidentes que han ocurrido en industrias similares o en procesos comparables. Su ventaja radica en el hecho de que utiliza datos reales sobre accidentes ocurridos; sin embargo, la información disponible es limitada lo que puede representar un serio riesgo. Los datos sobre accidentes se pueden encontrar en los informes publicados por asociaciones industriales, compañías de seguros, agencias gubernamentales, u otros. Algunos bancos de datos de consulta frecuente para accidentes en la industria de procesos son, entre otros: CHAFINC (Chemical Accidents, Failure Incidents and Chemical Hazards Databank), CHI (Chemical Hazards in Industry), HARIS (Hazard and Reliability Information System), NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health), OSHA (Occupational Safety and Health), AIChE (American Institute of Chemical Engineers). En general, dichas bases de datos incluyen información acerca de los tipos de accidente, las circunstancias existentes, la naturaleza y la cantidad de los compuestos involucrados, localización, causas y consecuencias, daños a las personas y a la propiedad, etc.

- Existen ***normas legales, códigos y normas de diseño*** que fijan requerimientos en relación con aspectos de salud y seguridad ocupacional, y que establecen los lineamientos que fijan la aceptabilidad del diseño de equipos, procesos, sistemas de almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas, etc. Cualquier desviación del diseño respecto de lo que se considera una práctica aceptada debe dar origen a un análisis más detallado de tal situación. Algunas de las instituciones que han fijado tales códigos y normas son: ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute), NFPA (National Fire Protection Association), INN (Instituto Nacional de Normalización-Chile), BS (British Standard), ANSI (American National Standards Institute), etc.

---

[5] Otros textos de consulta recomendados:
Battelle Columbus Division - AIChE / CCPS, “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures”, AIChE, NY.1987
Crowl D., Louvar J., “Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications”. Prentice Hall. Englewood.1990

- La identificación preliminar de peligros puede efectuarse con la ayuda de cualquiera de los métodos mencionados aquí. Interesa determinar el tipo y cantidad de sustancias peligrosas almacenadas, transportadas, procesadas y emitidas al ambiente; tipo de equipamiento utilizado, identificando aquellos que utilizan condiciones de temperatura y presión extremas; presencia de reactores químicos o biológicos, y sus condiciones de operación.

### 11.3.2) Análisis de Peligro y Operatividad (HAZOP)

El ***Análisis HAZOP*** (Hazard and Operability) permite identificar los peligros asociados a una planta o parte de ella, tanto en la fase de diseño (ingeniería básica e ingeniería de detalle), como durante la operación de la planta (ej.: al introducir modificaciones en los procesos). Generalmente, se utiliza como herramienta en el análisis de riesgo en aquellas unidades u operaciones críticas, donde los accidentes pueden revestir serias consecuencias. Dichas unidades u operaciones se seleccionan a partir de una evaluación preliminar con métodos más sencillos.

Este es un método de identificación de peligros que supone que los problemas de seguridad y operatividad se deben a desviaciones sobre las condiciones "normales" de operación, en un sistema dado y en una etapa determinada (puesta en marcha, operación en régimen estacionario, operación en régimen no estacionario, parada de planta). Se puede aplicar línea a línea o equipo a equipo, en la etapa de diseño o en una planta en operación. El procedimiento general se esquematiza en la Figura 11.3.

Para que el análisis HAZOP sea efectivo se requiere de los diagramas de cañerías e instrumentación (P&I) y de un equipo multidisciplinario que posibilite una evaluación de las consecuencias de cada desviación, desde diferentes puntos de vista.

Se utiliza palabras guía para evaluar en forma sistemática el efecto de anomalías en las acciones (reacciones, transferencia, etc.) o en parámetros específicos (presión, temperatura, concentración, caudal, etc.). La Tabla 11.5 muestra algunos ejemplos de palabras guía de uso frecuente.

Una vez seleccionada una línea de proceso, se define claramente su función; por ejemplo:

- Suministrar vapor a un reactor para evacuar compuestos volátiles inflamables.
- Suministrar refrigerante a un intercambiador de calor.
- Evacuar los gases desde un reactor.
- Alimentar una mezcla de productos a un analizador químico.
- Alimentar combustible a una caldera.
- Descargar una mezcla de reactivos desde un estanque de almacenamiento.

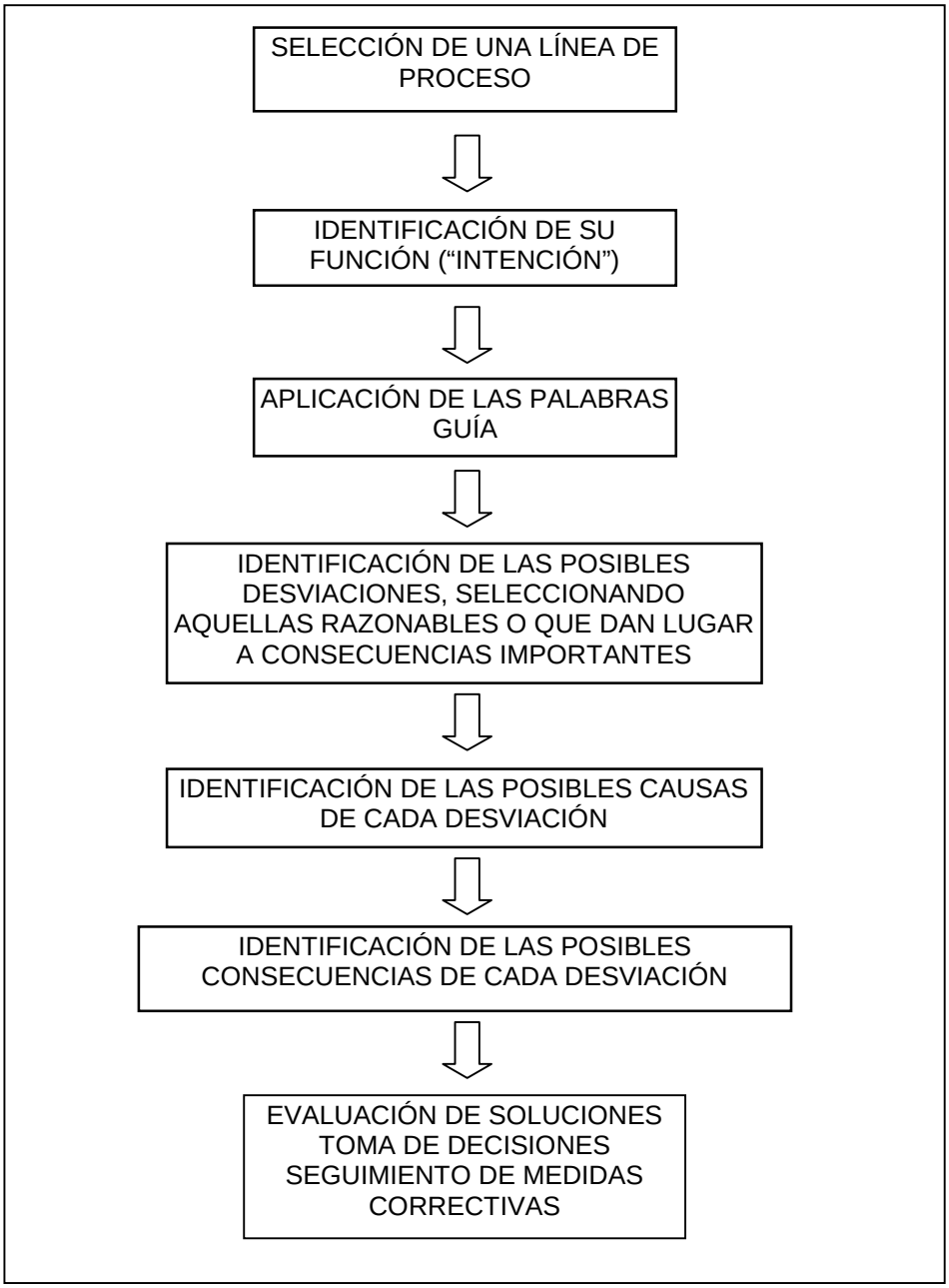



**FIGURA 11.4: SECUENCIA DE ANÁLISIS HAZOP**

**TABLA 11.5: PALABRAS GUÍA DE USO FRECUENTE EN EL ANÁLISIS HAZOP.**

| PALABRAS GUÍA | PROPÓSITO |
|---|---|
| NO | No se consigue las intenciones previstas en el diseño. Ejemplo: No hay flujo en una línea; no se abre la válvula de purga. |
| MÁS / MENOS | Aumentos o disminuciones cuantitativas sobre la intención de diseño. Ejemplo: más presión; menor flujo; mayor concentración, etc.. |
| ADEMÁS DE | Aumento cualitativo. Se cumplen las intenciones de diseño, pero ocurre algo más. Ejemplo: se incluye otro compuesto además del reactivo deseado. |
| PARTE DE | Disminución cualitativa. Sólo parte de los hechos ocurre de acuerdo a lo previsto. Ejemplo: la composición del sistema es diferente de la prevista. |
| INVERSIÓN | Se obtiene el efecto contrario al deseado. Ejemplo: el flujo ocurre en sentido inverso; la reacción química se revierte. |
| EN VEZ DE | No se obtiene el efecto deseado y ocurre algo completamente distinto. Ejemplo: detención imprevista; falla en el modo de operación de una unidad |

Se debe identificar desviaciones de esta condición base. Para ello se utiliza palabras guías, tales como las que se muestran en la Tabla 11.5. Cada una de estas desviaciones se evalúa para determinar posibles causas de que ocurra dicha desviación, y se evalúan las consecuencias de tal desviación. En cada caso, se debe señalar las acciones recomendadas para evitar que la desviación ocurra o para evitar que esta desviación tenga consecuencias no deseadas.

Como resultado de este análisis, se obtendrá un conjunto de desviaciones teóricas, cada una de las cuales tiene consecuencias. Algunas de las causas identificadas pueden ser irreales y, por lo tanto, las consecuencias respectivas pueden ser obviadas. En aquellos casos donde las desviaciones provengan de causas factibles, y las consecuencias revistan cierta gravedad, ellas deberán ser evaluadas con mayor detalle para definir acciones de prevención y/o protección.

Una vez que se ha completado el análisis de un componente, se prosigue con el siguiente hasta completar la totalidad de la planta.

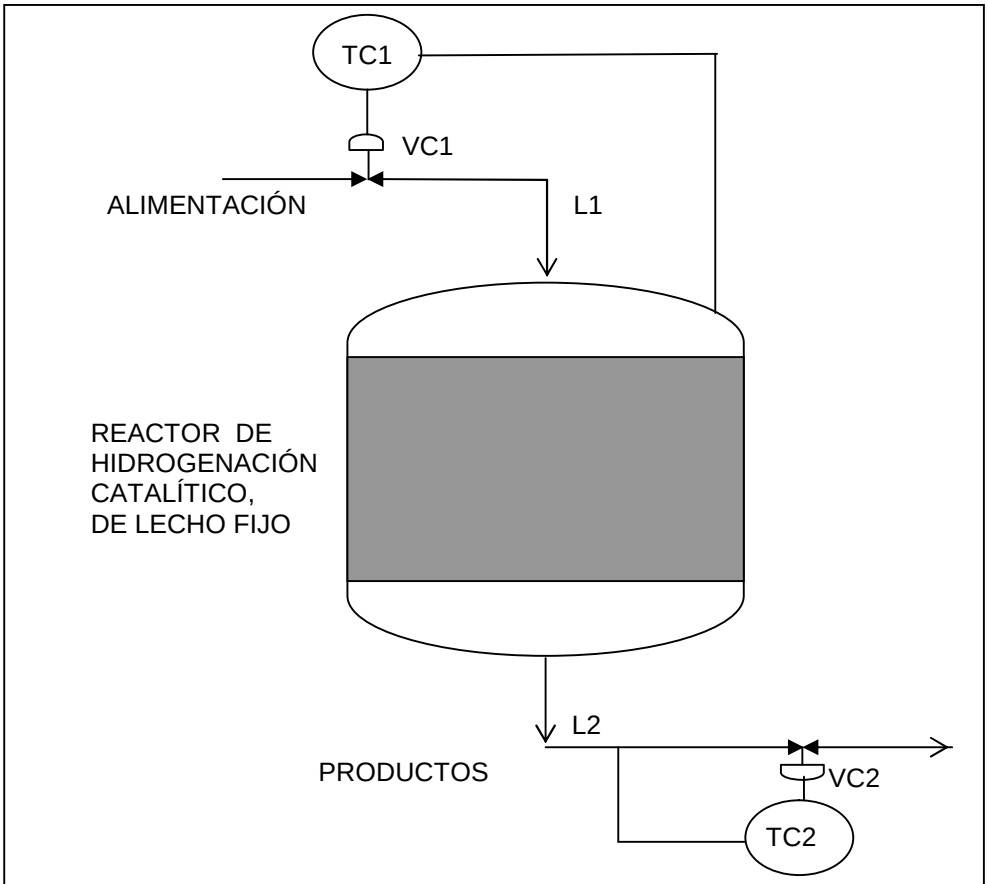
El método HAZOP se utiliza frecuentemente en el análisis de riesgo asociado a la puesta en marcha y detención en la industria química, así como en la evaluación

de sistemas de control automático. Es importante señalar que la efectividad de este método depende de la calidad de la información técnica sobre el proceso a evaluar, de la rigurosidad de los diagramas y de la competencia profesional de los que participan en el ejercicio. Este método es más efectivo cuando se lleva a cabo en grupo, con la participación de profesionales especialistas que posean diferentes conocimientos acerca del proceso a analizar.

A modo de ejemplo, se puede considerar el análisis HAZOP de la línea L1 del reactor catalítico para la hidrogenación de acetileno, presentado en la Figura 11.4:

- Función de la línea L1: Alimentar los reactivos al reactor.
- Características: Flujo, composición temperatura, presión.

Por lo tanto, se debe analizar las desviaciones de cada una de las variables que caracterizan a la línea L1. La Tabla 11.6 muestra el resultado que se obtiene al utilizar algunas de las palabras guía para desviaciones en flujo de alimentación y concentración de los reactivos.




- Reactor de lecho fijo con un catalizador altamente selectivo hacia el acetileno, donde se realiza la reacción de hidrogenación de acetileno para su transformación a etileno.
- La reacción es exotérmica.
- Opera a 90ºC (a 3 atm) y la temperatura se mantiene regulando el flujo de alimentación de reactivos. Existe además un control adicional de la temperatura, actuando sobre el flujo de descarga de los productos. Como elemento de seguridad adicional, existe un sistema de alarma que se activa cuando la temperatura sobrepasa un nivel crítico, y permite que un operador cierre manualmente la válvula de alimentación.
- La alimentación consiste en una mezcla de hidrógeno, etileno y acetileno.

**FIGURA 11.5: HIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ACETILENO**

**TABLA 11.6: ANÁLISIS HAZOP. EJEMPLO FIGURA 11.5, LINEA L1:**

| DESVIACIÓN | CAUSAS | CONSECUENCIAS | ACCIONES |
|---|---|---|---|
| NO hay flujo en L1 | Válvula VC1 falla en cerrado.<br>Sistema de control TC1 falla, cerrando VC1.<br>Bomba de alimentación falla.<br>Acción de control correcta frente a aumento de temperatura en el reactor. | Si no hay flujo en una operación normal, no llegan reactivos al reactor, lo que reduce y, eventualmente, detiene la reacción. | Para evitar pérdidas de producción debido a enfriamiento y detención de la reacción durante la operación normal, se recomienda instalar un sistema de alarma para detectar disminución de temperatura bajo un nivel crítico. |
| MÁS flujo en L1 | Válvula VC1 falla en abierto.<br>Falla sistema de control TC1, dejando VC1 en abierto.<br>Acción de control correcta, frente a una baja de temperatura en el reactor. | Aumenta la temperatura del reactor. Es una consecuencia deseada si ello ocurre como respuesta a una acción de control correcta.<br>Sin embargo, no es deseable si ello ocurre por fallas, ya que el aumento de temperatura puede derivar en daños al reactor o en accidente mayor (explosión, incendio). | Instalar un sistema de alarma para detectar aumento de temperatura sobre un nivel umbral y actuar manualmente. |
| MAYOR concentración de reactivos | Perturbaciones en procesos anteriores al reactor. | Aumenta la velocidad de reacción, lo que podría derivar en un aumento de la temperatura del reactor si los controladores de temperatura no son efectivos. | Mantener los controladores de temperatura en excelente estado operacional. Instalar un sistema de alarma para detectar un aumento de temperatura sobre umbral crítico y actuar manualmente. |

### 11.3.3) Análisis ¿Qué Sucedería Sí...? (What if?)

El ***Análisis ¿Qué sucedería sí...?*** permite conducir un examen sistemático de una operación o un proceso en base a preguntas de ese tipo. Es una técnica de gran utilidad para la identificación de peligros.

Este análisis requiere de un completo conocimiento del proceso a evaluar. Se debe preparar una lista de preguntas del tipo ¿Qué sucedería sí...? aplicadas a desviaciones en el diseño, construcción, modificación y operación de la planta.

Las preguntas se realizan sobre aspectos específicos, tales como por ejemplo:

| | |
|---|---|
| **Suministros** | ¿Qué sucedería si fallase el suministro de agua de enfriamiento?<br>¿Qué sucedería si fallase el suministro de electricidad?<br>¿Qué sucedería si fallase el suministro de aire? |
| **Materias primas** | ¿Qué sucedería si cambiase la composición de la materia prima?<br>¿Qué sucedería si se interrumpiese la alimentación de materia prima? |
| **Condiciones de operación** | ¿Qué sucedería si ocurriese un aumento/disminución de la temperatura (o la presión, o el pH)?<br>¿Qué sucedería si aumentase el flujo de vapor? |
| **Instrumentación y Control** | ¿Qué sucedería si fallasen los analizadores de gases?<br>¿Qué sucedería si la válvula de control fallase? |
| **Seguridad eléctrica** | ¿Qué sucedería si ocurriese un aumento del voltaje de la línea?<br>¿Qué sucedería si ocurriese un cortocircuito? |
| **Protección contra incendios** | ¿Qué sucedería si ocurriese un incendio en las bodegas de reactivos? |
| **Almacenamiento** | ¿Qué sucedería si fallase el sistema de control de nivel del estanque de reactivos? |
| **Manejo de Materiales** | ¿Qué sucedería si ocurriese un escape del producto a la atmósfera?<br>¿Qué sucedería si ocurriese un derrame durante la descarga de combustible? |
| **Tratamiento de residuos** | ¿Qué sucedería si se interrumpiese el suministro eléctrico a los aireadores del biorreactor?<br>¿Qué sucedería si fallase el precipitador electrostático? |

A pesar de ser un método aparentemente sencillo, requiere de bastante preparación y comprensión del proceso. Al igual que en el caso del método HAZOP, la calidad de las respuestas depende de los niveles de conocimiento sobre los fenómenos involucrados, las respuestas esperadas frente a perturbaciones en las variables claves, las relaciones causa-efecto, etc.

### 11.3.4) Análisis de Modalidades de Falla y sus Efectos

El ***Análisis de Modalidades de Falla y sus Efectos*** (FMEA, Failure Modes and Effects Analysis) consiste en un examen de componentes individuales para evaluar el efecto de su falla sobre el comportamiento del sistema. Este análisis es sistemático y requiere de un detallado conocimiento del proceso a evaluar. Es utilizado con bastante frecuencia en la industria de procesos.

En el contexto de este análisis, una modalidad de falla de un componente puede identificarse como:

- Una pérdida de función del componente (deja de actuar).
- Una función prematura (actúa prematuramente, antes de que se le requiera).
- Función fuera de tolerancia, o falla, o característica física no deseada.

En el FMEA todos los modos conocidos de falla se consideran uno a uno, y las consecuencias de cada falla son evaluadas y anotadas.

Se lleva a cabo en equipo y requiere información detallada sobre el sistema a evaluar (ej.: diagramas P&I, diagramas eléctricos, procedimientos de operación, diagramas de lógica instrumental, información sobre los sistemas de control, diagramas de suministros). Dicha información debe ser estudiada a fondo, de modo que cada uno de los participantes tenga una clara visión de la naturaleza de las operaciones para cada componente, de las características del diseño y sus interacciones con el sistema del cual forma parte.

El análisis comienza con la definición del sistema y sus características. Ello implica definir claramente los límites del sistema a abordar:

- Si el estudio se lleva a cabo a nivel de toda una planta, el análisis de modalidades de falla y sus efectos debe enfocarse sobre los sistemas individuales (ej.: sistema de alimentación, sistema de separación, sistema de tratamiento de efluentes, etc.).
- Si el estudio se realiza a nivel de sistema o subsistema, el análisis de modalidades de falla se enfoca sobre los equipos individuales (ej.: bomba de alimentación, sensor de temperatura, alarma, válvula de control del circuito de refrigeración, etc.).

El paso siguiente consiste en identificar todos los modos de falla relevantes y los efectos que producen. Por ejemplo, una bomba que normalmente está operando puede tener los siguientes modos de fallo:

- Fallar en encendido (no se detiene al dar la señal de detención).

- Fallar y detenerse.
- Presentar fugas a través de los cierres hidráulicos.
- Presentar fugas a través de la carcasa.

Cada uno de estos modos de falla tiene consecuencias diferentes. Más aún, se debe investigar los sistemas de detección de fallos que existen y evaluar su relevancia para cada caso. Una extensión de este método considera la utilización de un índice de gravedad, que permita clasificar los diferentes escenarios, de acuerdo a la seriedad de sus consecuencias. En dicho caso, se utiliza un índice de gravedad entre 1 y 4:

1: Sin efectos adversos.
2: Efectos menores que no requieren detención de la operación.
3: Efectos importantes que requieren detención normal.
4: Peligro inmediato para el personal e instalaciones, parada de emergencia.

Con la información obtenida es posible proponer medidas correctivas en el diseño, para aquellos casos en que el modo de falla da origen a efectos importantes. En los casos de fallas graves se debe asegurar un sistema de detección directo de éstas.

A modo de ejemplo, se presenta a continuación parte del análisis de modo de falla para la válvula VC1 del ejemplo de la Figura 11.5.

**ANÁLISIS DE MODO DE FALLA PARA LA VÁLVULA VC1**

| MODO DE FALLA | MÉTODO DE DETECCIÓN | EFECTOS | GRAVEDAD |
|---|---|---|---|
| VC1 falla en cerrado | No tiene. | Se corta alimentación al reactor. El control TC2 responderá reduciendo la salida de los productos. Si ello es insuficiente, se detiene la reacción, con pérdidas de producción. | 3 |
| VC1 falla en abierto | No tiene. La alarma por aumento de temperatura permite detectar el efecto, pero no la causa del problema. | Mantiene la alimentación al reactor. Resulta en aumento de temperatura. El sistema de control TC2 debe responder aumentando el flujo de salida, para reducir la presión del reactor. Además, si la temperatura sube demasiado se activa el sistema de alarma, lo que permite cerrar manualmente la válvula VC1. Si ello no es posible o es insuficiente, ocurre daño grave al reactor. | 4 |
| VC1 abre cuando se requiere cerrar | No tiene. La alarma por aumento de temperatura permite detectar el efecto, pero no la causa del problema. | No reduce la alimentación cuando se requiere. Consecuencias similares a la falla anterior. | 4 |
| VC1 cierra cuando se requiere abrir. | No tiene. | No aumenta la alimentación cuando se requiere. Baja la temperatura del reactor. El control TC2 responderá reduciendo la salida de los productos. Si ello es insuficiente, la reacción se detiene, con pérdida de producción. | 3 |
| VC1 presenta fugas de fluido a través de sellos. | No tiene. | Escape de gases peligrosos. No hay acción de control asociada. Peligro grave de fuego/explosión. | 4 |

### 11.3.5) Análisis de Árbol de Fallas

***El Análisis de Árbol de Fallas*** (FTA, Fault Tree Analysis) supone que un evento no deseado (accidente o desviación peligrosa) ya ha ocurrido, y busca las causas del mismo y la cadena de eventos que hicieron que tuviera lugar.

De este modo, se supone que el accidente ha ocurrido, y se analiza hacia atrás su posible evolución, hasta llegar a las causas primarias. El accidente se descompone en sus elementos contribuyentes, identificando los errores humanos, fallos de equipos e instrumentos, eventos externos, etc. (ver Tabla 11.7), utilizando toda la información detallada que se tenga con relación al sistema analizado. El resultado de este análisis es una representación lógica en la que aparecen cadenas de eventos capaces de generar el evento no deseado.

Algunos de los componentes típicos de un análisis de árboles de falla son:

- ***Evento no deseado***: Es el accidente o desviación peligrosa en la que se basa el análisis. Por ejemplo, un aumento de temperatura al interior de un reactor catalítico exotérmico.
- ***Eventos básicos***: Representan las causas primarias que dan origen al evento no deseado. Por ejemplo, falla del sensor de temperatura, falla en la válvula de control, cambio en la composición de la alimentación.
- ***Eventos intermedios***: Resultan de la interacción de otros eventos y, a su vez, dan origen a eventos posteriores. Por ejemplo, reducción en el flujo de alimentación del refrigerante.
- ***Eventos no desarrollados***: No son eventos básicos, y podrían desarrollarse más, pero no se considera necesario, o no se dispone de información suficiente.
- ***Puertas O***: Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de uno o más de los eventos de entrada para producir un evento de salida. Por ejemplo, la falla en el cerrado de la válvula de alimentación de refrigerante o la detención accidental de la bomba de alimentación del refrigerante, producen como respuesta la reducción/cese de la alimentación de refrigerante.
- ***Puertas Y***: Representan la operación lógica que requiere de la ocurrencia de todos los eventos de entrada para producir el evento de salida. Por ejemplo, la temperatura del reactor aumenta fuera de control cuando los siguientes eventos ocurren simultáneamente: falla del sistema de descarga de emergencia del contenido del reactor, y falla de la alimentación de refrigerante, y falla en abierto de la válvula de alimentación de reactivos al reactor.

Este método se utiliza, en primer lugar, para fines de identificación de peligros, pero se usa también en la cuantificación de riesgos (estimación de la probabilidad de ocurrencia).

Ejemplo

A modo de ilustración, la Figura 11.6 muestra los resultados de un análisis de árbol de fallas, aplicado al reactor de la Figura 11.5; se evalúa las causas del daño al reactor debido a un aumento de la temperatura sobre su umbral crítico.

¿Cuáles son los eventos que conducen a este evento culminante?

De acuerdo con el diseño, la temperatura del reactor se regula controlando la velocidad de la reacción exotérmica, actuando sobre el flujo de alimentación al reactor.

Los elementos relevantes que componen este sistema son:

- Válvula de alimentación de reactivos (VC1).
- Controlador de la válvula (TC1), incluyendo el sensor de temperatura y el sistema de transmisión de la señal.
- Válvula de descarga de los productos de reacción (VC2).
- Controlador de la temperatura de la descarga (TC2).
- Sistema de alarma y de control manual: un operador supervisa la unidad y tiene la opción de cerrar manualmente la válvula de alimentación si se activa una alarma que detecta el aumento de temperatura más allá de un nivel crítico.

La falla de cada uno de ellos tiene algún efecto sobre la temperatura en el reactor. Un análisis preliminar del sistema demuestra que la temperatura del reactor puede aumentar debido a:

1. Incremento de la velocidad de reacción. Ello ocurre cuando:

    - Aumenta la temperatura en la zona de reacción (existe una relación exponencial entre temperatura y velocidad de reacción), y/o
    - Aumenta la concentración de los reactivos limitantes en la zona de reacción, y/o
    - Aumenta la presión al interior del reactor.

2. Los reactivos permanecen al interior del reactor aún cuando se ha detenido el flujo de alimentación, por lo que la reacción continúa liberando calor hasta agotar los reactivos residuales.

La concentración de reactivos en la zona de reacción puede ocurrir debido a cambios en la composición de la alimentación. En todo caso, un correcto funcionamiento de la válvula de control de la alimentación debería reducir el flujo de entrada para compensar el incremento de la composición. Además, existe el control de temperatura a través de la válvula de descarga de productos, la cual incrementa el flujo de salida en caso de que la temperatura tienda a aumentar sobre el punto de referencia. El control manual debería ser capaz de resolver cualquier falla de estos dos sistemas de control. En operación normal tanto VC1 como VC2 se mantienen abiertas.

La presión al interior del reactor puede aumentar como consecuencia del aumento de la temperatura en el reactor. La presión y la temperatura aumentarían si la válvula de salida de los productos (VC2) se cierra, mientras la válvula de alimentación (VC1) se mantiene abierta.

El árbol de fallas que se puede obtener a partir del análisis de los eventos que dan origen a daños en el reactor debidos a un aumento de su temperatura, se muestra en la Figura 11.7. Allí se obtiene eventos (fallas) básicos:

- La válvula VC1 falla en posición abierta.
- El controlador TC1 falla. Aquí se puede seguir desarrollando el evento, para diferenciar que tal falla puede ser consecuencia de una falla del sensor, del sistema de transmisión, del comparador, o de otro elemento del hardware.
- Falla del sistema de alarma. Se puede deber a falla en cualquiera de los elementos que componen el sistema.
- Falla humana: el operador no cierra VC1, a pesar de oír la alarma.
- La válvula VC2 falla en posición cerrada.
- El controlador de VC2 falla. Corresponden las mismas consideraciones que para el caso del controlador TC1.

Se observa que el daño al reactor se puede verificar por la ocurrencia simultánea de una falla en ambas válvulas. Como eventos básicos se identifican 6 posibles fallas, todas las cuales pueden dar origen a nuevos árboles de fallas.

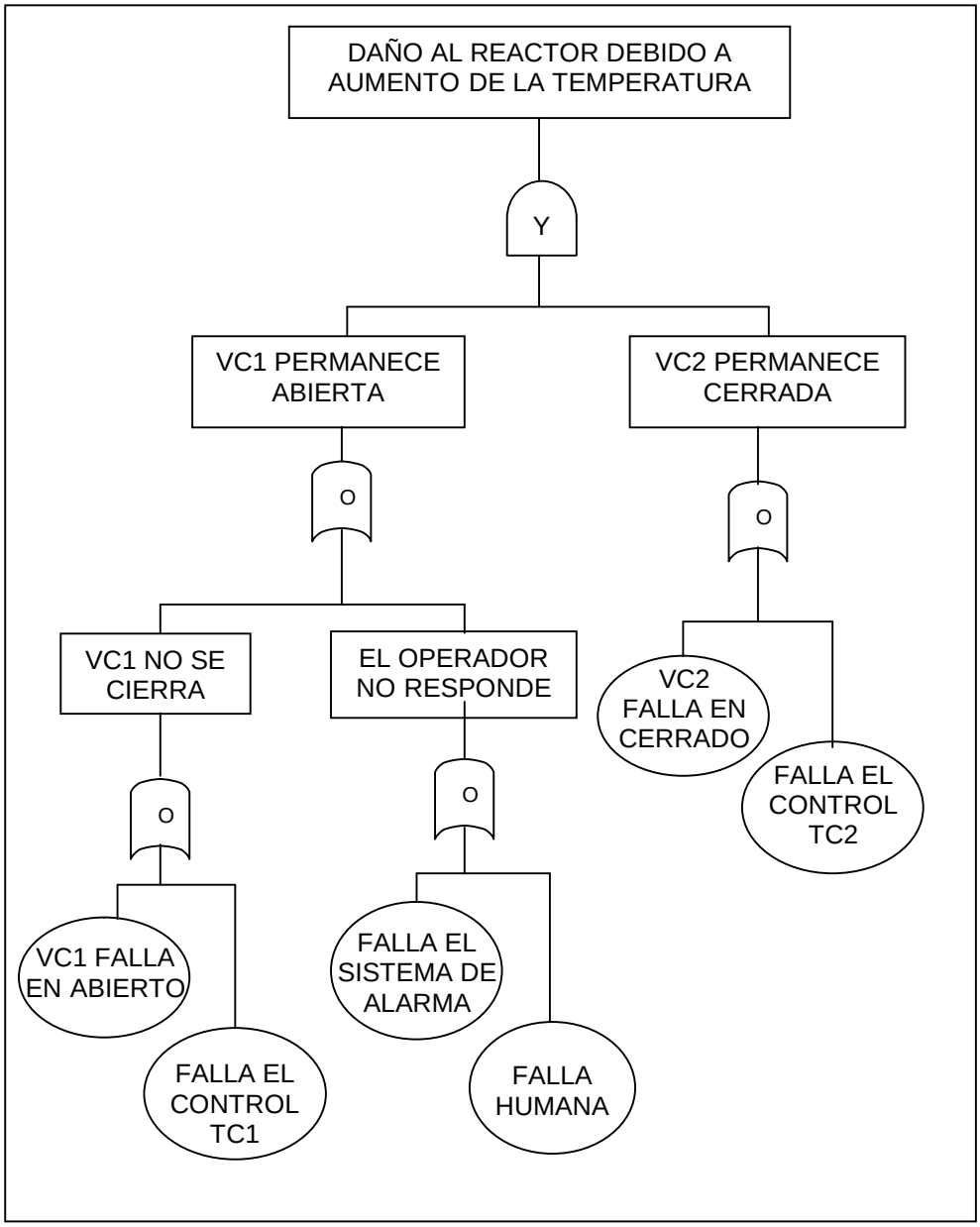



**FIGURA 11.6: ÁRBOL DE FALLA PARA REACTOR DE LA FIGURA 11.5**

### 11.3.6) Análisis del Árbol de Eventos

**El *Análisis del Árbol de Eventos*** (ETA, Event Tree Analysis) evalúa las consecuencias que tienen lugar a partir de un evento determinado. Hace énfasis en un evento inicial que ya ha ocurrido y se construye un árbol lógico que evoluciona hacia un efecto final. El evento iniciador puede ser cualquier desviación importante provocada por la falla de un equipo o por error humano. Al igual que el FTA y el FMEA, este método se utiliza para cuantificación de riesgos (estimación de la probabilidad de ocurrencia).

El análisis de árbol de eventos se desarrolla de acuerdo con el siguiente esquema:

- ***Identificación de eventos iniciadores relevantes***: Éstos pueden ser cualquier desviación importante, provocada por una falla de equipo o por un error humano. Las consecuencias de tal evento iniciador pueden variar de acuerdo a las medidas de seguridad implícitas en el sistema, la respuesta de los operadores, u otras circunstancias presentes en el instante de ocurrencia del evento iniciador. Es importante seleccionar el evento iniciador a una distancia no muy cercana al accidente final. Por ejemplo, se puede suponer como iniciador una insuficiencia en el sistema de refrigeración del reactor exotérmico (lo que eventualmente podría derivar en una explosión).
- ***Identificación de las funciones de seguridad diseñadas para responder al evento iniciador***: Estas medidas son altamente relevantes ya que su función es evitar la propagación del evento iniciador. Por ejemplo, los sistemas de control pueden tener contemplada la detención del flujo de alimentación al reactor ante un aumento de la temperatura, sistemas de alivio de presión, inyección de supresores de explosión, etc., que eviten una respuesta catastrófica del sistema.
- ***Construcción del árbol de eventos***: Una vez completadas las dos etapas anteriores, se debe hacer el seguimiento de los eventos hasta los efectos finales.
- ***Descripción de las cadenas de eventos resultantes***.

Estas últimas etapas son muy importantes cuando este método se utiliza en el contexto de la cuantificación de riesgos, ya que permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los cursos de acción, así como sus consecuencias.

En los métodos de identificación de peligros mencionados anteriormente, se trabaja con escenarios posibles para cada equipo o unidad de proceso. Es importante, por lo tanto, establecer algunos criterios básicos para discriminar acerca de la factibilidad o credibilidad de un escenario determinado.

Generalmente se reconoce los siguientes criterios:

1. Todos los eventos ***individuales*** que pueden suceder, son escenarios creíbles.

   Ejemplo
   Que se bloquee en posición cerrada la válvula de alimentación a un reactor.
   Que un operario cometa un error.
   Que falle un sensor de pH.

2. Aquellos que requieren de la ***ocurrencia simultánea*** de dos o más hechos ***independientes*** no son escenarios creíbles.

   Ejemplo
   Que fallen simultáneamente dos sistemas de refrigeración alternativos.
   Que fallen simultáneamente las dos bombas de alimentación alternativas.
   Que fallen simultáneamente los dos operadores encargados del control manual de un proceso.

3. Los escenarios que requieren una ***secuencia*** de más de dos hechos ***independientes*** no son creíbles.

   Ejemplo
   Que falle el sistema de alarma contra incendios, que se bloquee el acceso del carro lanza agua y luego, que falle el suministro de agua.

No sólo es importante identificar el peligro potencial, sino que se debe estudiar los mecanismos o secuencias de eventos que dan lugar al accidente. En general, entre el evento iniciador y el accidente, se encuentra una secuencia de hechos que tienden a propagar y/o evitar el accidente. Dichos mecanismos de propagación y las acciones mitigantes (ej.: respuesta por parte de los operadores y de los sistemas de control de accidentes) se esquematizan en la Tabla 11.7.

La secuencia mostrada en la Tabla 11.7 puede ser utilizada como herramienta para identificar los eventos que tienen lugar desde el evento iniciador hasta la materialización del accidente.

**TABLA 11.7: SECUENCIA TÍPICA DE UN ACCIDENTE**

| CIRCUNSTANCIAS PELIGROSAS | EVENTOS INICIADORES | CIRCUNSTANCIAS PROPAGADORAS | CIRCUNSTANCIAS MITIGANTES | ACCIDENTE |
|---|---|---|---|---|
| **Almacenamiento de cantidades importantes de sustancias peligrosas** (materiales inflamables, combustibles, inestables, tóxicos. Materiales a condiciones de presión y temperatura extremas)<br><br>**Materiales altamente reactivos** (insumos químicos, productos, subproductos, compuestos intermedios)<br><br>**Reacciones químicas (exotérmicas, endotérmicas) muy sensibles a parámetros del proceso o impurezas** (sistemas catalíticos, baja energía de activación, sensible a pH)<br><br>**Alto Voltaje**<br><br>**Radiaciones** | **Falla de equipo de proceso y maquinarias** (bombas, válvulas, instrumentos, sensores)<br><br>**Fallas de sistemas de contención** (cañerías, uniones, sellos, tanques de almacenamiento, recipientes)<br><br>**Errores humanos** (operación, revisiones, mantenimiento)<br><br>**Pérdida de servicios** (agua, electricidad, aire comprimido, vapor)<br><br>**Agentes externos** (sismos, inundaciones, tormentas, vientos, impactos, atentados)<br><br>**Errores de información o de procedimiento** | **Desviaciones en parámetros de proceso** (P, T, flujos, concentraciones)<br><br>**Fallas de contención** (cañerías, sellos, uniones, fuelles, recipientes, tanques de almacenamiento, venteos)<br><br>**Emisiones de materiales peligrosos**<br><br>**Ignición / explosión**<br><br>**Errores humanos**<br><br>**Agentes externos** (sismos, tormentas, vientos, inundaciones, impactos, atentados)<br><br>**Errores de información o de procedimiento** | **Respuestas de seguridad** (válvulas de alivio, servicios de reserva, sistemas o componentes redundantes)<br><br>**Mitigación** (venteos, antorchas, rociadores)<br><br>**Operaciones de emergencia** (alarmas, procedimientos de emergencia, equipos de protección personal, evacuación)<br><br>**Respuestas de control y de los operadores**<br><br>**Flujo adecuado de información**<br><br>**Agentes externos** | **Incendios**<br><br>**Explosiones**<br><br>**Impactos**<br><br>**Fuga y dispersión de materiales peligrosos** (compuestos tóxicos o de alta reactividad) |

### 11.3.7) Índices de Riesgo: Índice Dow de Fuego y Explosión (IIE)

El ***Índice DOW de Fuego y Explosión*** (IFE) permite jerarquizar los riesgos asociados a incendios y explosiones, de diferentes unidades. El método se puede aplicar tanto a unidades individuales (ej.: bomba, compresor, tanque de almacenamiento, reactor), como a agrupaciones de unidades de proceso que representen una clara unidad funcional. Las unidades se seleccionan de acuerdo a su impacto potencial, debido al tipo de materiales que procesan, la cantidad de compuestos peligrosos (presión, temperatura, pH), historial de problemas de seguridad, etc.. El Índice Dow se calcula para todas las unidades pertinentes, a partir de factores que reflejan las características de los materiales utilizados y de las condiciones del proceso: el *factor de material y* el *factor de riesgo:*

**Índice DOW de Fuego y Explosión = (Factor de Material) × (Factor de Riesgo)**

***Factor de material***: Éste es un número comprendido entre 1 y 40, asignado a un compuesto, de acuerdo a su potencial intrínseco para liberar energía en un incendio o en una explosión. Estos parámetros incluyen: calor de reacción (combustión), índices de reactividad química, índices de peligrosidad para la salud, inflamabilidad, punto de destello (*flash*), y temperatura de ebullición. La Tabla 11.8 ilustra algunos valores de factores de materiales (FM) para compuestos típicos:

**TABLA 11.8: FACTOR DE MATERIAL PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DOW**

| COMPUESTO | FM | COMPUESTO | FM |
|---|---|---|---|
| Acetaldehído | 24 | Etileno | 24 |
| Acido acético | 14 | Etilenglicol | 4 |
| Acetona | 16 | Formaldehído | 24 |
| Acetileno | 40 | Gasolina | 16 |
| Acroleína | 24 | Glicerina | 4 |
| Amoníaco | 4 | Fenol | 4 |
| Benceno | 21 | Hidrógeno | 21 |
| n-Buteno | 21 | Isopropanol | 16 |
| Cloro | 1 | Metano | 21 |
| Cloroformo | 1 | Metanol | 16 |
| Ciclohexano | 16 | Monóxido de Carbono | 16 |
| Dimetilamina | 21 | Piridina | 24 |
| Estireno | 24 | Propano | 21 |
| Etano | 21 | Tolueno | 16 |
| Etanol | 16 | Trietilamina | 16 |
| Etanolamina | 4 | Xileno | 16 |

***Factor de riesgo de la unidad***: Es un número entre 1 y 8, calculado como el

producto de dos factores de riesgo:

- ***Riesgos generales del proceso*** (considera la presencia de reacciones exotérmicas o la realización de carga y descarga).
- ***Riesgos especiales del proceso*** (ej.: la operación cerca del intervalo de inflamabilidad o a presiones distintas de la atmosférica).

Estos factores son asignados como penalidades, de acuerdo a los criterios señalados en la guía Dow[6] y resumidos en la Tabla 11.9, siguiente:

**TABLA 11.9: CÁLCULO DEL FACTOR DE RIESGO DE LA UNIDAD**

| CÁLCULO DEL FACTOR DE RIESGO DE LA UNIDAD | PENALIZACIÓN |
|---|---|
| **Riesgos Generales de Proceso:** | |
| • Valor Base | 1,00 |
| • Reacciones químicas exotérmicas | 0,30 – 1,25 |
| • Procesos endotérmicos | 0,20 – 0,40 |
| • Manejo y conducción de productos | 0,25 – 1,05 |
| • Unidades encerradas o cubiertas | 0,25 – 0,90 |
| • Accesos | 0,35 |
| • Drenajes y control de derrames | 0,25 – 0,50 |
| **Riesgos especiales del proceso**: | |
| • Valor base | 1,0 |
| • Materiales tóxicos | 0,20 – 0,80 |
| • Presión subatmosférica (<500 mm Hg) | 0,50 |
| • Operación cerca del límite de inflamabilidad: | |
| Tanques de almacenamiento de líquidos inflamables | 0,50 |
| Problema de proceso o falla de purga | 0,30 |
| Siempre en el intervalo de inflamabilidad | 0,80 |
| • Explosión de polvo | 0,25 – 2,00 |
| • Presión | ver guía Dow |
| • Baja temperatura | 0,20 – 0,30 |
| • Cantidad de productos inflamables: Sólidos, líquidos, gases y productos reactivos en proceso, o en almacenamiento. | ver guía Dow |
| • Corrosión y erosión | 0,10 – 0,75 |
| • Fugas, juntas y cierres | 0,10 – 1,50 |
| • Uso de calentadores con llama | ver guía Dow |
| • Sistemas de aceite térmico | 0,15 – 1,15 |
| • Equipo rotativo | 0,50 |

El IFE es un valor entre 1 y 320 permite estimar el área de exposición y el máximo

[6] Dow Chemical Company – AIChE; "Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide", 6ª ed., AIChE, New York (1987)

daño probable a la propiedad debido al incendio o explosión. El área de exposición es un círculo ideal, en cuyo interior se manifestarían los efectos destructivos, derivados de una explosión o un incendio de la unidad de proceso evaluada. El radio de este círculo se calcula como:

$$\textbf{Radio (m)} = \textbf{0,256} \times \textbf{IFE}$$

Para mayor información, se recomienda consultar directamente en la literatura publicada por Dow Chemicals, donde se actualiza los diferentes valores en forma periódica. Este método puede ser de mucha ayuda en la estimación de las consecuencias derivadas de la explosión o incendio de una instalación química.

Para ilustrar el método consideremos el almacenamiento de 25.000 toneladas de etileno líquido en un estanque refrigerado (menores que -103,8) a presión atmosférica.

- Factor de material para el etileno (Tabla 11.8) = 24
- Riesgos Generales (Tabla 11.9) = 1,5
  - Valor de base (1,0)
  - No se tiene reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas
  - No hay manejo o conducción de productos
  - Unidad cubierta (penalización 0,25)
  - Se considera que no hay problemas de acceso
  - Se tiene control de derrames (penalización 0,25)
- Riesgos Especiales del Proceso (Tabla 11.9) = 4,0
  - Valor base (1,0)
  - Materiales tóxicos (0,2)
  - No trabaja a vacío
  - Operación cerca del límite de inflamabilidad (0,5)
  - No procede penalizar por explosión de polvo.
  - Para presión atmosférica (por tratarse de un gas inflamable licuado), se recomienda una penalización de 0,2
  - No cabe penalizar por baja temperatura, ya que se supone un estanque con materiales apropiados.
  - Cantidad de materiales inflamables. La guía Dow recomienda una penalización de 2 para este caso.
  - Se considera una corrosión mínima (0,1)
  - El resto de los ítemes no se consideran relevantes en este ejemplo.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Factor de Riesgo de la Unidad | = | 1,5 x 4,0 | = | 6 |
| Indice de Fuego y Explosión | = | 24 x 6,0 | = | 144 |
| Radio del área de exposición | = | 144 x 0,256 | = | 37 metros |

## 11.4) ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

Las consecuencias de un accidente son difíciles de predecir con exactitud, ya que dependen de las circunstancias específicas que rodean al evento. Los métodos para predecir las consecuencias de un accidente varían en nivel de complejidad y precisión. En términos generales, las consecuencias de un incendio, una explosión, el derrame de líquidos, una fuga de gases peligrosos, una descarga eléctrica, u otro accidente, dependen principalmente de:

- La naturaleza y cantidad de energía liberada.
- La naturaleza y cantidad de sustancias peligrosas liberadas.
- Presencia de otras circunstancias peligrosas en el área afectada.
- Tipo y velocidad de la respuesta después de la ocurrencia del accidente.
- Las condiciones ambientales locales (ej.: condiciones meteorológicas, sistema hidrológico local).
- La extensión territorial afectada.
- El número de personas expuestas y su nivel de vulnerabilidad.
- Las características de los bienes en el área expuesta y su nivel de vulnerabilidad.

Para lograr una completa evaluación de las consecuencias, se requiere información en detalle de cada uno de estos elementos. Más aún, se necesita utilizar modelos que permitan predecir el transporte de las sustancias y de la energía liberada. Esto último es materia que requiere un mayor nivel de especialización acerca de los tipos de modelo disponibles. No es el objetivo de este texto profundizar en este tema, por lo que se entregarán las referencias bibliográficas que puedan servir de fuente de información para estudios más detallados.

A continuación, se presenta algunos criterios para determinar las consecuencias derivadas de un accidente, con vistas a un análisis preliminar.

### 11.4.1) Análisis Preliminar de Consecuencias

En general, un análisis riguroso de las consecuencias requiere de información precisa acerca de las circunstancias del potencial accidente. Es conveniente, en una primera aproximación, obtener una estimación preliminar con vistas a identificar aquellos casos con mayores consecuencias previsibles.

Uno de los métodos más sencillos consiste en establecer las consecuencias (severidad del daño) en base a criterios que consideren el daño potencial a la salud de las personas, propiedad, medio ambiente, imagen de la empresa, u otro aspecto que se considere valioso por parte de quienes llevan a cabo el análisis.

A continuación se presenta tres ejemplos representativos de categorización de consecuencias, para su utilización en análisis preliminares. El método mostrado en BS 8800 valora el daño a las personas, en base a las partes del cuerpo potencialmente afectadas y a la naturaleza del daño. Por su parte, el método propuesto por Zürich Insurance incluye también los criterios de daño a la propiedad y a la imagen de la empresa. Por último, el método propuesto por UNEP incluye los daños a la salud de las personas, medio ambiente y a la propiedad.

**MÉTODO ILUSTRADO EN BS 8800[7]**

| SEVERIDAD DEL DAÑO | CRITERIOS |
|---|---|
| Daño Leve | Heridas superficiales, cortes menores, irritación ocular, dolor de cabeza, molestias menores. |
| Daño Moderado | Laceraciones, quemaduras moderadas, fracturas menores, problemas de audición, dermatitis. |
| Daño Extremo | Amputación, mutilación, fracturas mayores, envenenamiento, ceguera, heridas múltiples, heridas fatales, enfermedades fatales. |

**MÉTODO ZÜRICH[8]**

| SEVERIDAD DEL DAÑO | CRITERIOS |
|---|---|
| Daño Insignificante | Lesiones menores, pérdida menor de imagen a la empresa, daño menor a la propiedad. |
| Daño Marginal | Lesiones, pérdida temporal de imagen, pérdida económica menor. |
| Daño Crítico | Lesiones severas con incapacidad parcial, pérdida considerable de imagen, considerable pérdida económica. |
| Daño Catastrófico | Muerte, incapacidad total, gran pérdida de imagen, grandes pérdidas económicas. |

[7] British Standard, "Guide to Occupational Health and Safety Management Systems", BSI. Londres (1996)

[8] Zogg H.A., "Zürich Hazard Analysis", Zürich Insurance Company, Zürich, Suiza (1987)

**MÉTODO UNEP[9]:**

| **CONSECUENCIAS PARA LAS PERSONAS** | **CRITERIOS** |
|---|---|
| Daño Insignificante | Molestias menores |
| Daño Limitado | Heridas menores |
| Daño Serio | Algunas heridas serias, molestias mayores |
| Daño Muy Serio | Muertes (<5), varios heridos (<20), evacuación (<500) |
| Daño Catastrófico | Varias muertes (>5), cientos de heridos y evacuados (>500) |
| **CONSECUENCIAS PARA EL MEDIO AMBIENTE** | **CRITERIOS** |
| Daño Insignificante | Efectos locales, no producen contaminación |
| Daño Limitado | Efectos locales, producen contaminación simple |
| Daño Serio | Efectos regionales, contaminación simple |
| Daño Muy Serio | Efectos locales, contaminación seria |
| Daño Catastrófico | Efectos regionales, contaminación seria |
| **CONSECUENCIAS PARA LA PROPIEDAD** | **CRITERIOS** |
| Daño Insignificante | Daños menores de US$ 500.000 |
| Daño Limitado | US$500.000 – 1.000.000 |
| Daño Serio | US$1.000.000 – 5.000.000 |
| Daño Muy Serio | US$5.000.000 – 20.000.000 |
| Daño Catastrófico | Daños mayores de US$20.000.000 |

En algunos casos, estas categorías de daños se pueden asociar a una escala numérica relativa, por ejemplo:

| | |
|---|---|
| 1 | Daño Insignificante |
| 2 | Daño Limitado |
| 3 | Daño Serio |
| 4 | Daño Muy Serio |
| 5 | Daño Catastrófico |

Los ejemplos mostrados anteriormente son ilustrativos de las diferentes opciones para clasificar los daños con vistas a un análisis de consecuencias. Es importante seleccionar o desarrollar una clasificación de consecuencias que se acomode a la situación particular a evaluar.

[9] UNEP, "Hazard Identification and Evaluation in a Local Community", Technical Report N° 12, United Nations Environment Programme, UN Publications, Paris (1992)

### 11.4.2) Análisis de Consecuencias: Casos Específicos

Los incendios, las explosiones y las emisiones de sustancias tóxicas constituyen los accidentes más frecuentes y destructivos de la industria de procesos.

Desde el punto de vista del análisis de riesgo, la evaluación de consecuencias requiere que se conozcan las circunstancias específicas que rodean al escenario en que ocurre el evento. Su enfoque cuantitativo es complejo y requiere de modelos matemáticos para predecir los efectos de estos accidentes. Dado su alto nivel de especialización, estos modelos no serán abordados aquí y se recomienda al lector interesado consultar la referencia de Santamaría y Braña, mencionada en secciones anteriores.

A continuación, se presenta las principales características asociadas a los accidentes debido a incendios, explosiones y emisiones de compuestos tóxicos.

#### a) Incendios

La combustión es un proceso de oxidación química que libera calor. El fuego es una consecuencia visible de este proceso en ciertas circunstancias. En general, la combustión convencional ocurre en la fase vapor, lo que significa que los líquidos deben evaporarse o los sólidos descomponerse en sustancias volátiles, antes de entrar en combustión. Es frecuente que un incendio derive rápidamente en una explosión.

De acuerdo a datos citados por Santamaría y Braña (1994), los materiales inflamados con mayor frecuencia en incendios industriales son: madera o papel (27,9%), líquidos inflamables o combustibles (22,1%), substancias químicas, metales o plásticos (15,7%), textiles (19,3%), productos naturales (9,6%), gas (6,4%), sólidos volátiles (5,4%), y materiales aceitosos (2,2%).

Para estimar las consecuencias de un incendio se requiere conocer la cantidad de material inflamable involucrado, sus características de inflamabilidad y las condiciones que rodean el evento.

Aparte de la energía calórica liberada, la generación de humos y gases tóxicos representa un importante peligro asociado, ya que estos pueden ser transportados por el viento a distancias considerables. Entre los gases liberados durante los incendios industriales, el monóxido de carbono es el que reviste el mayor peligro inmediato, debido a su alto nivel de toxicidad y explosividad. También se generan importantes cantidades de cianuro de hidrógeno (ej. en la combustión de productos sintéticos, tales como poliuretano, melamina, nylon). En muchos casos, un incendio puede dar origen a una explosión o a derrames de aguas contaminadas, derivadas de la acción para combatir el fuego. Un ejemplo ilustrativo es el caso del incendio de una bodega de la Planta Sandoz en Suiza (octubre 1986), donde se utilizó grandes cantidades de agua para combatir el fuego que amenazaba a 1.000 toneladas de líquidos altamente inflamables, evitando así una catástrofe. Desgraciadamente, el agua utilizada en el combate al fuego se contaminó con los pesticidas y otras sustancias químicas derramadas durante el incendio,

provocando una seria contaminación del río Rin, dañando la biota acuática y afectando el suministro de agua potable de millones de personas.

Un incendio requiere de la presencia de 3 elementos básicos :

- Combustible.
- Comburente (agente oxidante; ej.: $O_2$, $Cl_2$, $NO_2$).
- Fuente de ignición (ej.: chispa, llama, superficie caliente).

Si falta cualquiera de estos elementos, el incendio no puede producirse. Obviamente, un incendio no puede producirse si no hay combustible o si no está en la proporción y cantidad requerida.

A continuación, se define algunos términos de uso común en el análisis de consecuencias de incendios.

***Inflamabilidad*** *:* Hace referencia a la menor o mayor facilidad con que una sustancia puede arder en aire o en algún otro tipo de gas que puede servir como comburente (es decir, agente oxidante).

***Intervalo de Inflamabilidad****:* Se refiere al intervalo de concentraciones de combustible dentro del cual una mezcla gaseosa puede arder al entrar en contacto con una fuente de ignición.

***Límite Inferior de Inflamabilidad****:* Se refiere a la concentración límite de combustible en la mezcla de gas, debajo de la cual no existe suficiente combustible como para propagar la combustión lejos de la fuente de ignición.

***Límite Superior de Inflamabilidad***: Se refiere a la concentración límite de combustible en una mezcla gaseosa, sobre la cual no existe suficiente comburente como para que la reacción se propague.

***Punto de Destello (Flash****)*: Es la temperatura mínima a cual debe estar un líquido (o sólido) combustible, para que los vapores producidos formen una mezcla con aire cerca de la superficie, que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad.

***Temperatura de Autoignición****:* Es la temperatura a la cual una sustancia inflamable es capaz de quemarse en aire sin una fuente de ignición "externa", es decir, a partir del propio nivel térmico de la mezcla gaseosa o por contacto con una superficie caliente.

Los límites de inflamabilidad de la Tabla 11.10 corresponden a condiciones en aire estándar. Dichos límites son dependientes de la temperatura. A mayor temperatura, mayor es la diferencia entre los límites inferior y superior: un incremento de 100°C en la temperatura eleva el límite superior en aproximadamente 10%.

**TABLA 11.10: CARACTERÍSTICAS DE INFLAMABILIDAD DE ALGUNOS COMPUESTOS DE USO INDUSTRIAL**

| SUSTANCIA | LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD (% V/V) | LÍMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDAD (% V/V) | TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN °C | PUNTO DE DESTELLO °C |
|---|---|---|---|---|
| Acetaldehído | 4 | 60 | 175 | -38 |
| Acetona | 2,5 | 13 | 538 | -18 |
| Acetileno | 2,5 | 90 | 305 | - |
| Benceno | 1,3 | 7,9 | 562 | -11,1 |
| Butano | 1,6 | 8,4 | 405 | -60 |
| Estireno | 1,1 | 6,1 | 490 | 31,1 |
| Etano | 3 | 12,5 | 515 | -135 |
| Etanol | 3,3 | 19 | 423 | 12,8 |
| Etileno | 2,7 | 36 | 490 | -121 |
| Formaldehído | 7 | 73 | 430 | -67,2 |
| Hexano | 1,1 | 7,5 | 225 | -26 |
| Hidrógeno | 4 | 75 | 400 | - |
| Metano | 5 | 15 | 538 | -188 |
| Propano | 2,1 | 9,5 | 450 | < - 104 |
| Propileno | 2,4 | 11 | 460 | -108 |
| Tolueno | 1,2 | 7 | 536 | 4,4 |

La concentración de oxígeno en el sistema no tiene mayor efecto sobre el límite inferior de inflamabilidad, ya que éste se encuentra en exceso bajo esas condiciones. Por otra parte, al aumentar la concentración de oxígeno, se incrementa significativamente el límite superior de inflamabilidad.

La concentración de comburente también juega un papel importante en el proceso de combustión. Si su concentración es demasiado baja, no se genera suficiente energía calórica como para elevar la temperatura de la mezcla hasta niveles que permitan la propagación de la llama. Este aspecto es de vital importancia en el diseño de sistemas de control de fuego en base a inertización. Tal es el caso de la utilización de gases inertizantes (ej.: vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono) para evitar la formación de mezclas inflamables en estanques de almacenamiento de combustibles; dichos gases permiten diluir el oxígeno presente por debajo de su concentración mínima.

Además de los parámetros mencionados anteriormente, la inflamabilidad de un material está determinada por la energía de ignición, la velocidad de combustión, el calor de combustión, la viscosidad (en el caso de líquidos), el punto de fusión (en el caso de sólidos), la relación C/H, etc. Las características de inflamabilidad establecidas por la NFPA[10], son las siguientes:

**TABLA 11.11: GRADOS DE INFLAMABILIDAD DE ACUERDO A NFPA**

| GRADO DE INFLAMABILIDAD | CARACTERÍSTICAS |
|---|---|

[10] NFPA : National Fire Protection Association, EEUU.

| | |
|---|---|
| 0 | Materiales que no arden cuando están expuestos a temperatura de 815°C, en aire durante 5 minutos. |
| 1 | Materiales que requieren de precalentamiento para arder. Arden antes de 5 minutos al exponerlos a aire a 815°C. Líquidos y sólidos con punto de destello mayor de 93,4°C |
| 2 | Materiales que no forman mezclas inflamables en contacto con aire en condiciones estándar, pero que sí pueden arder a temperaturas mayores. Líquidos con punto de destello entre 37,8 y 93,4°C. |
| 3 | Materiales que pueden arder bajo condiciones ambientales estándar, cuando son sometidos a ignición. Sólidos que arden fácilmente por contener oxígeno en su molécula |
| 4 | Materiales que se vaporizan rápidamente en condiciones ambientales estándar dando origen a una combustión rápida. Materiales con punto de destello menor de 22,8°C. Gases y vapores que se pueden dispersar con facilidad en aire, formando mezclas explosivas. |

Para que ocurra la ignición, es necesario suministrar la energía mínima de ignición. Dicha energía característica varía con las condiciones de presión y composición de la mezcla combustible/comburente. Típicamente, la energía de ignición es de alrededor de 0,25 mJ (la chispa eléctrica de un interruptor es del orden de 20 mJ).

Las principales fuentes de ignición causantes de incendios en la industria incluyen:

- Superficies calientes.
- Llamas de quemadores.
- Otras llamas desnudas (ej.: antorchas).
- Equipos eléctricos.
- Instalaciones eléctricas.
- Electricidad estática.
- Operaciones de soldadura (arco, llama, metal caliente).
- Ignición por causas mecánicas (colisión de superficies metálicas).
- Ignición espontánea.
- Microondas.
- Chispas y calor debido a fricción.
- Fósforos e ignición intencionada.

Especial consideración debe tenerse en relación con los equipos eléctricos, instalaciones eléctricas y acumulación de cargas electrostáticas. Esta última suele originarse en sistemas donde se produce contacto y luego separación de materiales, generando exceso de electrones en uno de ellos. En los sistemas sólido-fluído, sólido-sólido y fluído-fluído, se genera frecuentemente cargas estáticas que pueden constituir una peligrosa fuente de ignición.

La compresión de una mezcla de gases combustible-comburente puede dar origen a ignición, ya que el incremento de presión genera un aumento de temperatura en la mezcla cuando la relación de compresión es alta y no se elimina el calor generado.

**b) Explosiones**

Una explosión es un proceso físico-químico que ocurre a gran velocidad, liberando energía en forma súbita y violenta. Las explosiones se clasifican de acuerdo al tipo de energía que las origina. Aquí interesan las explosiones físicas y químicas:

- ***Explosiones físicas***: Producidas por la liberación de energía de presión: en este caso se libera súbitamente la energía potencial de un gas comprimido. Ello puede ocurrir a causa de una falla mecánica en el recipiente de contención, o un súbito incremento de la presión del gas almacenado (debido a calentamiento externo, compresión accidental). Por ejemplo, explosión debido a la ruptura catastrófica de un cilindro de gas a presión, o a la ruptura por calentamiento externo de un estanque de almacenamiento de un líquido volátil o gas comprimido. Cuando sólo hay gas presente, no inflamable, se formarán ondas de choque y, posiblemente, proyectiles (trozos del recipiente colapsado).

- ***Explosiones químicas****:* Debidas a la liberación de energía química; son causadas por una reacción química de oxidación, altamente exotérmica y extremadamente rápida, que produce una súbita elevación de la temperatura y/o un gran aumento de la concentración local de gases. La energía liberada en una explosión química depende de la naturaleza y estado físico de los reactantes y productos. En este sentido, es importante distinguir entre:

    - Explosiones de mezclas de vapores combustibles con un comburente (generalmente, aire).
    - Explosiones de materiales que contienen en si mismos el comburente (ej.: TNT), por lo que la explosión se puede producir en ausencia de aire.

Si una mezcla homogénea de vapor en condiciones de inflamabilidad, entra en ignición sin que existan restricciones externas, se genera un frente de llama que se propaga esféricamente desde el punto de ignición hacia el resto de la nube. La combustión produce un aumento de temperatura y, generalmente, de la cantidad de moles de gas a medida que la reacción transcurre. Debido a la alta velocidad del proceso, la presión local aumenta abruptamente sin que se equilibre con la presión del entorno (a diferencia de lo que ocurriría en un incendio, donde la velocidad de reacción es más lenta y permite la disipación del aumento de presión). La onda de presión que se genera se propaga (a la velocidad del sonido) hacia la mezcla que aún no ha reaccionado. Ello tiene lugar al mismo tiempo que el frente de llama se expande a través de la mezcla inflamable.

La relación entre la velocidad de propagación de la llama y la velocidad de la onda de presión determina dos tipos de explosiones químicas:

- ***Deflagración***: Es una explosión química donde la velocidad de combustión es menor que la velocidad de la onda presión (velocidad del sonido). La mayoría de las explosiones de mezclas inflamables en la

industria química son deflagraciones.

- ***Detonación***: Es una explosión química donde la velocidad de combustión es mayor que la velocidad de la onda de presión. Las detonaciones ocurren a velocidades mayores que la velocidad del sonido.

La presiones generadas por las detonaciones son más altas que las producidas por las deflagraciones, y tiene efectos más destructivos.

Al ocurrir una explosión física, ésta puede transformarse en una explosión química, cuando el gas involucrado es combustible y forma una mezcla dentro del intervalo de inflamabilidad. De aquí se puede generar una explosión de nube de vapor no confinada (EVNC). La EVNC produce una onda de presión y probablemente proyectiles, con efectos térmicos de menor importancia. Si las características de inflamabilidad no son suficientes para provocar una EVNC, el evento deriva en un incendio *flash*, donde el principal efecto es debido a la radiación térmica.

Cuando la explosión física involucra líquido y vapor, el efecto depende de la temperatura del líquido. Si ésta es menor que su temperatura de ebullición, en la explosión participa la sustancia que está en fase vapor y su evolución es similar a la anterior. Por otra parte, si la temperatura del líquido es mayor que su temperatura de ebullición a la presión del entorno, la explosión física inicial que rompe el recipiente produce una brusca caída de la presión del estanque, generando una evaporación masiva del líquido sobrecalentado, dando origen a una explosión donde un líquido hirviendo genera una fase vapor en expansión, conocida como BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Este tipo de explosiones tiene un gran poder destructivo, ya que la violenta evaporación del líquido genera un fuerte incremento de presión. Si la concentración del vapor está dentro de los límites de inflamabilidad, se puede producir la reacción de combustión. La ignición de una BLEVE da origen a una masa de gases a alta temperatura, conocida como “esfera de fuego”, que presenta un fuerte efecto de radiación térmica. La causa más común de explosiones BLEVE es el incendio externo, que calienta la pared del recipiente reduciendo su resistencia mecánica, lo que deriva en su eventual colapso. En otros casos, la ruptura puede ser provocada por una sobrepresurización accidental, falla de material, o reacciones fuera de control.

Con frecuencia, la ruptura explosiva del recipiente puede significar que fragmentos de éste sean lanzados a grandes distancias, tal como, en la explosión de los Alfaques, donde un trozo de 5 toneladas del camión cisterna se encontró a más de 200 m del lugar del accidente.

En el caso de explosiones confinadas, es decir, aquellas que ocurren dentro de recipientes, edificios, silos, etc., se puede producir violentos efectos de presión, proyectiles y radiación térmica. La presión máxima alcanzada en la explosión confinada y la velocidad de aumento de la presión son los dos parámetros claves que determinan las consecuencias de la explosión.

Entre los accidentes más importantes ocurridos en la industria de procesos se encuentran las explosiones de nubes de vapor no confinadas. Dicha nube de vapor se puede formar a partir del colapso de un recipiente conteniendo un líquido volátil inflamable, o debido a la fuga de un gas inflamable. El poder destructivo de la explosión está determinado por el tiempo transcurrido entre el instante en que comienza la emisión y el momento de la ignición. Si dicho tiempo es muy corto, el tamaño de la nube inflamable es muy pequeño, por lo que las consecuencias de la explosión serán menores. Si la duración de la emisión antes de la ignición es más larga, mayor será el tamaño de la nube explosiva produciendo mayores daños. Sin embargo, si el tiempo transcurrido antes de la ignición es muy largo, la mayor parte de los vapores emitidos se habrá diluido hasta concentraciones por debajo del límite inferior de inflamabilidad, por lo que los efectos serán mucho menores.

**c) Escape de Sustancias Peligrosas**

Para estimar las consecuencias del escape de sustancias peligrosas, se necesita conocer las características de las sustancias, la cantidad involucrada y las condiciones que afectan su transporte en el ambiente. Por ejemplo, para conocer los efectos de una nube tóxica se requiere estimar el mapa concentración-distancia-tiempo, para así determinar la vulnerabilidad de las personas. Para ello se utilizan modelos matemáticos que permiten predecir el destino de los contaminantes en el ambiente y sus efectos sobre las personas y el entorno.

Aquí revisaremos brevemente la dispersión de gases y vapores en la atmósfera. Las emisiones gaseosas y de compuestos volátiles sufren dispersión en la atmósfera, que tiende a reducir su concentración. De acuerdo con la continuidad de la emisión, estas se pueden clasificar como:

- ***Emisiones instantáneas***: Son aquellas en las que el tiempo necesario para que el material emitido alcance a un receptor situado a una distancia determinada, es mucho mayor que el tiempo requerido para la descarga de todo el material.
- ***Emisiones continuas***: El tiempo de emisión es mucho más largo que el tiempo para alcanzar un receptor ubicado. Generalmente, se considera que el sistema está en estado estacionario.
- ***Emisiones discontinuas****:* Corresponde a una situación en que existen emisiones intermitentes o continuas con cambios drásticos en la concentración, o en el caudal o en las condiciones atmosféricas.

Una emisión instantánea se dispersará en la dirección del viento, de modo que el centro de la descarga se alejará cada vez más del origen. El diámetro de la nube también irá aumentando, con una distribución de concentración al interior de la nube que muestra una mayor concentración en el centro y menores concentraciones en las partes externas.

En el caso de una emisión continua, se tiene una pluma que se aleja en la dirección del viento, cuya forma estará fuertemente determinada por las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, radiación solar, temperatura, estabilidad atmosférica, altura de la capa de inversión térmica, etc.) y por las

características de las sustancias. Como se discute en el Capítulo 3, este proceso va acompañado de mezcla entre el aire y los compuestos químicos, debida a la turbulencia, provocando la dilución y dispersión de los contaminantes a medida que se alejan del punto de emisión.

Los modelos matemáticos utilizados para describir la dispersión de gases y vapores en la atmósfera están ampliamente documentados en la literatura, y existen diferentes programas computacionales de libre acceso para fines de simulación y predicción. La mayoría de ellos se basa en el modelo de dispersión Gaussiano, que supone una distribución normal para la concentración de los contaminantes en la pluma. Hay diferentes versiones para dicho modelo, con distintos grados de sofisticación y requerimientos de información. Un aspecto crítico en todos ellos, son los coeficientes de dispersión utilizados, los que deben ser validados empíricamente cuando se requiera resultados con mayores niveles de confiabilidad.

### 11.4.3) Vulnerabilidad de Personas e Instalaciones

La vulnerabilidad de las personas se expresa como el número de individuos que probablemente pueden ser afectados con un cierto nivel de daño a causa de un accidente. El daño puede variar desde molestias y heridas menores hasta la muerte de los individuos afectados.

Por otra parte, la vulnerabilidad de las instalaciones se puede expresar en términos del daño físico sufrido por los edificios y equipamiento debido a un accidente. Dichos daños se pueden cuantificar en base a valores monetarios.
Las personas pueden sufrir daño producto de: la radiación térmica, impacto de proyectiles, por la onda de presión de una explosión, por inhalación, contacto con sustancias peligrosas, descargas eléctricas, etc. Dicho daño dependerá tanto de la cantidad y tipo de energía o sustancia peligrosa, como de las condiciones de protección que posean los individuos expuestos. Más aún, existen diferentes grados de tolerancia a tales circunstancias por parte de diferentes individuos; por ejemplo, la inhalación de gases irritantes puede provocar molestias menores en algunas personas, mientras que otras pueden presentar serias reacciones bronquiales obstructivas, con peligro de asfixia.

La mayoría de los modelos matemáticos para predecir la vulnerabilidad de las personas e instalaciones se basa en la función de probabilidad Probit (ver Santamaría y Braña (1984)), tal como se ilustra en un ejemplo más adelante. Tales modelos son muy útiles para determinar el nivel de daño causado cuando se conoce los detalles del evento accidental (ej.: radiación térmica emitida, dosis de material tóxico, sobrepresión generada por una explosión, etc.).

#### a) Vulnerabilidad frente a emisiones tóxicas

La amplia variabilidad de la respuesta de los seres vivos ante agentes externos se presenta en casi todas las poblaciones biológicas, lo que dificulta determinar con exactitud la vulnerabilidad de una población expuesta a un peligro.

La vulnerabilidad se puede estimar utilizando experiencias anteriores, donde se demuestre los efectos frente una cierta dosis del agente dañino.

La predicción de la vulnerabilidad de las personas frente a las emisiones tóxicas, depende de varios factores, tales como:

- Vías de entrada al organismo (ingestión oral, inhalación, contacto directo con la piel, ojos).
- Propiedades del material considerado y mecanismos de acción tóxica.
- Dosis de materia recibida, en términos de concentración y tiempo de exposición.
- Tipo de exposición: exposición súbita (alta concentración en poco tiempo) o exposición prolongada (baja concentración en tiempos largos)
- Variabilidad de la respuesta individual en una población expuesta a una misma dosis.

Ante la entrada de un agente tóxico, el organismo presenta varios mecanismos de respuesta que tienden a reducir su acción dañina:

- Excreción de la sustancia tóxica (a través de la orina, fecas, sudor).
- Transformación metabólica a sustancias menos tóxicas.
- Acumulación en tejidos grasos o en otras partes del organismo.

Respecto a la caracterización de la toxicidad de los materiales, existen diversos índices que pueden ser utilizados para determinar los efectos tóxicos frente a un nivel dado de exposición:

***$LC_{50}$*** : Indica la concentración del material en el aire que produce la muerte en el 50% de la población expuesta, durante un período especificado. En general, se considera que una exposición a una concentración $0{,}1 \times LC_{50}$ es suficiente para causar la muerte de un individuo.

***$LD_{50}$***: Indica la dosis que, administrada oralmente o a través de la piel o por inhalación, causa la muerte del 50% de los individuos expuestos, durante un período especificado. Se considera que una dosis de $0{,}1 \times LD_{50}$ es suficiente para causar la muerte de un individuo.

Valores límites umbrales (TLV, *treshold limit values*): especifica los niveles de concentración máxima de una sustancia en aire a los que puede estar expuesto un trabajador durante 30 min, sin que éste desarrolle síntomas adversos. Una variante de este índice es el LPP (Límite Permisible Ponderado), que especifica un tiempo de exposición de 8 horas. Otros indicadores de características similares son el EAEC (*emergency airborne exposure concentrations*) y el IDHL (*immediately dangerous to health and life*).

También se debe considerar aquellas situaciones donde los trabajadores pueden estar expuestos en forma prolongada a sustancias que presentan características

tóxicas crónicas, es decir, cuyos efectos sobre la salud sólo se manifiestan después de largos períodos de exposición. Los avances en ecotoxicología han permitido identificar muchos efectos crónicos y aquellos compuestos que los causan. Existen muchos compuestos de uso industrial con reconocido poder mutagénico y cancerígeno, los que deben ser estrictamente controlados.

**b) Vulnerabilidad a los efectos térmicos**

Los efectos de la radiación térmica sobre las personas dependen fuertemente del tipo de accidente que la genera, ya que ello determina la velocidad a la cual ocurre el accidente, y la intensidad de la radiación emitida. Por ejemplo, en caso de un incendio de líquido inflamable en charco, las personas expuestas a niveles de radiación térmica peligrosos pueden huir hacia lugares protegidos. A medida que los individuos se alejan de la fuente emisora, disminuye el nivel de exposición y, por lo tanto, su efecto dañino.

Por el contrario, en el caso de un incendio *flash,* el evento ocurre a mucho mayor velocidad, dejando un tiempo de respuesta demasiado corto como para que los individuos escapen a zonas más protegidas.

Es importante considerar la variabilidad del comportamiento individual frente a situaciones de emergencia. Durante un incendio, un individuo puede huir rápidamente en la dirección correcta y salvarse, mientras que otro puede hacerlo en la misma dirección que el viento y ser alcanzado por las llamas.

La protección individual juega un papel determinante en el tipo de daño que puede causar un cierto nivel de exposición a la radiación térmica. Ello varía de acuerdo al tipo de vestuario que lleva el personal en el momento del accidente. Para efectos de evaluación de riesgos, generalmente se considera la piel expuesta sin protección.

Las quemaduras pueden provocar diferentes grados de daño a la piel, desde simples quemaduras, hasta destrucción masiva con resultado de muerte. De acuerdo con el daño, las quemaduras se clasifican en 4 grados:

- ***Quemaduras de primer grado***: Sólo queda afectada la epidermis, con enrojecimiento y algo de dolor, sin que se formen ampollas. Sanan en 2-3 días, sin dejar cicatrices.
- ***Quemaduras de segundo grado***: La quemadura atraviesa la epidermis y parte de la dermis. Se producen ampollas cuya persistencia depende de la profundidad del daño. Las quemaduras profundas de segundo grado son muy dolorosas y pueden demorar 1-3 meses en sanar.
- ***Quemaduras de tercer grado***: Queda afectada la dermis en toda su profundidad. No suele haber sensación de dolor, ya que las terminaciones nerviosas han sido destruidas, junto con los vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, glándulas sebáceas, etc. Producen grandes pérdidas de fluidos y alteraciones metabólicas. Pueden producir muerte.
- ***Quemaduras de cuarto grado***: Son aquellas que afectan más allá de la dermis, alcanzando músculos y huesos. Ocurren cuando parte del cuerpo

queda atrapado en las llamas y no se retira de inmediato, o debido a quemaduras eléctricas graves. En muchos casos, pueden ingresar materiales tóxicos directamente al flujo sanguíneo en la zona afectada. Este tipo de quemaduras es extremadamente grave y puede derivar en amputaciones. Pueden producir muerte.

El grado de destrucción debido a la exposición a la radiación depende mucho de la velocidad a la que responda el individuo, luego que la intensidad de la radiación térmica recibida sobrepase un cierto umbral. Para que tal respuesta se produzca, es necesario que el calor se transfiera hacia el interior de la piel hasta alcanzar las terminaciones nerviosas. Al sobrepasar el umbral del dolor, se producen respuestas de protección inconscientes, seguidas de actos conscientes. Al parecer, el umbral del dolor se alcanza cuando la temperatura sobrepasa los 45°C a una profundidad de 0,1 mm bajo la superficie externa de la piel. A partir de aquí la formación de ampollas ocurre rápidamente al llegar a una temperatura de 55°C.

La Tabla 11.12 muestra los efectos típicos en función de la intensidad de radiación térmica. A modo de referencia, cabe señalar que la intensidad de la radiación solar en un día agradable es del orden de 1 $kW/m^2$ y el cuerpo humano puede tolerar niveles de radiación de hasta 1,6 $kW/m^2$ por períodos relativamente prolongados, sin sensación de incomodidad.

A modo de ejemplo, uno de los modelos más utilizados es el propuesto por Eisenberg *et al.*[11]

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln(10^{-4} I^{4/3} t)$$

**TABLA 11.12: EFECTO DEL NIVEL DE RADIACIÓN TÉRMICA SOBRE LAS PERSONAS**

| NIVEL DE RADIACIÓN $kW/m^2$ | EFECTO |
|---|---|
| 1,7 | Se alcanza el umbral del dolor en 1 minuto |
| 9,5 | Se alcanza el umbral del dolor en 8 segundos |
| 128 | Se alcanza un 100% de mortalidad, para una exposición de 10 segundos |
| 131 | Quemadura de 2° grado, para una exposición de 1,4 segundos |
| 146 | Se alcanza el umbral de mortalidad para una exposición de 1,4 segundos |

Donde Y representa el número de unidades Probit (es decir, *Probability Unit*), I es

[11] Eisenberg N., Lynch C., Breeding J., "Vulnerability Model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills". National Technology Information Service Report AD-AO15-245. Springfield (1975) . Se revisa detalladamente en la referencia Santamaría y Braña.(1994)

la radiación recibida (en $W/m^2$) y t es el tiempo de exposición (en segundos).

Los autores suponen que una quemadura de 1° grado aparece cuando:

$$t\ I^{1,15} > 550.000$$

El número de unidades Probit, Y, se relaciona con el porcentaje de víctimas (P) a través de la función de probabilidad Normal, con valores de 5 y 1, para la media y la varianza, respectivamente:

$$P = (2\ \pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp(-u^2/2)du$$

La radiación térmica puede afectar gravemente a los edificios y estructuras. En el caso de estructuras combustibles, la radiación puede causar ignición y combustión de éstas. En el caso de materiales no combustibles (ej.: estructuras metálicas), la radiación térmica puede reducir seriamente la resistencia mecánica del material, con el consiguiente riesgo de colapso de la estructura.

**c) Vulnerabilidad a las explosiones**

La onda de presión derivada de las explosiones es uno de los agentes de destrucción producto de explosiones en la industria. Las partes del cuerpo humano más expuestas a la sobrepresión son: los oídos, los pulmones, el estómago y los intestinos.

La Tabla 11.13 ilustra algunos valores típicos de literatura, de tipos de daños por explosiones, en función de la sobrepresión.

**TABLA 11.13: EFECTOS DE LA SOBREPRESIÓN DEBIDO A UNA EXPLOSIÓN**

| SOBREPRESIÓN (psi) | TIPO DE DAÑO |
|---|---|
| 0,04 | Ruido fuerte. Rotura de cristales debido a la onda sonora |
| 0,7 | Daños estructurales menores en las casas |
| 2 | Colapso parcial de paredes y techumbres |
| 2-3 | Destrucción de paredes de cemento de 20-30 cm de espesor |
| 3-4 | Destrucción de estanques de almacenamiento |
| 5-7 | Destrucción total de casas |
| 7 | Volcamiento de vagones de tren cargados |
| 12 | 90% de probabilidad de ruptura de tímpanos |
| 14 | Umbral (1%) de muerte por hemorragia pulmonar |
| 25 | 90% de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar |
| 280 | Formación de cráter |

Es interesante notar la gran resistencia a la sobrepresión que presenta el ser humano, comparado con los edificios y estructuras. Cuando se evalúe la vulnerabilidad de las personas frente a una explosión, se debe considerar: el efecto de los proyectiles, de la generación de gases tóxicos, del colapso de las construcciones y de los incendios. Para ello se debe contar con información acerca del número de personas presentes en la construcción potencialmente afectada, tipo de materiales y distancia a la que puede ser lanzado un fragmento derivado de la explosión (ej.: trozo de recipiente), etc.

**d) Factores que afectan la vulnerabilidad de las personas e instalaciones**

Entre los factores que tienen mayor influencia sobre la vulnerabilidad de las personas e instalaciones se puede mencionar:

- ***Localización*:** Éste es un factor fundamental, ya que determina quienes son los potenciales receptores de los efectos del accidente. Interesan aquí: cercanía de poblaciones externas a la planta, distribución de edificios, vías públicas, distribución de equipos dentro de la planta, distribución de personal al interior de la planta, cercanía a río u otras fuentes de agua, escuelas.
- ***Condiciones meteorológicas***: Éstas pueden agravar o atenuar considerablemente las consecuencias del accidente, ya que determinan la dirección, velocidad de transporte y características de dispersión de materiales volátiles y gaseosos. Interesan: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, lluvia, condiciones de estabilidad atmosférica.
- ***Hora del día en que ocurre el accidente*:** Ésta afecta directamente el tipo de actividades que se realiza, particularmente en el ambiente externo a la planta, o cuando existen turnos de día y de noche con diferentes actividades.
- ***Época del año**:* Las diferencias climáticas a lo largo del año afectan las condiciones meteorológicas, el tipo de vestuario que utilizan las personas; la densidad de población cambia durante los periodos de vacaciones, etc.
- ***Respuesta a emergencias*:** Esto juega un papel determinante en las consecuencias de un accidente. Interesa: la velocidad de respuesta y el tipo de medidas de contención y protección, comunicación entre los diferentes actores (personal de planta, público, bomberos, policía, primeros auxilios y hospitales, etc.), nivel de entrenamiento del personal y de la población, acciones evasivas oportunas (evacuación, escape, refugio), etc.

**e) Acciones Evasivas**

En algunos casos la velocidad a la que ocurre el accidente es muy grande y deja pocas posibilidades de reacción (ej.: explosión, incendio flash). En otros casos, el evento se desencadena con mayor lentitud dejando tiempo para acciones evasivas (ej.: incendios y emisiones tóxicas):

- Evacuación desordenada.
- Evacuación planificada.
- Refugio en lugares designados.
- Utilización de equipos protectores (contra compuestos tóxicos, contra

incendio).

Estas medidas permiten reducir la vulnerabilidad de las personas frente a determinados eventos y deben formar parte de los planes de respuesta a emergencias. Se debe seleccionar cuidadosamente las rutas de escape para diferentes situaciones peligrosas. Especial atención debe ponerse a la dirección del viento en el caso de emisiones tóxicas, o de vapores inflamables. También se debe tomar en cuenta las respuestas frente a eventos naturales (sismos, inundaciones, tormentas, etc.) que requieran de acciones evasivas. Los sistemas de alarma deben mantenerse en perfecto estado de funcionamiento. Su diseño debe garantizar que todos los peligros potenciales hayan sido cubiertos. Una alarma temprana permite una respuesta más efectiva frente a la emergencia.

## 11.5) PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

El análisis de riesgo implica evaluar la frecuencia prevista para el accidente, es decir, la probabilidad de que el accidente tenga lugar dentro de un período de tiempo determinado. Éste es un importante componente del riesgo, ya que se combina con la consecuencia estimada para dar como resultado una medida cuantitativa del riesgo. En secciones anteriores, se mencionó la importancia de cuantificar las consecuencias en términos monetarios (considerando todas las pérdidas asociadas al accidente), ya que ello permite expresar el riesgo como una esperanza (matemática) de pérdidas.

Desgraciadamente, la estimación de probabilidad de ocurrencia de un evento accidental es bastante compleja y requiere un alto nivel de especialización. El tema es estocástico por naturaleza y se requiere herramientas estadísticas relativamente sofisticadas. De hecho, ello constituye la principal área temática de la ingeniería de confiabilidad (Reliability Engineering), que se encarga de establecer la relación entre la confiabilidad de un equipo y el correcto funcionamiento de sus componentes. En esta sección se introducirá en forma muy simplificada algunos conceptos básicos que sirven para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental. No se pretende realizar un riguroso cálculo de probabilidades, sino que revisar algunas técnicas sencillas para su estimación aproximada en estudios preliminares.

Las plantas industriales constan de múltiples equipos, los cuales están compuestos por centenares de componentes mecánicos y eléctricos. Cada uno de ellos puede fallar en algún momento de su vida útil, lo que otorga casi infinitas variantes de falla para una instalación dada.

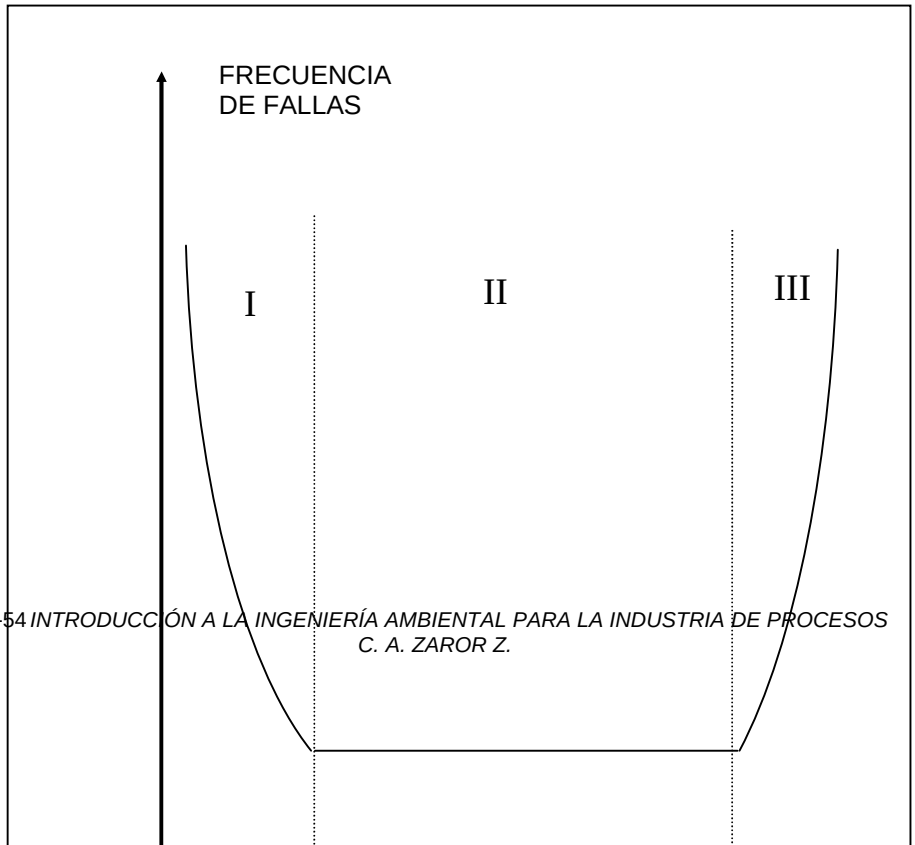
Los componentes o equipos pueden fallar debido a diferentes circunstancias, tales como:

- Fallas en la concepción inicial utilizada en su diseño.
- Fallas en el diseño del componente o equipo.
- Falla debido a defectos durante su fabricación.

- Falla en los procedimientos de instalación del componente o equipo.
- Falla debido a que se está utilizando bajo condiciones distintas para las que fue diseñado.
- Falla debido a insuficiente mantenimiento.
- Fallas por causas externas (ej.: falla en el suministro eléctrico, rotura por impacto de un vehículo, etc.).
- Falla debido a fatiga de materiales.
- Falla por error humano, debido a procedimientos inadecuados, negligencia, etc.

Es importante señalar que la probabilidad de falla de una planta o de un equipo no se mantiene constante en el tiempo, sino que varía desde su puesta en marcha hasta el término de su vida útil. La Figura 11.7 ilustra una típica curva de evolución de la frecuencia de falla de un equipo o de una planta industrial. En ella se distingue 3 etapas diferentes en su vida útil:

- Zona I: Corresponde al período inicial de puesta en marcha y operación, donde se producen las fallas debido a defectos de fabricación, a falta de pericia por parte de los operadores (en etapa de aprendizaje), falta de conocimiento respecto al proceso, errores en los procedimientos, etc. En la medida que estos factores se van superando, la frecuencia de falla cae bruscamente.
- Zona II: En esta etapa, se tiene una tasa de fallas casi constante, causadas principalmente por fluctuaciones aleatorias de la carga que soporta el equipo o sus componentes clave, que puede sobrepasar sus límites de resistencia.
- Zona III: Se constata un rápido aumento de la tasa de fallas como consecuencia del desgaste del equipo o cambios en las condiciones de operación para las cuales está subdimensionado.



En muchos equipos se observa una estrecha correlación entre la demanda a la cual están sometidos y su frecuencia de falla. Esto es particularmente relevante en el caso de equipos que están sometidos a esfuerzos mecánicos.

### 11.5.1) Utilización del Análisis de Árbol de Fallas

El Análisis de Árbol de Fallas (FTA), introducido como una herramienta para la identificación de peligros, puede ser utilizado en la estimación cuantitativa de la probabilidad de un evento accidental. Para que tal análisis sea efectivo, se requiere de una total comprensión del funcionamiento físico del sistema y sus mecanismos de falla.

Las fallas de equipos se pueden agrupar en 3 clases:

*1. Fallas primarias*: Son aquellas que ocurren cuando el equipo se opera en condiciones normales, para las cuales ha sido diseñado. Estas fallas son atribuibles al equipo y no a agentes externos. Ej. un recipiente que sufre una ruptura, a pesar de que la presión de trabajo no ha superado la de diseño.

*2. Fallas secundarias*: Se producen bajo condiciones de operación diferentes a las de diseño. Por ejemplo, una ruptura de un recipiente debido a un excesivo aumento de su presión de trabajo, por sobre la presión de diseño.

*3. Fallas de control*: Son aquellas que ocurren debido a que el equipo funciona como se espera, pero en un momento equivocado o en el lugar indebido. En este caso la falla se debe a que el equipo no recibe la señal apropiada.

En un árbol de fallas, las fallas primarias están en los extremos de las ramas del árbol, mientras que las fallas secundarias y de control son eventos intermedios. Otras fallas, tales como eventos externos, errores humanos, también ocupan niveles primarios.

El FTA requiere un ordenamiento conceptual de los eventos que ocurren o pueden ocurrir entre los eventos básicos hasta llegar al evento final. En este análisis se debe identificar agrupaciones de eventos que puedan ser simplificados sin que se pierda información. En la práctica, se privilegia aquellos cursos de acción que requieran menos condiciones simultáneas para su ocurrencia. Además, se le da mayor prioridad a eventos que involucren errores humanos por sobre fallas de equipos activos; a su vez, a las fallas de equipos activos se les da mayor prioridad que a las fallas de equipos pasivos. Este criterio de selección de fallas tiene implícito el reconocimiento de que un error humano es más probable que una falla de un equipo activo.

Si se conoce la probabilidad de falla, Pi, para cada uno de los eventos básicos, se puede calcular la probabilidad de ocurrencia del evento culminante, considerando que:

- La probabilidad, Pk, de que ocurra al menos uno de dos eventos

independientes, con probabilidades individuales Pn y Pm (es decir, para condición O) es:

$$Pk = Pn + Pm$$

- La probabilidad, Pj, de que ocurran simultáneamente dos eventos independientes, con probabilidades individuales Pw y Pz (es decir, condición Y) es:

$$Pj = Pw \times Pz$$

Ejemplo

A modo de ilustración, consideramos el reactor catalítico exotérmico para hidrogenación de acetileno, ilustrado anteriormente en la Figura 11.5. Se requiere calcular la probabilidad de daño al reactor debido a temperatura excesiva. El árbol de fallas correspondientes fue presentado en un ejercicio anterior, en la sección 10.3.5 (ver Figura 11.6).

Si los eventos básicos tienen las siguientes probabilidades asociadas:

P1 : Probabilidad de que la válvula VC1 falle en abierto.
P2 : Probabilidad de falla del controlador TC1.
P3 : Probabilidad de falla del sistema de alarma.
P4 : Probabilidad falla humana.
P5 : Probabilidad de que la válvula VC2 falle en cerrado.
P6 : Probabilidad de falla del controlador TC2.

Tal como se ilustra en la Figura 11.8, la probabilidad de daño al reactor debido a un aumento de la temperatura, P11, está dada por:

$$P11 = (P1 + P2 + P3 + P4) \times (P5 + P6)$$

### 11.5.2) Errores humanos

El error humano está en la base de toda falla en un equipo o proceso. El hombre es responsable del diseño, construcción, operación y mantención de cada unidad de proceso y de cada componente. Aparte de ello, existen acciones erradas que inciden directamente en el curso de acción de un proceso. Dichos errores pueden deberse a:

- **Distracción momentánea:** El operador puede tener una intención correcta, pero su acción resulta incorrecta en la práctica debido a confusión, falta de concentración, etc.

- **Capacitación insuficiente o instrucciones deficientes:** El operador no sabe qué hacer, o no tiene conciencia de su ignorancia.

- **Errores por limitaciones físicas o mentales por parte del operador:** Por ejemplo, puede carecer de la fuerza suficiente para cerrar una válvula en

situación de emergencia, o estar sometido a una fuerte presión que le impide actuar correctamente ante eventos que requieren calma para tomar decisiones.

- **Errores debido a falta de motivación o desobediencia:** En algunos casos el operador puede desobedecer órdenes porque genuinamente cree que es mejor no seguir dichas instrucciones, o porque no le interesa hacer las cosas de esa manera.

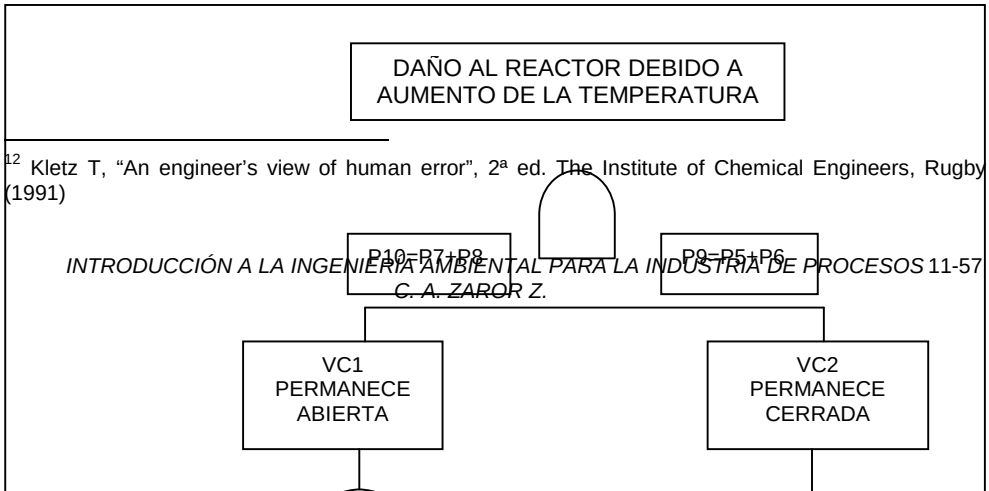
- **Errores debido a gestión errónea:** Es común encontrar situaciones en que los trabajadores cometen errores debido a que se impone una excesiva presión sobre ellos o, por el contrario, no se les entrega las mejores condiciones de trabajo (cortes presupuestarios en seguridad, equipos en mal estado).

En general, es muy importante identificar aquellos accidentes potenciales donde la falla humana puede ser el principal evento iniciador (o propagador), ya que ello permitiría concentrar los esfuerzos de capacitación y prevención en aquellos operadores y procedimientos críticos.

La Tabla siguiente muestra algunas estimaciones de probabilidades asociadas a diversos tipos de errores humanos (Kletz[12]).

**TABLA 11.14: EJEMPLO DE PROBABILIDADES ASOCIADAS A ERRORES HUMANOS**

| ACCIÓN DEL OPERADOR | PROBABILIDAD |
|---|---|
| No observa el indicador, o lo observa pero no toma ninguna acción | 0,04 |
| No cierra una válvula, como estaba previsto en una parada de emergencia | 0,005 |
| Error general de comisión (ej. lee equivocadamente un rótulo y, como consecuencia, selecciona el interruptor equivocado) | 0,003 |
| Error general de omisión, cuando no existe indicación en la sala de control del estado del elemento afectado | 0,01 |
| El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 60 segundos, en una situación de muy alto estrés | 0,99 |
| El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 5 minutos, de una situación de muy alto estrés | 0,9 |
| El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 30 minutos, de una situación de muy alto estrés | 0,1 |




[12] Kletz T, "An engineer's view of human error", 2ª ed. The Institute of Chemical Engineers, Rugby (1991)

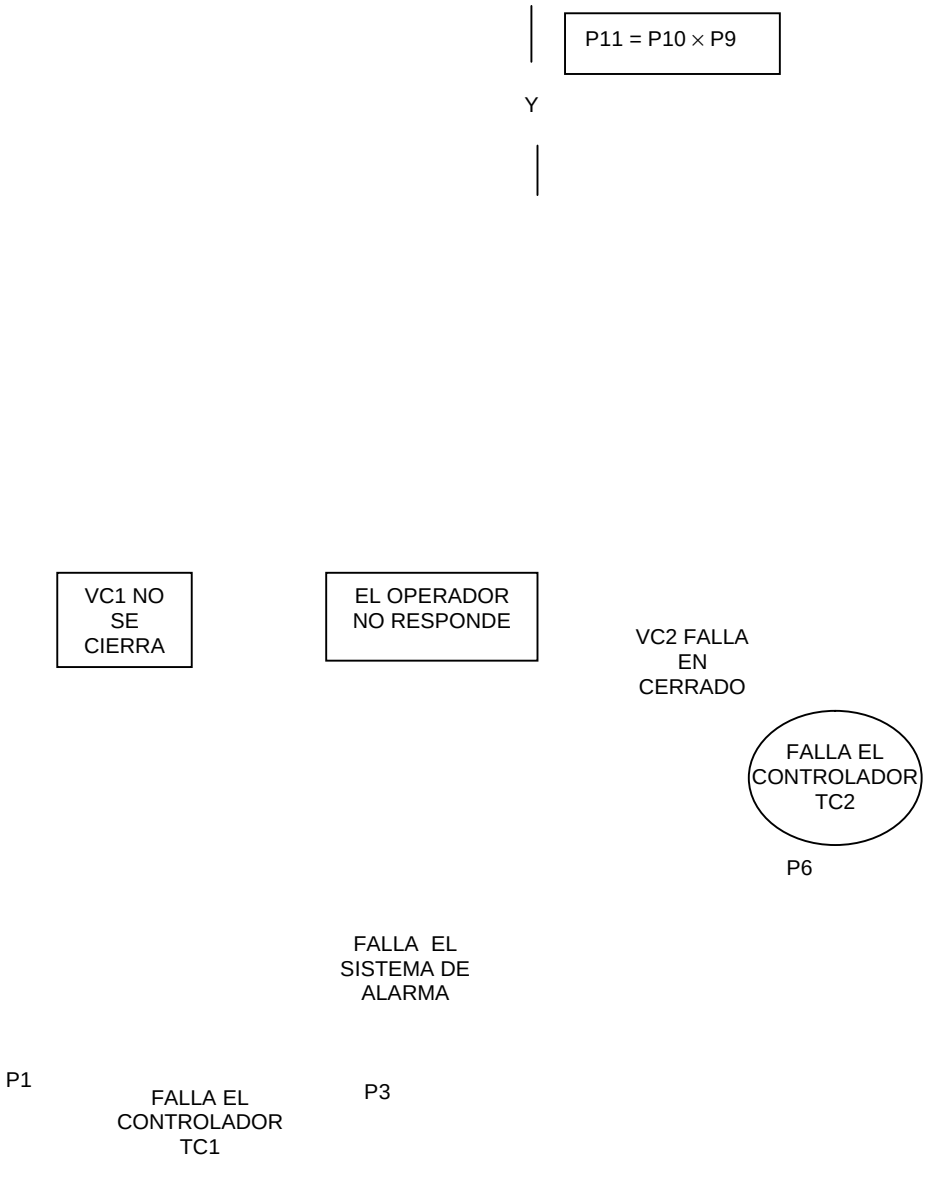



**FIGURA 11.8: ÁRBOL DE FALLA PARA REACTOR DE LA FIGURA 11.5**

## 11.6) LISTAS DE VERIFICACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

### LOCALIZACIÓN

1. Implantación adecuada: ¿Se ha establecido la separación de unidades a partir de una evaluación de riesgos?
2. Accesibilidad: ¿Existen obstrucciones peligrosas ya sean sobre o bajo el terreno?
3. ¿Existen suficientes caminos y corredores, con señalización adecuada?
4. ¿Existen accesos y salidas de emergencia en número y de la amplitud suficiente?
5. ¿Hay espacio suficiente para las líneas elevadas de servicios (electricidad, vapor, agua, aire comprimido, etc.)?
6. ¿Existen plataformas adecuadas para realizar operaciones de mantenimiento con seguridad?
7. ¿Se ha considerado la cercanía de fuentes de ignición?
8. ¿Los vientos dominantes?
9. Características del suelo. ¿Suficiente resistencia para soportar las cargas debidas a la operación?
10. ¿Cargas máximas indicadas en su caso?
11. ¿Drenajes adecuados?
12. ¿Control/protección de drenajes ante posibles inundaciones?
13. ¿Localización adecuada de las instalaciones de carga y descarga, fuera de las vías principales?

### EDIFICACIONES

1. Escaleras, salidas de emergencia, pasillos: ¿Adecuados, de la amplitud adecuada, libres de obstrucciones y obstáculos?
2. Grúas y elevadores: ¿Bien diseñados, con las salvaguardas adecuadas?
3. ¿Señalización adecuada de cualquier obstáculo al paso?
4. ¿Ventilación adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
5. ¿Iluminación adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
6. ¿Calefacción/refrigeración adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
7. ¿Se necesita una escalera para acceso al tejado?
8. ¿Se requiere puertas resistentes al fuego?
9. ¿Materiales resistentes al fuego en ciertas zonas del edificio?
10. ¿Equipo de emergencia disponible y bien señalizado?
11. ¿Se requiere un diseño que tenga en cuenta la posibilidad de explosiones?
12. ¿Se requiere equipos para la detección de calor y humo?
13. ¿Se ha previsto protección contra descargas eléctricas (pararrayos, conexión a tierra de los equipos)?

**MATERIALES, EQUIPOS Y PROCESO**

1. ¿Se ha considerado la posibilidad de interferencia entre operaciones adyacentes?
2. ¿Se ha previsto el almacenamiento adecuado de materiales especiales o inestables?
3. ¿Se han segregado del resto?
4. ¿Hay materiales que exijan un equipo especial para su manejo?
5. ¿Existen materiales o productos que puedan ser afectados por condiciones meteorológicas extremas?
6. ¿Todas las materias primas y productos están adecuadamente clasificados y etiquetados?
7. ¿Los materiales que constituyen los equipos son adecuados a las condiciones de proceso?
8. ¿Existe posibilidad de confinamiento de vapores en determinadas zonas?
9. ¿Se ha identificado todas las características de peligrosidad de las sustancias utilizadas? ( temperaturas de autoignición, puntos de destello, límites de inflamabilidad, posibilidad de descomposición espontánea, reactividad, efecto de impurezas, posibilidad de reacciones fuera de control, reacciones secundarias, características de corrosividad y compatibilidad, toxicidad, etc.).
10. ¿Se conoce los agentes necesarios para extinguir fuegos, que son compatibles con los materiales de proceso?
11. ¿Se ha considerado la posible exposición del personal o del público a los agentes adversos en cada una de las instalaciones? (productos químicos por vía respiratoria, oral o dérmica, polvo y humos, radiaciones nocivas, ruido, agentes biológicos, etc.)
12. ¿Se requiere el uso de campanas extractoras para humos, polvo o vapores?
13. ¿Se requiere el uso de equipos de protección personal?
14. ¿Se ha previsto la posibilidad de generación de cargas estáticas?
15. ¿Se ha evaluado la conductividad de los materiales usados y sus características de acumulación de carga eléctrica?
16. ¿Se ha realizado una toma de tierra adecuada?
17. ¿Se requiere protección contra las explosiones?
18. ¿Se ha verificado la adecuación de los sistemas de alivio de presión, supresión de explosiones, detectores de atmósferas explosivas, etc.?
19. ¿Los venteos están orientados en dirección apropiada? ¿Se ha tenido en cuenta la posibilidad de contrapresiones?
20. ¿Se requiere elementos para prevención de llamas en las líneas de venteo?
21. ¿Se requiere otras precauciones especiales por el tipo de material venteado?
22. ¿En los sistemas disco de ruptura/válvula de alivio, se ha protegido las válvulas de la posibilidad de taponamiento por causa de los discos de ruptura?
23. ¿Se ha instalado medidores de presión entre uno y otra?

MATERIALES, EQUIPOS Y PROCESO (continuación)

24. ¿Es necesario tomar precauciones para un vaciado rápido de recipientes,

reactores, etc., en caso de emergencia?

25. ¿Se ha realizado un diseño adecuado a la presión máxima de operación? ¿Se ha considerado factores de corrosión?
26. ¿Se ha identificado aquellos equipos o componentes críticos para la seguridad de la planta?
27. ¿Se ha tenido en cuenta las consecuencias de fallas de uno o más suministros? Electricidad (agitación, circulación, instrumentos, controles, sistemas de emergencia, luz), vapor (calentamiento, vacío, bombas), aire (instrumentos, bombas), agua (enfriamiento, extinción de incendios, de reacciones), gas (inertización).
28. ¿Se ha previsto guardas para correas, cintas transportadoras, poleas, engranajes, y equipo móvil en general, así como para bordes cortantes y superficies calientes de cualquier tipo?
29. ¿Se ha instalado dispositivos de alivio de presión en las líneas de descarga y succión, para las bombas de proceso?
30. ¿Se ha revisado la accesibilidad de todo el equipo, especialmente de los elementos críticos?
31. ¿Se ha considerado la protección e identificación de las líneas más frágiles?
32. ¿Se ha dispuesto suficiente soporte para las tuberías?
33. ¿Se ha tenido en cuenta dilataciones/contracciones térmicas?
34. ¿Existe la posibilidad de bloqueo gradual o súbito de las conducciones?
35. ¿Se ha previsto las consecuencias?
36. ¿Se ha revisado la cantidad de materiales peligrosos almacenados?
37. ¿Puede reducirse dicha cantidad?
38. ¿Pueden los equipos disponerse de manera que las tareas de mantenimiento se realicen con total seguridad (desconexión eléctrica total, bloqueo de líneas)?
39. ¿Se ha revisado la seguridad de los procedimientos de toma de muestras?
40. ¿Los diagramas de proceso se mantienen al día?
41. ¿Los procedimientos de operación se mantienen al día?
42. ¿Existe un procedimiento para su actualización?
43. ¿Se realiza comprobaciones sobre su seguimiento?
44. ¿Se ha previsto la existencia de repuestos para partes o equipos críticos?
45. ¿Se requiere equipo eléctrico a prueba de explosiones?
46. ¿Se requiere inertización de equipos pasivos o activos?
47. ¿Se elimina los residuos adecuadamente?
48. ¿Se ha comprobado la ausencia de problemas en el alcantarillado?
49. ¿Se ha evaluado los peligros de las descargas de materiales al alcantarillado?
50. ¿Existe un procedimiento riguroso de control de calidad y composición a la recepción de cualquier materia prima?
51. ¿Existe un procedimiento establecido para la comunicación entre los supervisores al efectuar el cambio de turno?
52. ¿Se ha tenido en cuenta los factores de seguridad para presiones, temperaturas, flujos, niveles u otras variables de proceso?
53. ¿Puede generarse condiciones peligrosas a causa de una falla mecánica?
54. ¿Se ha previsto las principales causas para fallas humanas y sus consecuencias?

## INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

1. ¿Se ha identificado apropiadamente válvulas, interruptores, instrumentos, etc.?
2. ¿Se comprueba regularmente el funcionamiento de las alarmas, equipos de protección, equipos de puesta en marcha automática e instrumentación en general?
3. ¿Se comprueba regularmente el correcto funcionamiento de las luces testigo e indicadores en el panel de control?
4. ¿Son todos los controles automáticos de falla seguros?
5. ¿Existe protección contra el arranque automático tras una parada de los equipos?
6. ¿Existe una política adecuada para el establecimiento y cambio de los parámetros de control, así como para el control manual de algunas operaciones?
7. ¿Se utiliza en cada caso equipo del estándar adecuado para el servicio que presta?
8. ¿Se revisa regularmente el estado de los equipos, incluyendo los sistemas de cables?
9. ¿Se ha considerado la conveniencia de instalar instrumentación o sistemas de protección redundantes?
10. ¿Se ha estimado posibles retardos en la respuesta de los distintos equipos?
11. ¿Se ha identificado las consecuencias de dichos retardos?
12. ¿Se ha previsto los efectos sobre el control de la planta en el caso de que un instrumento sea retirado del servicio para mantenimiento?
13. ¿Se ha considerado la conveniencia de instalar nuevos cruzamientos de señales (*interlocks*)?
14. ¿Se ha tenido en cuenta todas las consecuencias en los *interlocks* existentes?
15. ¿Se ha previsto el sistema de parada en caso de pérdida de corriente eléctrica o aire de instrumentos?
16. ¿Se ha evaluado su efecto sobre el control de la planta?
17. ¿Se ha identificado los equipos eléctricos que pueden ser retirados de servicio para mantención preventiva, sin interrumpir la producción?
18. ¿Se ha evaluado los procedimientos para llevar a cabo tales acciones?

**ACCIONES DE EMERGENCIA**

1. ¿Se mantiene un entrenamiento periódico sobre cómo enfrentar situaciones de emergencia?
2. ¿Existen procedimientos para evaluar tal preparación?
3. ¿Simulacros periódicos?
4. ¿Se requiere duchas y lavaojos de emergencia?
5. ¿Se requiere equipo de protección personal para emergencias?
6. Interruptores y válvulas de emergencia: ¿Se revisan con frecuencia?
7. ¿Están bien señalizados?
8. ¿Son accesibles?
9. ¿Se ha previsto fuerza e iluminación de emergencia?
10. ¿Se ha previsto la integridad de la sala de control en emergencias?
11. ¿Se requiere extintores? ¿Cuántos, de qué clase y tamaño?
12. ¿Se requiere sistemas de rociado automático?
13. ¿Se ha comprobado la adecuación del equipo de detección y extinción de incendios a los códigos vigentes? ( suministro de agua, incluyendo suministro secundario, bombas, tanques, tuberías, alarmas, protección del equipo contra incendios, etc.).
14. ¿Los materiales de extinción de incendios son compatibles con los materiales de proceso?
15. ¿Se requiere equipo para detección de humos, calor o vapores inflamables?
16. ¿De vapores tóxicos?
17. ¿Se ha previsto la contención de derrames?
18. ¿Su manejo?
19. ¿Se ha considerado la instalación de nuevas alarmas?
20. ¿Se mantiene al día el material de emergencia?
21. ¿Se mantiene al día los procedimientos de emergencia?
22. ¿Se realiza adiestramientos periódicos?
23. ¿Se ha previsto un sistema para llevar la cuenta exacta del número de personas en las instalaciones, incluyendo proveedores y visitantes?
24. ¿Se mantiene al día la documentación sobre seguridad de los distintos materiales utilizados?
25. ¿Se ha considerado la posibilidad de efectos sinérgicos?
26. Plan de emergencia: ¿Se ha realizado teniendo en cuenta las consecuencias de accidentes en los peores casos razonables, con un análisis de riesgo riguroso?
27. ¿Se ha previsto las vías de evacuación frente a diferentes escenarios de accidentes?
28. ¿Se ha identificado áreas de protección contra incendio, explosiones, emanaciones tóxicas?
29. ¿Existen medidas frente a desastres naturales (sismos, tormentas, inundaciones, etc.)?
30. ¿Se ha asegurado las comunicaciones de emergencia, incluso en períodos de vacaciones?
31. ¿Se ha considerado la comunicación expedita con el exterior: público local, bomberos, policía, servicios de salud?

**MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS**

1) ¿Es necesario el funcionamiento continuo del equipo?
2) ¿Hace falta un equipo en reserva?
3) ¿Va a estar sometido a la acción de compuestos corrosivos de manera continua u ocasional?
4) ¿Hay espacio suficiente para el acceso del equipo (grúas, herramientas) y personal necesario para el trabajo y el desplazamiento de las partes desmontadas (cabezales, tubos, etc.)?
5) ¿Es necesario entrar en el equipo?
6) ¿Se ha identificado las labores de mantención a realizar?
7) ¿Existe el peligro de incendio o explosión dentro o sobre el equipo?
8) ¿Existen sistemas adecuados de bloqueo en todas las líneas de entrada y salida del recipiente, según el riesgo potencial que cada una presente? (con excepción del aire o agua, no se considera suficiente una sola válvula para mantener una operación segura)
9) ¿Afecta este bloqueo a otros equipos que deben mantenerse en funcionamiento?
10) ¿Pueden quedar productos peligrosos dentro del recipiente?
11) ¿Se ha identificado sus riesgos potenciales?
12) ¿Se ha identificado los medios necesarios para su eliminación?
13) ¿Se requiere líneas especiales para el venteo o vaciado del recipiente a un lugar seguro?
14) ¿Se requiere entrar con equipos de protección personal o sistemas de respiración?
15) ¿Se ha identificado tales equipos de protección?
16) ¿Son los accesos lo suficientemente amplios para ello?
17) ¿Se ha identificado otros elementos al interior del recipiente? ( agitadores, serpentines, placas deflectores, platos, etc.).
18) ¿Se ha previsto los riesgos asociados a su presencia?
19) ¿Es necesario usar escaleras de mano u otros medios auxiliares para el acceso al interior?
20) ¿Se ha previsto como se sostendrán en forma segura?
21) ¿Se ha previsto medios para el rescate desde el exterior?
22) ¿Es necesaria la ventilación del interior cuando se está trabajando?
23) ¿Se ha previsto medios de ventilación adecuados?

## 11.7) EJEMPLO DE CATEGORIZACION DE LOS RIESGOS Y MEDIDAS DE PREVENCION EN UNA PLANTA DE CELULOSA KRAFT

| PELIGRO DE EXPLOSION | | | |
|---|---|---|---|
| | **Consecuencias** | **Probabilidad** | **Riesgo** |
| En sistema de GNC | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| En estanque de petróleo | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| En la descarga de clorato | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| En estanque de metanol | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| En estanque de hidróxido de sodio | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| En la planta química | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| En los precipitadores electrostáticos | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| En estanque de disolución | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| En horno de cal | Daño Moderado | Baja | Tolerable |

| PELIGRO DE INCENDIO | | | |
|---|---|---|---|
| | **Consecuencias** | **Probabilidad** | **Riesgo** |
| Circuitos eléctricos, turbogenerador, transformadores, computadores | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Estanques de combustibles, metanol, peróxido, solventes, lubricantes | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Máquina moldurera | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Maestranza (solventes, lubricantes) | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Edificios de la Planta | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Depósito de madera seca y molduras | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Depósito de residuos de madera | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Bodegas de celulosa | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Bodegas de resinas, aditivos y otros | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Patio de madera | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Pila de astillas | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Máquina secadora | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| Camiones/trenes con productos químicos y combustibles | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| Planta química | Daño Extremo | Baja | Moderado |

| DERRAMES DE LÍQUIDOS PELIGROSOS | | | |
|---|---|---|---|
| | **Consecuencias** | **Probabilidad** | **Riesgo** |
| Durante el transporte hacia la planta | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Por ruptura de estanque, con derrame a sistema de aguas lluvia | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Por rebalse de estanques, con derrame a sistemas de aguas lluvia | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Agua de incendio contaminada, con derrame a sistemas de aguas lluvia | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Rebalse de laguna de emergencia | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Durante carga o descarga | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Por ruptura de estanques (contenido) | Daño Leve | Alta | Moderado |
| Por rebalse de estanques (contenido) | Daño Leve | Alta | Moderado |
| Ruptura de cañerías | Daño Leve | Alta | Moderado |
| Fugas en bombas y válvulas, etc. | Daño Leve | Alta | Moderado |

| FUGAS DE GASES Y VAPORES PELIGROSOS | | | |
|---|---|---|---|
| | **Consecuencias** | **Probabilidad** | **Riesgo** |
| Por ruptura de estanques o cilindros | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Durante carga o descarga | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Por ruptura de cañerías | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Por ruptura de sellos de compresores y válvulas | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Falla de sistemas de alivio de presión | Daño Moderado | Alta | Sustancial |

| OTROS PELIGROS | | | |
|---|---|---|---|
| | **Consecuencias** | **Probabilidad** | **Riesgo** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Accidentes de tránsito dentro de la planta | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Accidentes de tránsito en transporte desde y hacia la planta | Daño Extremo | Alta | Intolerable |
| Accidentes personales en la planta (caídas, shock eléctrico, impactos) | Daño Moderado | Alta | Sustancial |
| Sismos mayores | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| Acción destructiva de terceros | Daño Extremo | Media | Sustancial |
| Sequía (corte de suministro de agua) | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| Inundación de la planta por crecida de rio | Daño Extremo | Baja | Moderado |
| Derrumbes | Daño Leve | Media | Tolerable |
| Temporal de viento | Daño Leve | Media | Tolerable |
| Tormenta eléctrica | Daño Moderado | Baja | Tolerable |

| MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE EXPLOSION | |
|---|---|
| **Peligro de Explosión en**: | **Medida de Prevención** |
| **Caldera de Recuperación** | **Sobrepresión:**<br>Válvulas de alivio y/o seguridad<br>Controladores de presión<br>Programa de mantención, calibración y pruebas de las válvulas de seguridad<br>Programa de mantención y operabilidad de los sensores e instrumentos de operación<br>Capacitación permanente sobre la operación de la caldera<br>Procedimientos e instrucciones actualizadas y accesibles |
| | **Agua al Hogar**<br>Vaciado de emergencia<br>Indicadores de flujo y/o relación de agua/vapor<br>Capacitación al personal sobre los procedimientos en las emergencias de vaciado |
| Sistema de Gases No Condensables | Discos de ruptura<br>Venteo automático de sobrepresión<br>Matallama de retroceso<br>Antorchas de emergencia |
| Caldera de biomasa | **Sobrepresión:**<br>Válvulas de alivio y/o seguridad<br>Controladores de presión<br>Programa de mantención, calibración y pruebas de las válvulas de seguridad<br>Programa de mantención y operabilidad de los sensores e instrumentos de operación<br>Capacitación permanente sobre la operación de la caldera<br>Procedimientos e instrucciones actualizadas y accesibles |
| Horno de cal | Detector de llama (conectado a válvula de alimentación de petróleo)<br>Sistema de purga de gases combustibles<br>Sistema de seguridad para evitar encendido en presencia de alta concentración de gases combustibles<br>Circuito de Sistema de Control Distribuido (DSC) de apoyo |
| Estanque de disolución de licor verde | Indicador del nivel mínimo de agua del estanque<br>Limpieza periódica e inspección permanente de los canales de fundido<br>Procedimientos e instrucciones actualizados para puesta en marcha<br>Acciones de emergencia para contener accidentes por derrame de fundido (medidas especiales para el control de fundido, confinamiento, evitar contacto con el agua) |

**MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE EXPLOSION**
**(Continuación)...**

| | |
|---|---|
| Estanque de petróleo | Control de temperatura del combustible<br>Ubicación lejana a fuente de calor<br>Medidas de seguridad generales |
| Estanque de metanol | Válvulas de alivio de presión. Válvulas de vacío y presión<br>Matallamas<br>Medidas de seguridad generales |
| Estanque de dióxido | Sellos de tapas de explosión herméticas<br>Análisis horario de la solución. Analizador en línea<br>Indicadores de bajo nivel de solución, con detección de bombas de salida de productos<br>Indicadores conectados al Sistema de Control Distribuido (DCS).<br>Alarmas de alta temperatura |
| Precipitador electrostático | Medidor de CO (gases combustibles)<br>Indicadores de % de $O_2$ en los gases a los precipitadores<br>Desconección alta tensión en presencia de alta concentración de gases combustibles |
| Otros estanques de compuestos químicos | Indicadores conectados a DCS con indicadores y alarma de temperatura<br>Válvulas de seguridad<br>En el caso del estanque de $O_2$ elementos de intervención y recambio totalmente pasivados (sin grasa) |
| Polvo de madera en suspensión | Sistemas automáticos de detección de chispas y humos en los ciclones, con conección directa a rociadores |

| MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE INCENDIO | |
|---|---|
| **Peligro de Incendio en:** | **Medida de Prevención** |
| Depósitos de madera seca, corteza, viruta, aserrín, pila de astillas, patio de madera | Red húmeda externa, red perimetral para suministro de agua a grifos, estanque de almacenamiento agua para combatir incendios, sistema de impulsión de agua con bombas eléctricas y diesel (dispuestas en paralelo).<br>Red interior, mangueras, extintores portátiles (de acuerdo a normas NFPA)<br>Capacitación del personal, para respuesta a emergencias de incendio |
| Instalaciones, bodegas y edificios generales de la planta | Sistemas automáticos de detección, alarmas y control de amago de incendio.<br>Sistemas de rociadores automáticos<br>Dotación de extintores.<br>Planes de respuesta<br>Orden, aseo y disposición de desechos.<br>Aislamiento térmico de circuitos eléctricos<br>Capacitación del personal, para respuesta en emergencias de incendio. |
| Circuitos eléctricos | Sistemas de protección de fallas a tierra<br>Redes de protección de sobrecorriente, para equipos<br>Protección de sobre corriente, para conductores<br>Protección diferencial para el circuito de uso doméstico<br>Neutro artificial en aterramiento a los sistemas eléctricos de generación y distribución<br>Tapas de protección a bandejas y/o escalerillas porta conductores |
| Turbogeneradores | Revisión horaria de los sistemas de aceite<br>Aislación a los sistemas de alta temperatura<br>Circuito de monitoreo a sala del turbogenerador<br>Sistema de detectores, alarmas y combate de incendio sobre el tubo y unidades de aceite<br>Sistema de detección, alarma y combate de incendio al edificio del turbogenerador |
| Transformadores | Protecciones de sobrecorriente<br>Protecciones de fallas a tierra<br>Protecciones de alto y bajo nivel de aceite<br>Protección diferencial<br>Transformadores con aislantes en base de silicona<br>Sistemas automáticos de detección, alarma y control de incendios |

**MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE INCENDIO**
**Continuación...**

| | |
|---|---|
| En estanques de combustibles, metanol, peróxido, solventes, lubricantes | Indicadores al DCS, con alarma de alta temperatura<br>Sistema de ducha sobre estanque para reducir la temperatura<br>Matallamas<br>Red de incendio. Alto caudal de agua.<br>Instalaciones formadoras de espuma |
| En máquina secadora | Sistema de anegamiento y sofoco por vapor<br>Limpieza y aspiración de polvo de celulosa en secadora<br>Limpieza y aspiración del polvo en decantación exterior<br>Sistemas de detección alarmas automáticas<br>Planes periódicos de mantención y limpieza de los sistemas asociados<br>Capacitación permanente sobre la operación y mantención del equipo y sus instalaciones complementarias. Planes de respuesta<br>Extintores y sistemas hidratantes**.** |
| Vehículos con productos químicos y combustibles | Medidas de seguridad de acuerdo a Normas NFPA y normas chilenas relevantes.<br>Extintores portátiles, de acuerdo al tipo de producto peligroso<br>Capacitación a los choferes y personal de apoyo.<br>Mantención de los vehículos en óptimo estado. |

| **MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE DERRAMES DE LÍQUIDOS PELIGROSOS** | |
|---|---|
| **Peligro de Derrames** | **Medidas de Prevención** |
| Durante el transporte hacia la planta | Mantención periódica de los estanques, válvulas e indicadores.<br>Cumplimiento con las disposiciones del DS298/95 y normas chilenas relevantes.<br>Capacitación de los conductores<br>Selección de rutas apropiadas y horarios, tomando en cuenta la seguridad. |
| Durante carga o descarga | Estanques con pretiles de contención y recolección de producto<br>Procedimientos e instrucciones actualizados y conocidos por operadores<br>Supervisión de la operación. |

**MEDIDAS DE PREVENCION PARA PELIGRO DE DERRAMES DE LÍQUIDOS**

**PELIGROSOS**
**Continuación....**

| | |
|---|---|
| Por ruptura de estanques | Estanques con pretiles de contención y recolección de producto.<br>Inspecciones programadas de revisión de espesores de estanques.<br>Mantención periódica de pretiles, drenaje de agua lluvia acumulada. |
| Por rebalse de estanques | Estanques con pretiles de contención y recolección de producto<br>Sensores conexión a sistema DCS, con alarmas.<br>Válvulas de bloqueo |
| Ruptura de cañerías | Sensores conectados a DCS y alarmas.<br>Válvulas de bloqueo y limitación de la fuga.<br>Neutralización y contención de la fuga. |
| Fugas en bombas y válvulas | Sensores conectados a DCS y alarmas.<br>Válvulas de bloqueo y limitación de la fuga.<br>Neutralización y contención de la fuga. |

| **MEDIDA DE PREVENCION PARA PELIGRO DE FUGAS DE GASES Y VAPORES** | |
|---|---|
| **Peligro de Fugas de gases y vapores** | **Medidas de Prevención** |
| Durante carga o descarga | Revisión periódica de sistemas de válvulas e indicadores de presión<br>Procedimientos e instrucciones actualizadas y conocidas por operadores<br>Supervisión de la operación. |
| Por ruptura de estanques o cilindros | Revisión periódica de espesores de estanques<br>Sensores de presión conectados a DCS y alarmas<br>Procedimientos de respuesta frente a emergencia |
| Por ruptura de cañerías | Sensores a DCS y alarmas<br>Válvulas de bloqueo para limitar la fuga |
| Por ruptura de sellos de compresores y válvulas | Sensores a DCS y alarmas<br>Revisión periódica de los sellos de compresores y válvulas |
| Falla de sistemas de alivio de presión | Sensores a DCS y alarmas<br>Válvulas de bloqueo y limitaciones de fuga |

| **MEDIDA DE PREVENCION PARA OTROS PELIGRO** | |
|---|---|
| **Peligro de :** | **Medidas de Prevención** |

| | |
|---|---|
| Accidentes de tránsito dentro de la planta | Restricciones de velocidad de circulación<br>Señalización de límites de velocidad, dirección de tránsito<br>Demarcación de pasos peatonales<br>Vigilancia de tráfico interior<br>Capacitación permanente al personal sobre seguridad de tránsito |
| Accidentes de tránsito en transporte desde y hacia la planta | Capacitación permanente a conductores de la Empresa y contratistas<br>Señalización en accesos a la planta |
| Accidentes personales en la planta (caídas, shock eléctrico, impactos) | Normativa de Prevención de Riesgos. Permiso de trabajo seguro; tarjeta de seguro; trabajo en altura, etc.<br>Programa permanente sobre el control de riesgos laborales<br>Programas permanente de capacitación en prevención de riesgos<br>Programa permanente de salud ocupacional<br>Servicio médico de primeros auxilios, permanente en la planta<br>Afiliación a organismos administradores Ley 16744<br>Análisis de riesgos periódicos.<br>Registros de incidentes y accidentes<br>Revisión periódica del estado de dispositivos de seguridad para el personal |
| Sismos mayores | Construcciones con propiedades asísmicas<br>Sistemas de cañerías con sustentaciones elásticas<br>Plan de parada de planta en emergencia<br>Plan de emergencia respectivo. |
| Sequía (reducción del suministro de agua) | El consumo de agua está limitado por las condiciones del proceso y la escala de producción. En caso de restricciones, se deberá reducir el nivel de producción y/o implementar nuevos sistemas de recirculación del agua tratada. |
| Inundación de la planta | El sistema de evacuación de aguas lluvia de la planta debe ser diseñado para garantizar la no ocurrencia de inundación.<br>Sistemas de bombeo de emergencia. |
| Derrumbes | Estabilización de taludes. |
| Temporal de viento | Edificios e instalaciones con techumbre de fibropanel<br>Estructuras diseñadas para resistir condiciones extremas de viento |
| Tormenta eléctrica | Sistema de antena y/o captadores de rayos distribuidos en la planta |
| Acción destructiva de terceros | Medidas de seguridad en el acceso a la planta.<br>Control perimetral para evitar ingresos no autorizados<br>Control interno y vigilancia. |

**GLOSARIO**

**Accidente**: Evento no planeado que puede derivar en daños graves a las personas (muerte, heridas graves), a la propiedad y al medio ambiente, u otras pérdidas.

**Incidente:** Evento no planeado que tiene potencial para transformarse en accidente (BS8800). Es un "casi accidente" que se puede identificar como una desviación no planeada de las condiciones de operación, cuyas consecuencias son menores que en el caso de un accidente. Puede tener consecuencias no deseadas en la calidad del producto.

**Peligro :** Una fuente o situación con potencial para dañar a las personas, la propiedad, el medio ambiente o una combinación de estos (BS 8800). Es un término que se utiliza para designar una condición física o química que puede causar daños a las personas, el ambiente o la propiedad.

**Riesgo** : Representa la probabilidad y las consecuencias asociadas a la ocurrencia de un evento peligroso especificado (BS 8800). Implica la posibilidad de sufrir pérdidas económicas, daños a las personas, al ambiente o a la propiedad, expresada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y la magnitud de las consecuencias.

**Riesgo tolerable**: Se refiere a un riesgo que se acepta en base al convencimiento de que el peligro se mantiene bajo control y cumple con los requerimientos legales

**Seguridad**: Expresa la sensación de ausencia de peligro o de un riesgo aceptable.

**BIBLIOGRAFÍA**

Batelle Columbus Division-AIChE/CCPS "Guidelines for Hazrd Evaluation Procedures". American Institute of Chemical Engineers. New York (1985)

Greenberg H.R., Cramer J.J. "Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry". Van Nostrand Reinhold. New York (1991)

King R. "Safety in the Process Industries". Butterworth-Heinemann. Londres (1990)

Lagadec P. "La Civilización del Riesgo". Editorial MAPFRE. Madrid (1983)

Lees F.P. "Loss Prevention in the Chemical Industries". (2 volúmenes). Butterworth-Heinemann. Londres (1980)

Santamaría J.M., Braña P.A. "Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química". Fundación MAPFRE, S.A., Madrid (1994)

## ALGUNAS PALABRAS FINALES

Han transcurrido algunos años desde el momento en que comencé a escribir las primeras frases que dieron vida a este libro. A pesar de ser un período relativamente corto, los avances en cada área temática han sido significativos.

En el ámbito internacional, la Agenda 21 está a punto de cumplir una década de existencia. Si bien parte de las expectativas que se crearon en sus inicios se han visto frustradas, debido a la dificultad de lograr otros acuerdos o por la fría realidad del mundo económico que establece otras prioridades, se ha logrado avanzar en materias importantes. En Chile, se camina aceleradamente en la consolidación de un marco normativo ambiental moderno, y cada año aparecen nuevas normas de emisión y de calidad ambiental. Por otra parte, la dimensión ambiental comienza a adquirir importancia, tanto en las grandes empresas como en la pequeñas y medianas (PyME). Al momento de escribir estas páginas, alrededor de una docena de empresas nacionales han logrado certificarse ISO14001 y un número similar se encuentra en pleno proceso de certificación. Ello se suma a los esfuerzos públicos y privados que buscan fortalecer la implementación de estrategias de Producción Limpia, con especial atención a la PyME.

Varias empresas exportadoras chilenas han sentido la creciente presión del mercado en orden a mejorar su desempeño ambiental. ¿Cómo satisfacer tal demanda sin afectar la sustentabilidad económica de la empresa? No me cabe ninguna duda que la respuesta está en un mejoramiento integral del proceso productivo, maximizando la eficiencia de utilización de los recursos y minimizando las pérdidas de materiales y de energía. La experiencia demuestra que para ello no es necesario llevar a cabo grandes inversiones, ni efectuar cambios drásticos en la tecnología. Muy por el contrario, lo más probable es que un reforzamiento de las capacidades de gestión, apoyado por algunas medidas tecnológicas menores, debería ser suficientes para obtener logros importantes en el desempeño ambiental. No se debe escatimar esfuerzos para fortalecer la capacitación en aspectos técnicos y ambientales, y lograr el compromiso de todos en la tarea por mejorar y crecer.

A pesar de que los ingenieros hemos incorporado a nuestro lenguaje profesional conceptos ambientales desconocidos hace muy pocos años, aún nos queda mucho por caminar. Debemos esforzarnos para incluir la dimensión ambiental en las primeras fases del desarrollo de un proyecto, y no cometer el error de tomar decisiones acerca del proceso y de la ubicación de la planta, sin ninguna consideración ambiental. Debemos luchar contra años de práctica ingenieril donde *el fin de producir justifica los medios*, sin tomar en cuenta los costos externos. Nuestra área de responsabilidad profesional no sólo debe incluir cada etapa en la vida de un proyecto, sino que también debe considerar los efectos negativos y positivos fuera de los límites de la planta. Estamos encargados de garantizar que la actividad productiva permita generar los bienes y servicios que necesitamos para satisfacer las necesidades humanas, sin olvidar que debemos cautelar la integridad de los recursos naturales que utilizamos, resguardar la salud y la seguridad de las personas, y respetar el marco legal establecido para su

protección. Hoy tenemos las herramientas para lograr estos objetivos y gestionar el proceso productivo de manera eficaz e integral, asegurando la sustentabilidad a largo plazo.

En la actualidad, todas las universidades se encuentran abocadas a enfrentar las necesidades de formación ambiental, introduciendo nuevos cursos y carreras. Adicionalmente, la Internet nos permite navegar a través del creciente número de sitios *web*, donde las agencias ambientales gubernamentales y no gubernamentales, e instituciones del mundo académico e industrial, ponen a disposición del público general un inmenso volumen de información sobre el estado-del-arte de las ciencias y la ingeniería ambiental. Más aún, en varios de esos sitios se encuentran cursos gratuitos sobre evaluación de impacto ambiental, auditorías, sistemas de tratamientos de residuos, normativa ambiental, prevención de la contaminación, gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, entre otros. Es muy probable que esta tendencia se acreciente, destruyendo toda excusa para cerrar los ojos y evitar aprender.

Espero que este texto introductorio, a pesar de sus limitaciones, sirva de guía a quienes quieren comenzar el proceso de aprendizaje en las herramienta de la ingeniería ambiental relevantes a la industria de procesos. Para aquellos que ya han iniciado el recorrido, espero que contribuya a ordenar los conocimientos dispersos y a incentivar la búsqueda de nuevos horizontes.

Finalmente, quiero recalcar que este libro no está dedicado a los expertos en ingeniería ambiental, ni pretende ser un Manual. Muy por el contrario, los temas se han abordado de manera general, sin profundizar en aquellos aspectos científicos y tecnológicos que se encuentran plenamente documentados en la literatura especializada. Más aún, varios tópicos no pudieron ser abordados debido a la necesidad de limitar la mirada a aquellas áreas de mayor prioridad en la actualidad. Y seguramente con el tiempo surgirán nuevos conceptos que ni siquiera han sido mencionados aquí. Desde ya, mis más sinceras disculpas.