

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**ANÁLISIS TÉCNICO-AMBIENTAL DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE  
VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE LA DESTILACIÓN SIMPLE DE  
SOLVENTES UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE EQUIPO, EN LA  
FABRICACIÓN DE PINTURAS BASE SOLVENTE**

PRESENTADO POR:

**CIVALLERO ALFARO, ELLIOT ANTONIO**

**PICHE MOZ, GABRIELA BEATRIZ**

**RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, HEIDY VANESSA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA "DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA", FEBRERO 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

**SECRETARIO GENERAL :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE  
ALIMENTOS**

**DIRECTORA :**

**ING. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de graduación previo a la opción al grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

TÍTULO

:

**ANÁLISIS TÉCNICO-AMBIENTAL DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE  
VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE LA DESTILACIÓN SIMPLE DE  
SOLVENTES UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE EQUIPO, EN LA  
FABRICACIÓN DE PINTURAS BASE SOLVENTE**

PRESENTADO POR

:

**CIVALLERO ALFARO, ELLIOT ANTONIO**

**PICHE MOZ, GABRIELA BEATRIZ**

**RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, HEIDY VANESSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESORA

:

**ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

SAN SALVADOR, FEBRERO 2021

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESORA :

**ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios por guiarnos a lo largo de nuestra carrera universitaria, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y por permitirnos culminar satisfactoriamente esta etapa tan importante de nuestras vidas.

También queremos agradecer a nuestra asesora Ing. Eugenia Gamero de Ayala, quien con sus conocimientos y apoyo nos guio a través de cada una de las etapas de esta investigación, que ahora presentamos con completo orgullo y satisfacción.

Por último, agradecemos a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Universidad de El Salvador por brindarnos todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para formarnos como profesionales.

Elliot Civalero, Gabriela Piche y Heidy Martínez.

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme finalizar este reto. A mis padres, abuela y hermana, personas de inmenso valor quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro.

A nuestra asesora, por la orientación y ayuda que nos brindó para la realización de este trabajo de graduación. A nuestros docentes de la escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión. A mis compañeras de trabajo de graduación que fueron un gran apoyo en todo este proceso.

A mis amigos que han estado desde mi infancia y los que he conocido recientemente. A todos, gracias.

“Una lección sin dolor no tiene sentido. Eso es porque no se puede ganar algo sin sacrificar algo a cambio. Sin embargo, una vez que hayas soportado el dolor y lo hayas superado, ganarás un corazón que es más fuerte que todo lo demás. Así es, un corazón de acero.” (Edward Elric)

Elliot Antonio Civalero Alfaro

## DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de poder culminar esta etapa de mis estudios profesionales y por la familia que me regalo.

A mi familia, en especial a mis padres y a mi hermana, personas de gran sabiduría que con sus consejos y sus palabras de aliento me impulsaron a llegar a este punto en donde me encuentro, luchar por mis ideales y siempre buscar ser una persona de bien poniendo en práctica todos los valores inculcados. A Minervita, quien con su compañía alegraba y reconfortaba mi corazón.

A mis amigos por apoyarme de manera incondicional, por su cariño y sobre todo por la comprensión durante este proceso de formación académica que este día se ve culminado. De igual forma, a mis compañeros de trabajo por toda la paciencia, la confianza, los consejos en mi camino profesional y todo ese apoyo que me brindaron durante los últimos años de mi formación académica. También a mis compañeros de trabajo de grado por su dedicación, por su trabajo y sobre todo su esfuerzo.

En última instancia, agradezco a cada uno de los catedráticos quienes con su conocimiento, paciencia y dedicación nos transmitieron de una manera activa cada una de las herramientas que aplicaremos durante nuestra etapa profesional.

Todos sin lugar a duda, son una parte importante de mi vida. Muchas gracias a todos.

Gabriela Beatriz Piche Moz

## **DEDICATORIA**

A Dios por guiarme a lo largo de mi carrera universitaria y a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, por forjar mi camino, por los valores inculcados y por creer siempre en mí. A mi madre Marilena Martínez por estar dispuesta a acompañarme en mis largas noches de estudio, por sus consejos y apoyo incondicional a lo largo de esta hermosa travesía. A mi padre Gabriel Arcángel Rodríguez por su sacrificio para brindarme una excelente educación en el transcurso de mi vida, sobre todo por su amor y por ser un excelente ejemplo de vida. A mis hermanos Brenda Beatriz, Gabriela Nicolle y Gustavo Adalberto, por ser parte importante del motor de mi vida y representar la unidad familiar. Mis agradecimientos hasta el cielo para mi “mamá Rosa” que, aunque ya no se encuentra físicamente, siempre estará presente en mi mente, gracias por haber creído en mí hasta el último momento.

A Elliot Antonio Civallero y Gabriela Piche Moz por haber sido excelentes compañeros de trabajo de grado, apoyándonos mutuamente para terminar satisfactoriamente este documento.

A Ing. Eugenia Gamero de Ayala por su valiosa asesoría, innumerables aportaciones, la confianza, consejos, paciencia y por compartir sus conocimientos a lo largo de la carrera y del presente trabajo de investigación.

A mis roomies: Erika Vanessa Puquirre y Adriana Jeanmillete Rodríguez, por ser parte significativa de mi vida, y por haber realizado el papel de una familia verdadera en todo momento, por la comprensión y sobre todo por la amistad. A mis amigos por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que no olvidaré.

**¡LO LOGRE, SOY INGENIERA QUÍMICO!**

Heidy Vanessa Rodríguez Martínez



## RESUMEN

Se realizó una comparación técnico-ambiental de las diferentes alternativas de valorización para los lodos procedente de la destilación simple de solventes utilizados en el lavado de equipo, en la fabricación de pinturas base solvente, con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa. Para esto fue necesario realizar una investigación bibliográfica de las alternativas de valorización de residuos, así como de las diferentes metodologías de evaluación de impacto ambiental. Considerando el proceso productivo, naturaleza de los lodos y disponibilidad de tecnologías en el país se seleccionaron dos alternativas de valorización: “coprocesamiento” y “valorización directa”; y debido a la información recopilada de las alternativas de valorización seleccionadas se optó por la metodología de evaluación de impacto ambiental: “Criterios Relevantes Integrados o VIA”. Posterior a la evaluación ambiental, se realizó un análisis comparativo de los requerimientos técnicos y de los impactos ambientales asociados a cada alternativa, por medio de una escala ponderada, con la cual se evidencio que la mejor alternativa para este tipo de residuos es la “Valorización directa”.

# ÍNDICE

ABREVIATURAS.....	1
INTRODUCCIÓN .....	4
OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA DE PINTURAS EN EL SALVADOR .....	7
1.1 Evolución de la industria de pinturas en El Salvador .....	7
1.2 Proceso productivo de pintura base solvente .....	9
1.2.1 Materias primas e insumos.....	14
1.2.1.1 Resinas.....	14
1.2.1.2 Solventes.....	15
1.2.1.3 Pigmentos.....	19
1.2.1.4 Aditivos .....	22
1.2.2 Salidas del proceso productivo de pinturas base solvente .....	24
1.2.2.1 Producto terminado.....	24
1.2.2.2 Emisiones atmosféricas.....	26
1.2.2.3 Residuos.....	26
1.3 Impactos ambientales asociados al proceso productivo de pinturas base solvente ..	27
1.4 Consideraciones Jurídicas y Normativas Ambientales Aplicables.....	30
1.4.1 Ley de medio ambiente.....	31

1.4.2	Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos.....	33
1.4.3	Acuerdo regional de desechos peligrosos .....	36
1.4.4	Convenio de Basilea .....	38
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DE LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS.....		
40		
2.1	Antecedentes de la revalorización de residuos peligrosos .....	40
2.2	Contexto histórico de la gestión de residuos en El Salvador .....	47
2.2.1	Ventajas de la disposición de residuos peligrosos en el Salvador .....	49
2.3	Alternativas utilizadas en la valorización de residuos peligrosos.....	50
2.3.1	Valorización directa .....	51
2.3.1.1	Valorización directa por métodos químicos .....	51
2.3.1.2	Valorización directa por métodos físicos .....	58
2.3.1.3	Valorización directa por métodos biológicos .....	66
2.3.2	Materia prima para uso secundario .....	73
2.3.3	Valorización energética .....	80
2.3.3.1.	Incineración .....	80
2.3.3.2.	Pirolisis .....	90
2.3.3.3.	Gasificación.....	94
2.3.3.4.	Plasma.....	96

2.3.3.5.	Tecnologías de digestión anaerobia.....	97
2.3.4	Control de contaminantes .....	99
2.3.5	Coprocesamiento.....	104
2.4	Tipos de residuos adecuados para la revalorización de residuos peligrosos .....	114
<b>CAPÍTULO 3. GENERALIDADES DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO</b>		
<b>AMBIENTAL.....</b>		
3.1	Antecedentes de la evaluación del impacto ambiental .....	118
3.2	Principales características de la EIA.....	120
3.3	Etapas del proceso EIA.....	122
3.4	Tipificación de impactos ambientales según el atributo indicado .....	130
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS MÁS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DEL</b>		
<b>IMPACTO AMBIENTAL.....</b>		
4.1	Métodos basados en listas.....	135
4.1.1	Las listas de chequeo o verificación .....	136
4.1.2	Cuestionarios.....	138
4.2	Matrices de interacciones (causa/efecto) .....	139
4.2.1	Matriz de Leopold.....	139
4.2.2	Matriz referencial de impactos ambientales .....	142
4.2.3	Matriz RIAM .....	142
4.2.4	Método de CNYRPAB: .....	147

4.2.5	Matriz de análisis por dimensiones.....	148
4.2.6	Guías metodológicas del M.O.P.U: .....	148
4.2.7	Método de MEL-ENEL .....	149
4.3	Métodos de indicadores o índices .....	156
4.3.1	Método de Holmes.....	156
4.3.2	Método de la Universidad de Georgia .....	157
4.3.3	Método de Fisher-Davies.....	158
4.3.4	Método de Hill – Schechter (Costo – Beneficio).....	158
4.4	Métodos basados en redes de interacciones.....	159
4.4.1	Método de Sorensen.....	159
4.4.2	Método Bereano.....	160
4.4.3	Evaluación de ciclo de vida .....	160
4.4.4	Método del Banco Mundial .....	163
4.4.5	Método de Odum .....	163
4.5	Métodos de cantidades o cuantitativos .....	164
4.5.1	Batelle–Columbus.....	164
4.5.2	Método de León .....	167
4.5.3	Método de cuantificación de valores estadísticos .....	168
4.5.4	Valoración monetaria.....	168
4.6	Análisis multicriterio .....	168

4.6.1	Método GAM - Matriz de logro de metas .....	168
4.6.2	Método de teoría de la utilidad multiatributo (MAUT) .....	172
4.6.3	Lógica difusa.....	175
4.6.4	Criterios relevantes VIA .....	175
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA TÉCNICO-AMBIENTAL DE		
VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE LA DESTILACIÓN SIMPLE DE		
SOLVENTES UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE EQUIPO, EN LA		
FABRICACIÓN DE PINTURAS BASE SOLVENTE.....		
		184
5.1	Selección de la alternativa de valorización.....	184
5.2	Evaluación de impacto ambiental de las tecnologías seleccionadas.....	185
5.2.1	EIA de coprocesamiento.....	186
5.2.1.1	Descripción de la alternativa de coprocesamiento .....	186
5.2.1.2	Descripción de componentes ambientales en el área de influencia del proyecto.....	186
5.2.1.3	Matrices de identificación y evaluación de impactos.....	187
5.2.2	EIA de la valorización directa.....	196
5.2.2.1	Descripción de alternativa de valorización directa .....	196
5.2.2.2	Descripción de componentes ambientales en el área de influencia del proyecto.....	196
5.2.2.3	Matrices de identificación y evaluación de impactos.....	197

5.3 Comparación de alternativas seleccionadas.....	206
CONCLUSIONES .....	213
RECOMENDACIONES.....	215
ANEXOS.....	222
ANEXO A-1. MEMORIA DE CÁLCULO PARA LA ALTERNATIVA DE COPROCESAMIENTO .....	224
ANEXO A-2. MEMORIA DE CÁLCULO PARA LA VALORIZACIÓN DIRECTA .....	231
ANEXO A-3. MEMORIA DE CÁLCULO DE CPR PARA COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN.....	238

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Clasificación de disolventes por su naturaleza química.....	17
Tabla 1.2	Clasificación de pigmentos orgánicos e inorgánicos. ....	21
Tabla 1.3	Principales problemas ambientales en la producción de pintura.....	27
Tabla 1.4	Impacto de los metales pesados en la contaminación ambiental.....	29
Tabla 2.1	Finalidad de las etapas de una incineradora de residuos.....	82
Tabla 2.2	Lista de los residuos no adecuados para el coprocesamiento.....	112
Tabla 2.3	Resumen del potencial de valorización de recursos y energía de los desechos peligrosos (orgánicos).....	115
Tabla 2.4	Resumen del potencial de valorización de recursos y energía de los desechos peligrosos (inorgánicos) .....	116
Tabla 4.1	Criterio de evaluación RIAM.....	145
Tabla 4.2	Valores de ES y marcas de rango.....	147
Tabla 4.3	Desglose de Acciones del Proyecto.....	150
Tabla 4.4	Desglose de Factores Ambientales.....	152
Tabla 4.5	Matriz de Identificación de Impactos.....	153
Tabla 4.6	Nombres Claves de la Matriz de Identificación de Impactos.....	153
Tabla 4.7	Caracterización por Impacto Genérico.....	154
Tabla 4.8	Resumen de Resultados de evaluación.....	155
Tabla 4.9	Comparación "todos contra todos" de criterios e impactos genéricos. ....	155
Tabla 4.10	Matriz de CSR.....	156
Tabla 4.11	Matriz de Factores y Pesos.....	167



Tabla 4.12	Criterio de puntuación en GAM .....	169
Tabla 4.13	Ejemplo de criterios de puntuación .....	170
Tabla 4.14	Criterios, puntuaciones y pesos del GAM.....	171
Tabla 4.15	Escalas de medición por criterio. ....	181
Tabla 4.16	Escala de Valoración de Incidencia de los Impactos.....	182
Tabla 5.1	Componentes ambientales en el área de influencia del proyecto Coprocesamiento.....	187
Tabla 5.2	Evaluación del criterio impacto de la alternativa de coprocesamiento. ....	188
Tabla 5.3	Evaluación del criterio intensidad de la alternativa de coprocesamiento.....	189
Tabla 5.4	Rango de criterio para evaluación de la intensidad de la alternativa de coprocesamiento.....	189
Tabla 5.5	Evaluación del criterio extensión de la alternativa de coprocesamiento.....	190
Tabla 5.6	Rango de criterio para evaluación de la extensión de la alternativa de coprocesamiento.....	190
Tabla 5.7	Evaluación del criterio duración de la alternativa de coprocesamiento. ....	191
Tabla 5.8	Rango de criterio para evaluación de la duración de la alternativa de coprocesamiento.....	191
Tabla 5.9	Evaluación del criterio reversibilidad de la alternativa de coprocesamiento.	192
Tabla 5.10	Rango de criterio para evaluación de la reversibilidad de la alternativa de coprocesamiento.....	192
Tabla 5.11	Evaluación del criterio posibilidad de ocurrencia de la alternativa de coprocesamiento.....	193

Tabla 5.12	Rango de criterio para evaluación de la posibilidad de ocurrencia de la alternativa de coprocesamiento. ....	193
Tabla 5.13	Cálculo de la magnitud de la alternativa de coprocesamiento. ....	194
Tabla 5.14	Cálculo del valor del impacto ambiental de la alternativa de coprocesamiento.....	194
Tabla 5.15	Cálculo de la severidad de la alternativa de coprocesamiento. ....	195
Tabla 5.16	Escala de valoración de incidencia de impactos utilizada en la evaluación de impacto ambiental para la alternativa de coprocesamiento .....	195
Tabla 5.17	Componentes ambientales en el área de influencia del proyecto – Valorización directa. ....	197
Tabla 5.18	Evaluación del criterio impacto de la alternativa de valorización directa. ....	197
Tabla 5.19	Evaluación del criterio intensidad de la alternativa de valorización directa. ..	198
Tabla 5.20	Rango de criterio para evaluación de la intensidad de la alternativa de valorización directa. ....	199
Tabla 5.21	Evaluación del criterio extensión de la alternativa de valorización directa. ...	199
Tabla 5.22	Rango de criterio para evaluación de la extensión de la alternativa de valorización directa. ....	200
Tabla 5.23	Evaluación del criterio duración de la alternativa de valorización directa.....	200
Tabla 5.24	Rango de criterio para evaluación de la duración de la alternativa de valorización directa. ....	201
Tabla 5.25	Evaluación del criterio reversibilidad de la alternativa de valorización directa. ....	201

Tabla 5.26	Rango de criterio para evaluación de la reversibilidad de la alternativa de valorización directa. ....	202
Tabla 5.27	Evaluación del criterio posibilidad de ocurrencia de la alternativa de valorización directa. ....	202
Tabla 5.28	Rango de criterio para evaluación de la posibilidad de ocurrencia de la alternativa de valorización directa.....	203
Tabla 5.29	Cálculo de la magnitud de la alternativa de valorización directa.....	203
Tabla 5.30	Cálculo del valor del impacto ambiental de la alternativa de valorización directa.....	204
Tabla 5.31	Cálculo de la severidad de la alternativa de valorización directa.....	205
Tabla 5.32	Escala de valoración de incidencia de impactos utilizada en la evaluación de impacto ambiental para la alternativa de valorización directa. ....	205
Tabla 5.33	Factores y componentes ambientales afectados por cada alternativa de valorización. ....	206
Tabla 5.34	Cantidad de impactos según severidad para cada alternativa de valorización.	207
Tabla 5.35	Requerimientos técnicos de las alternativas de valorización .....	208
Tabla 5.36	Pesos relativos de los impactos según su severidad. ....	208
Tabla 5.37	Comparación de alternativas por medio de escala CPR.....	209
Tabla 5.38	Resumen comparativo de alternativas de valorización. ....	211

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de fabricación de pintura base solvente.....	13
Figura 2.1	Jerarquía de gestión de desechos.....	45
Figura 2.2	Línea de tiempo de instituciones y leyes salvadoreñas para la gestión de residuos y desechos. ....	47
Figura 2.3	Esquema de incineración en horno de parrilla. ....	83
Figura 2.4	Esquema horno rotativo de incineración.....	86
Figura 2.5	Diagrama de proceso de una planta de pirolisis.....	91
Figura 2.6	Ejemplo de proceso de gasificación.....	95
Figura 2.7	Proceso de digestión anaerobia .....	98
Figura 2.8	Esquema del proceso de fabricación del Clinker .....	107
Figura 3.1	Proceso de evaluación de impacto ambiental .....	129
Figura 4.1	Esquema de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	162

## ABREVIATURAS

A lo largo de la presente investigación se utilizaron las siguientes abreviaturas:

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de Calcio
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl <sub>2</sub>	Cloro
Cl <sub>2</sub> O	Dióxido de Cloro
ClO	Ion Hipoclorito
CNYRPAB	Departamento de Desarrollo y Planificación Regional del Estado de Nueva York
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COV	Carbono Orgánico Volátil
CPC	Cámara de Postcombustión
CRS	Coficiente de Significancia Relativa
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
E	Energía
EDTA	Ácido Etilendiaminotetraacético
EIA	Evaluación del Impacto Ambiental
EPA	Agencia de Protección Ambiental

EPP	Equipo de Protección Personal
EsIA	Estudio de Impacto Ambiental
GAM	Matriz Logros-Metas
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ácido Carbónico
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HCB	Hexaclorobenceno
HCl	Ácido Clorhídrico
HClO	Ácido Hipocloroso
HF	Ácido Fluorhídrico
HI	Ácido Yodhídrico
ISO	Organización Internacional de Normalización
ISWA	Asociación Internacional de Desechos Sólidos
Kg	Kilogramo
M	Magnitud
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
MAUT	Teoría de Utilidad Multiatributo
MIBK	Metil-Isobutil-Cetona
MINSAL	Ministerio de Salud de El Salvador
MJ	Mega Joules

MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
MOPU	Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo
NaClO	Hipoclorito Sódico
NO <sub>3</sub>	Ion Nitrato
NOX	Óxidos de Nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCB	Policlorobifenilos
PCDD/F	Policlorodibenzofuranos/Policlorodibenzodioxinas
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial de Hidrógeno
PINSAL	Pinturas Salvadoreñas
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PVC	Policloruro de Vinilo
RIAM	Evaluación de Impacto Rápida
S	Severidad
SH <sub>2</sub>	Sulfuro de Hidrógeno
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre
UIP	Unidades de Importancia Relativa
UNE	Una Norma Española
UV	Radiación Ultravioleta
VIA	Valor de Impacto Ambiental
VOC	Compuestos Orgánicos Volátiles

## INTRODUCCIÓN

La industria de fabricación de pintura ha presentado un incremento en los últimos años, así como un constante desarrollo y evolución con avances tecnológicos en sus procesos productivos. Su fabricación carece de reacción química, el proceso es más bien, una serie de operaciones mecánicas discontinuas que consiste en la mezcla de diferentes proporciones de resinas, solventes y aditivos, dependiendo del fin para la cual fue formulada. Luego del proceso de fabricación, todos los instrumentos y equipos usados se deben limpiar antes de iniciar el siguiente lote de producción, para ello es necesario una mezcla de diferentes tipos de solventes, que al finalizar son recuperados por medio de la destilación simple, para ser utilizados nuevamente para el proceso de lavado. Además de los solventes recuperados, se obtienen “lodos o fondos de destilación” que debido a su contenido de metales pesados e inflamabilidad son considerados residuos peligrosos. Si no se disponen de forma adecuada, pueden terminar en vertederos, rellenos sanitarios o ser quemados, con grandes consecuencias medioambientales o a la salud humana.

Según el artículo 25 del Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos de El Salvador “cualquier proceso de tratamiento de desechos peligrosos debe realizarse preferentemente y cuando ello sea posible en el lugar de su generación”.

En El Salvador se han realizado una serie de investigaciones en el ámbito de las pinturas, entre las que se encuentran: “Tratamiento de carbonato de calcio natural para lograr su utilización en pinturas” por José María Jacome y Carlos Alfonso Saade en 1977. En 1974 Velásquez Vidal y Carlos Rolando investigaron la: “Aplicación industrial del alcohol etílico como solvente en la industria de pintura”. En 2006 Marlene Noemy Blanco y Elsy Guadalupe Elías investigaron la “Evaluación de la presencia de plomo en pinturas de producción nacional y en utensilios de cocina elaborados con barro revestidos de barniz y su incidencia en la salud ocupacional de los



trabajadores”. Mas a detalle y en el ámbito ambiental se cuenta con el trabajo de grado denominado: “Estudio Comparativo de la aplicación de Zeolita y Carbón activado en el tratamiento de aguas residuales de la fabricación de pinturas base agua” por Alejandra Calderón, Valeria Elizabeth López y Camilo Edgardo Siete en 2016.

Pero ninguna de las investigaciones aborda los impactos asociados a las técnicas de valorización de lodos procedente de la destilación simple de solventes utilizados para el lavado de equipo, por lo tanto, se realizará un “Análisis técnico-ambiental de las diferentes alternativas de valorización de lodos procedente de la destilación simple de solventes utilizados para el lavado de equipo, en la fabricación de pinturas base solvente”.

# OBJETIVOS

## **Objetivo general de la investigación**

Realizar un análisis técnico-ambiental de las diferentes alternativas de valorización de lodos procedente de la destilación simple de solventes utilizados para el lavado de equipo en la fabricación de pinturas base solvente.

## **Objetivos específicos**

1. Realizar una investigación bibliográfica de los antecedentes de la valorización de residuos peligrosos en El Salvador.
2. Determinar los residuos y desechos generados en el proceso productivo de pinturas base solvente.
3. Identificar las diferentes tecnologías de valorización de residuos peligros aplicados a la industria de pinturas base solvente.
4. Identificar y valorizar los impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las alternativas de valorización.
5. Realizar análisis técnico-ambiental de las alternativas de valorización de lodos procedentes de la destilación simple de solventes.

# **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA DE PINTURAS EN EL SALVADOR**

El presente capítulo versará sobre la historia de la industria de la pintura nacional, así como el proceso productivo que se lleva a cabo para realizarla, las materias primas que se utilizan en su elaboración. También se tratará sobre la aplicación de las distintas leyes nacionales e internacionales, emitidas para la protección del medio ambiente, que en los últimos años se ha visto bastante afectado, y por medio de estas los países han tomado conciencia de la protección que se debe hacer del mismo, es por ello por lo que se emiten disposiciones de protección, así como de sanción para los que de una u otra forma, ya sea directa o indirectamente dañan nuestro medio ambiente. A fin de que tanto los ciudadanos como las personas jurídicas, modifiquen la forma en que se deshacen de los desechos que afectan nuestro entorno.

## **1.1 Evolución de la industria de pinturas en El Salvador**

La pintura desde la antigüedad ha tenido una presencia significativa en la vida del hombre, en sus inicios esta era usada como un medio de expresión, para pintar cavernas en las que los antepasados plasmaban imágenes y siluetas con motivos religiosos o místicos, por lo que su uso se limitaba a fines decorativos. Con el pasar del tiempo el hombre evolucionó de pintar cavernas, a aplicar pintura sobre sus edificaciones y monumentos como es el caso de las grandes y antiguas pirámides egipcias, edificaciones griegas y casas del imperio chino

En Europa, el uso de pinturas como protección se inicia en el siglo XII D.C. Aunque los romanos ya conocían el empleo del aceite de linaza como medio fluido para la pintura, los artistas solo lo utilizaron a partir del siglo XV. La pintura hecha con mezclas de pigmentos y medios fluidos se empezó a comercializar en el siglo XVIII (Mihalache, 2015).

Pasado el tiempo y con la evolución de la ciencia se fueron tecnificando las mezclas de pinturas mejorando sus propiedades, agregado así, más tecnologías a las formulaciones, llegando a convertir la fabricación de pinturas en toda una industria.

En la década de los años cincuenta, El Salvador en la búsqueda de diversificar la industria, otorga concesiones y reforma las leyes laborales para mejorar el clima de inversión y así potenciar la creación de empleos. En el rubro de pintura, lacas y barnices, dos empresas fueron las primeras en establecer sus plantas en el territorio nacional, Pinturas Salvadoreñas (PINSAL, S.A. de C.V.) y Sherwin-Williams.

#### PINSAL, S.A. de C.V.

Fundada en 1956 por la familia Funes Hartmann, fue la segunda fábrica de este tipo a nivel centroamericano. PINSAL comenzó comercializando sus productos en diferentes ferreterías del país; con los años se vieron en la necesidad de diversificar sus productos para suplir las distintas necesidades de la población. En 1962 apertura COLORAMA, su propio centro de distribución de pinturas, con 6 salas de venta en San Salvador. Fruto del éxito obtenido, PINSAL logró expandir su fábrica pasando de los 2,500 m<sup>2</sup> a los 10,000 m<sup>2</sup> en 1975 y por consiguiente aumento su capacidad de producción y realizó una importante mejora tecnológica. En 1989 apertura su propia planta de aerosol, convirtiéndose en la primera y única planta en fabricar aerosol en El Salvador y exportar dicho producto a Centroamérica, El Caribe y Sudamérica. En la actualidad, PINSAL S.A. de C.V. es una única fábrica de pinturas y barnices con capital 100% salvadoreño.

#### SHERWIN-WILLIAMS Centroamérica

Fue fundada en 1866 por Henry Sherwin y Edward Williams en Ohio, quienes en 1877 revolucionaron la industria al fabricar una pintura lista para usarse.

Comenzó sus operaciones en El Salvador en 1959, en conjunto con la Junta Directiva de Freund S.A. con quienes ya estaban asociados, mediante la utilización de licencia y patente.

Con su fundación se crearon nuevas oportunidades de empleo y se logró reducir las importaciones de pintura lo cual estabilizó el clima fiscal del país. Con el paso de los años la empresa logró convertirse en la primera en cuanto a nivel de producción de pinturas, lacas y barnices en el territorio y con uno de los estándares de calidad más altos.

Al pasar de los años se unió PINTURAS SUR, quien llegó a El Salvador en 1999 con el propósito de comercializar pintura bajo la norma ISO 14001, Sin embargo, tiempo después suspendió sus operaciones de manufactura y se limitó a su comercialización dentro del territorio salvadoreño. Entre los productos que comercializan están: pinturas automotriz, arquitectónico, industrial y mantenimiento.

También existen otras empresas que a pesar de no tener planta de producción han conseguido posicionarse en el mercado nacional como la mexicana COMEX o la puertorriqueña Pinturas LANCO, ambas también teniendo gran aceptación en el país.

## **1.2 Proceso productivo de pintura base solvente**

La fabricación de pinturas consiste en la mezcla en diferentes proporciones de resina, solvente, pigmento, secantes y aditivos, dependiendo del fin para la cual fue formulada. Todos estos componentes cumplen diferentes funciones dentro la formulación.

Algunos de estos son los siguientes:

- a) Resinas: Las resinas son sustancias poliméricas que brindan la continuidad de la película y la adherencia. Estas son el componente primario del remanente después del curado.

- b) Solventes: Los solventes, incluyendo el agua, son líquidos volátiles necesarios para dispersar o disolver la resina. La cantidad y tipos de solventes usados tienen una influencia en la viscosidad de la pintura.
- c) Pigmentos: los pigmentos son materiales sólidos que tienen como función proporcionar a la pintura las características de opacidad y color.
- d) Aditivos: Los aditivos incluyen elementos como los diluyentes, que se añaden para modificar las propiedades reológicas, el brillo y las propiedades mecánicas de la pintura.

El esquema de fabricación en la industria de pinturas sigue el mismo esquema de procesamiento, considerando similares etapas de proceso para los diferentes tipos de pintura. El proceso de fabricación empieza con la recepción de materias primas, esta actividad se lleva a cabo en las bodegas y se clasifican de acuerdo con las características químicas y físicas que posean, respetando la compatibilidad y peligrosidad de estas.

Antes de aceptar o rechazar cada lote de materia prima, se toma una muestra representativa y se somete a un análisis de control de calidad. Este consiste en comparar los datos plasmados en los certificados de calidad proporcionados por los proveedores con los obtenidos mediante pruebas fisicoquímicas en el laboratorio, y de esta manera verificar si cada materia prima cumple con las especificaciones indicadas.

Luego tenemos la etapa de preparación de equipo y el pesaje de materias primas según la fórmula de cada producto. Cada equipo por utilizar debe estar completamente limpio y ser adaptado para el tipo de proceso a seguir.

Posteriormente, se tiene la elaboración de las bases y pastas pigmentarias por medio de un proceso de dispersión. Según Oyarzún, la dispersión de pigmentos y cargas se refiere a un proceso

gradual cuyo objetivo es producir una dispersión estable y uniforme de partículas finamente divididas. Este proceso comienza con la disolución de los aglomerados más o menos débilmente ligados en sus elementos constitutivos, por la acción de fuerzas mecánicas (fuerzas de cizalla), incrementando así la superficie de contacto.

Luego que las partículas son separadas, se mezclan de forma más eficiente con los componentes del medio (sustancias humectantes, resinas y solventes). Estos se extienden por toda la superficie de las partículas con el fin de sustituir la interfaz inicial pigmento-carga/aire o pigmento-carga/humedad por una nueva interfaz pigmento-carga/medio.

Ambos subprocesos, la disolución de los aglomerados y humectación, son seguidos por una tercera etapa: la estabilización. Esto comprende la distribución homogénea de las partículas separadas y humectadas, y la conservación de la fase dispersa. En otras palabras, se debe evitar una coalescencia o re-aglomeración de las partículas. Esto se logra por la presencia de una capa de vehículo adsorbida en la superficie del pigmento, o por la formación de una doble capa eléctrica alrededor de las partículas (Oyarzún, 2015).

Una vez concluida la etapa de dispersión, las pastas pigmentarias en algunas ocasiones deben pasar por un proceso de molienda, donde el tamaño de partícula va del orden de cinco a diez micrones. Cuanto más fino el molido, más fuerza de color tendrá la pasta. Los dos tipos de molinos más comunes para esta operación son los molinos de arena o piedras y los molinos de cilindros o tres rodillos.

Alcanzado el tamaño de la partícula deseado (también llamado finura) la pasta pigmentaria o base se transfiere a los tanques de mezcla con agitación o envases para su almacenamiento.

Tanto las bases como las pastas pigmentarias son mezcladas en diferentes proporciones según la formulación con resinas, aditivos y solventes, con el fin de darle las propiedades deseadas.

Luego de añadir todos los componentes se toma una muestra representativa del lote producido y es llevado al laboratorio de control de calidad, donde se analizarán sus propiedades físicas y se verificara que los valores estén dentro de los estándares definidos por el mismo. Si alguno de los parámetros esta fuera de especificaciones, el lote será ajustado hasta que todos los parámetros cumplan. La secuencia del proceso de fabricación de pinturas descrito con anterioridad puede observarse de forma general en la Figura 1.1.

Terminado el proceso de fabricación de pintura, todos los instrumentos y equipos usados deben ser limpiados antes de iniciar el siguiente lote de producción, para ello es necesario emplear una mezcla de solventes (Xileno, Tolueno, Solvente Mineral y MIBK), que al finalizar es recuperada por medio de la destilación simple o fraccionada. Finalmente, el producto terminado es envasado, ya sea de forma manual por medio de un sistema de tolvas y tuberías, o bien por medio de una máquina de llenado automático, y transportado a los puntos de distribución. La pintura bases solvente se caracteriza por poseer una alta duración y colores brillantes. Son utilizadas comúnmente en acabados arquitectónicos, de especialidad (retardante de llamas, protecciones de equipos, automotriz, etc.) y en ambientes agresivos (con alta humedad, presencia de agentes químicos y mecánicos, altas temperaturas, corrosivos, etc.)



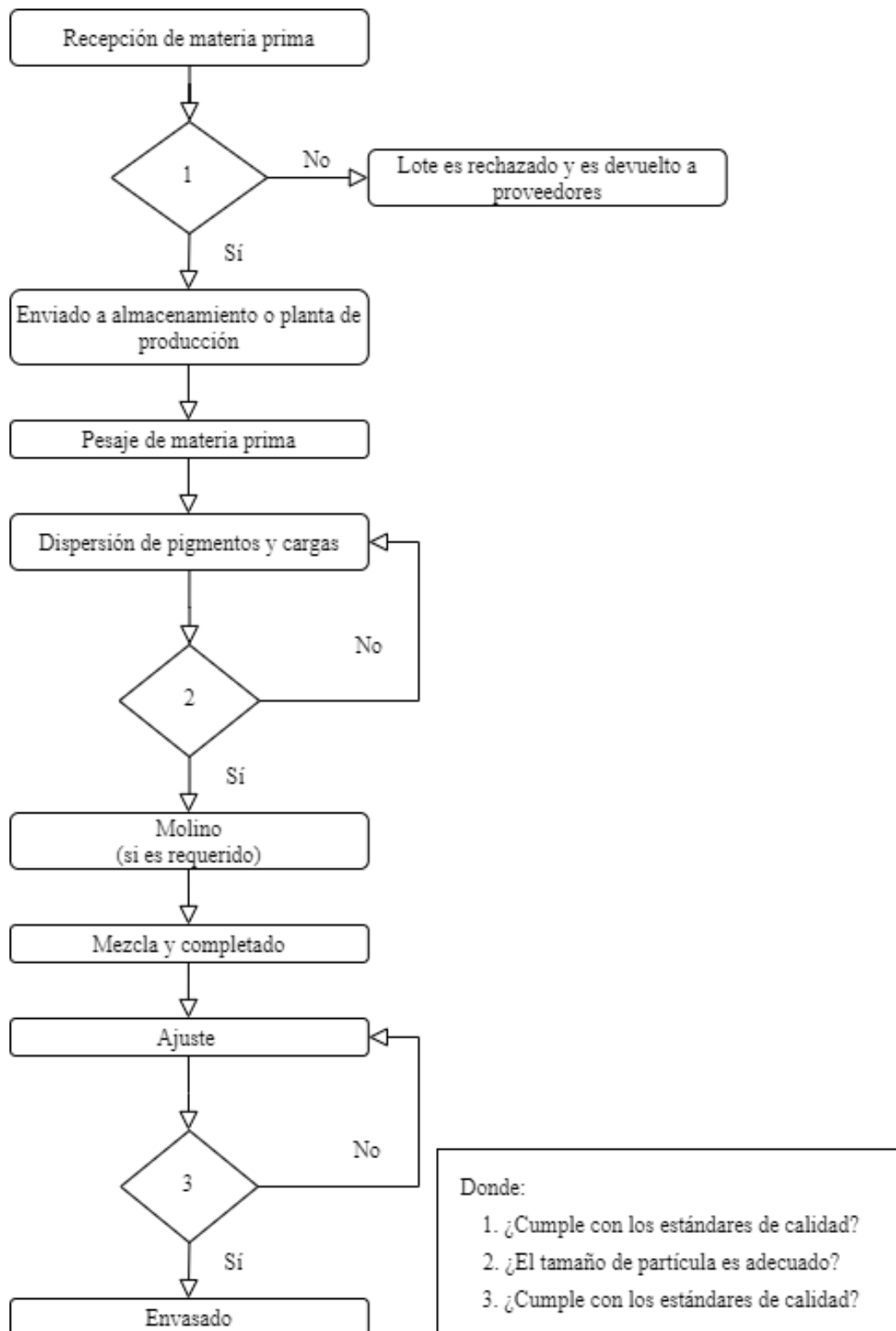


Figura 1.1 Proceso de fabricación de pintura base solvente.

## 1.2.1 Materias primas e insumos.

### 1.2.1.1 Resinas

Existen diferentes tipos de resinas que son utilizadas para la fabricación de recubrimientos, entre ellas podemos distinguir las alquídicas y poliésteres, epóxicas, acrílicas y amino resinas. Las resinas alquídicas son las de mayor uso comercial (Nelson, 2012), por lo que nos enfocaremos únicamente en las propiedades y características de este tipo de resinas.

Las resinas alquídicas modificadas químicamente, no son más que la condensación productos de ácidos polibásicos y alcoholes polihídricos. Se modifican a menudo con otros materiales poliméricos para una determinada propiedad. Las modificaciones le confieren una buena combinación de dureza y flexibilidad, resistencia a la corrosión muy aceptable, buena retención del brillo, buena adherencia a los materiales ferrosos y metales no ferrosos, y otras propiedades que hacen que sean aceptables para su uso en madera, metal, plástico, materiales compuestos, y otros sustratos. Una resina alquídica puede modificarse con una serie de intermedios. Algunos de los tipos más comunes son:

- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| a) Acrilatos y monómeros de metacrilato | f) Fenólicos                         |
| b) Ácido benzoico                       | g) Poliamidas                        |
| c) Epóxidos                             | h) Colofonias y ésteres de colofonia |
| d) Isocianatos                          | i) Silicona                          |
| e) Resinas de hidrocarburos             | j) Estireno                          |
|   | k) Vinilo tolueno                    |

Las resinas alquídicas pueden ser modificados con los productos intermedios anteriores para alterar significativamente los atributos de rendimiento de los recubrimientos hecho con ellos.

### *Propiedades físicas de las resinas alquídicas:*

Las propiedades físicas más comunes utilizadas para identificar las características de las resinas alquídicas están determinadas por los métodos de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés).

- a) Densidad o gravedad específica también se refiere a el peso por galón: puede determinarse en base a ASTM D1475, Método de prueba estándar para determinar la densidad del líquido ya sea para recubrimientos, tintas y productos relacionados.
- b) Contenido no volátil: se determina el contenido no volátil de las soluciones alquídicas con ASTM D1259, Métodos de Prueba Estándar para el contenido no volátil de las soluciones de resina. Las soluciones de resina alquídica varían desde un 30% de contenido no volátil (para acabados lisos, alquídicos de aceite medio) hasta un 100% de contenido no volátil por peso (alquitranes de aceite muy largos para pinturas exteriores, tintes, modificadores de látex y productos similares).
- c) Propiedades de secado: son importantes cuando se trata de describir el producto. Los secadores metálicos están basados en cobalto, manganeso, aluminio, hierro, zinc, calcio o tierras raras que reaccionan con ácidos orgánicos sintéticos, como los ácidos grasos, para formar jabones. Mezclas de estos secantes se añaden al recubrimiento a base de alquídicos y actúan como catalizadores acelerando la velocidad de secado al aire y la reticulación. Las composiciones y proporciones de las mezclas se eligen para maximizar la estabilidad y proporcionar la superficie deseada de la película seca.

#### **1.2.1.2 Solventes**

Los solventes por ser uno de los principales vehículos, en el cual el pigmento y los aditivos son dispersados, es necesario conocer su definición, propiedades y clasificación.

Los solventes son sustancias por lo general líquidas capaces de disolver otras sustancias en forma líquida. En la industria de pinturas, los disolventes disuelven las resinas formadoras de película sólidas o semisólidas y reducen la viscosidad para que la pintura se pueda aplicar de manera uniforme y delgada en la superficie. Aunque los disolventes son componentes transitorios de una pintura, afectan significativamente no sólo las características de aplicación de una pintura, sino también la apariencia, las propiedades físicas y la durabilidad del recubrimiento (Yuhas & Montemayor, 2012).

Los solventes poseen varias propiedades que influyen en la fabricación de la pintura como la viscosidad, solvencia y tasa de evaporación, estas deben considerarse para elegir el solvente adecuado de acuerdo con los pigmentos y aditivos que requieran las pinturas, y así el solvente no afecte las características de la pintura tales como la durabilidad del recubrimiento y las propiedades físicas de esta.

Los dos requisitos de rendimiento más importantes que deben tenerse en cuenta al seleccionar el disolvente adecuado para cualquier uso final del recubrimiento son la solvencia y la tasa de evaporación. Estas propiedades claves controlan la viscosidad inicial de la pintura durante aplicación, viscosidad del recubrimiento en varias etapas de secado, y la apariencia final del recubrimiento. Los disolventes deben evaporarse relativamente rápido durante el secado inicial para evitar el flujo excesivo, pero deben evaporarse más lentamente después para proporcionar una buena nivelación y adhesión (Yuhas & Montemayor, 2012).

Estos pueden clasificarse tanto por su naturaleza química (Ver Tabla 1.1), como por la función que cumplen dentro de la formulación.

Tabla 1.1 Clasificación de disolventes por su naturaleza química.

<b>Disolventes</b>	
<p><b>Hidrocarbonados</b> Son los disolventes más débiles en cuanto a solvencia. Se consideran los más adecuados para resinas naturales y naturales-modificadas llámense “Dry-oil”, barnices, alquídicas, asfalto, colofonia, y resinas de petróleo. No se recomiendan en general para resinas vinílicas, epóxicas, uretanadas, acrílicas y nitrocelulosas.</p>	<p><b>Alifáticos:</b> se fabrican destilando las fracciones del intervalo de ebullición adecuado de petróleo crudo y posteriormente tratarlos para mejorar el olor y estabilidad de color.  <b>Aromáticos:</b> son compuestos insaturados cíclicos. Existen cuatro disolventes aromáticos comúnmente utilizados por la industria de los recubrimientos: Tolueno, xilenos mezclados y dos naftas aromáticas de alto brillo.  <b>Nafténicos:</b> La mayoría de los disolventes de hidrocarburos alifáticos contienen pequeñas cantidades de naftenos. Propiedades intermedias entre los alifáticos y aromáticos.  <b>Terpenos:</b> son los disolventes más antiguos utilizados en los recubrimientos de la civilización egipcia. Los principales solventes en este grupo son trementina, di penteno y aceite de pino. Químicamente, son mezclas de compuestos de hidrocarburos insaturados de diez carbonos.</p>
<p><b>Oxigenados</b> Los disolventes oxigenados contienen oxígeno en la molécula a diferencia de disolventes de hidrocarburos. Como consecuencia de ello, su coste es algo más elevado.</p>	<p>Se utilizan como disolventes activos para la mayoría de las resinas sintéticas. Su fuerte solvencia, junto con el amplio rango de volatilidades disponibles, los convierte en un grupo extremadamente importante de disolventes para la industria de los recubrimientos. Existen cuatro tipos principales de disolventes oxigenados ampliamente utilizado en recubrimientos: cetonas, ésteres, éteres de glicol (alcoholes éter) y alcoholes.</p>
<p><b>Otros Solventes</b></p>	<p><b>Cetonas:</b> Esta versátil clase de disolventes tiene potente solvencia y una amplia gama de tasas de evaporación. A menudo se utiliza en aerosoles y recubrimientos por pulverización, especialmente en nitrocelulosa y lacas acrílicas, para reducir eficazmente la viscosidad para la aplicación por aspersion y luego se evapora rápidamente durante la aplicación.  <b>Ésteres:</b> Los ésteres utilizados como disolventes son alquilo acetatos y propionatos y acetatos de éter de glicol. Los acetatos de éter de glicol son disolventes de evaporación lenta, y se utilizan como retardantes disolventes en recubrimientos a base de disolventes y como coalescentes en pinturas de látex.  <b>Alcoholes:</b> Los alcoholes se caracterizan físicamente por tener olores suaves y agradables. Por sí mismos, los alcoholes son disolventes muy pobres para la mayoría de los polímeros. Los alcoholes encuentran aplicaciones como disolventes latentes o disolventes para lacas nitro celulósicas, melamina-formaldehído y resinas de urea formaldehído y ciertos alquídicos.</p>

Por su función se pueden clasificar en:

- a) Disolventes activos, a veces llamados "disolventes verdaderos", son los que realmente hacen el trabajo de disolver las resinas y otros formadores de películas, además de reducir eficazmente la viscosidad de pinturas, barnices y lacas para su aplicación. Los disolventes activos suelen ser los más caros y con un fuerte poder disolvente, por ejemplo: cetonas, ésteres, y éteres de glicol.
- b) Los disolventes latentes son pobres para la mayor parte de resinas. Sin embargo, poseen una solvencia oculta o latente que se manifiesta cuando se utilizan en combinación con disolventes activos y se comportan entonces, como si fueran disolventes activos fuertes. Esta sinergia se utiliza como ventaja en la formulación de lacas de nitrocelulosa. Los disolventes latentes son a menudo alcoholes de coste intermedio.
- c) Los diluyentes, generalmente, no son disolventes si se usan solos con productos sintéticos. Su función es proporcionar una reducción de la viscosidad a través de la dilución de lacas y pinturas, y para reducir el coste de los disolventes y recubrimiento de mezclas de disolventes. Los diluyentes son generalmente disolventes de hidrocarburos de bajo costo.

Cabe resaltar que existe un límite en la cantidad de diluyente tolerado por las resinas de recubrimiento en una mezcla de disolventes, si este es excedido, las resinas comenzarán a gelificarse o a precipitarse en la solución. Los disolventes de hidrocarburos aromáticos, normalmente, son tolerados en mayores cantidades que los hidrocarburos alifáticos.

La solvencia es el principal requisito de rendimiento de un solvente. Desde un punto de vista práctico, el término "solvencia" para un formulador de recubrimientos se refiere a la capacidad de un solvente para disolver las resinas, mantener esas resinas en solución cuando se encuentren en presencia de diluyentes, y reducir eficientemente la viscosidad de las soluciones de resina, lacas y pinturas.

### **1.2.1.3 Pigmentos.**

Los pigmentos pueden ser blancos, negros, de colores o fluorescentes particularmente sólidos, de naturaleza orgánicos o inorgánicos, usualmente dispersados debido a que son insolubles en la mayoría de los líquidos comunes, por lo que no son afectados química o físicamente por el vehículo o sustrato en el que son incorporados. Son capaces de alterar la apariencia de la superficie por medio de la absorción o dispersión selectiva de la luz.

El índice de color (C.I. por sus siglas en inglés) identifica cada pigmento asignándole a cada uno un único "Nombre y número de índice de color". Esta descripción permite identificar inequívocamente la composición química del pigmento.

Los pigmentos tienen dos funciones principales, estética y de protección. Proporcionan la opacidad y el color de un recubrimiento. La acción óptica en sí misma se produce en la superficie de las partículas de pigmento. La luz es reflejada en la superficie, la cual se dispersa y es retornada desde el interior de los recubrimientos. Si los pigmentos son poco efectivos en su función óptica, el grosor de película será mayor para proveer el color y la opacidad necesarios.

Debido a que son partículas, pueden afectar las características de apariencia relacionadas con la textura, como lo es el brillo. En el proceso de secado, los pigmentos se mantienen dentro

del sustrato gracias a la resina, y son estos los encargados de brindar al sustrato una protección mecánica y química contra el medio ambiente.

Sus características más importantes, según Siete, Calderón y López son:

- a) Estabilidad térmica: resistencia a la temperatura del color sin que cambie de tono de manera significativa.
- b) Toxicidad: control de la cantidad de metales pesados o material peligroso que pueda afectar la salud de los usuarios.
- c) Poder tintóreo: capacidad del pigmento para colorear los materiales.
- d) Resistencia al intemperismo: resistencia a la decoloración de los pigmentos en la intemperie.
- e) Dispersión: capacidad de ser homogéneo, se le atribuye al tamaño de partícula.
- f) Opacidad, translucidez y transparencia: un pigmento opaco no deja pasar la luz a través de él, un pigmento translúcido deja pasar parcialmente la luz y un pigmento transparente permite el paso de la mayor parte de la luz a través de él.
- g) Maticidad y brillantez: un objeto brillante refleja una gran cantidad de iluminación y un objeto mate no brilla.
- h) Resistencia a ácidos o álcalis: resistencia del pigmento ante diferentes valores de pH.
- i) Dureza: Dificultad o facilidad de moler un pigmento.
- j) Fluorescencia o fotoluminiscencia: capacidad de reemitir energía.



Los pigmentos pueden clasificarse en dos grandes grupos, como orgánicos e inorgánicos (Ver Tabla 1.2). Los compuestos inorgánicos son obtenidos a partir de compuestos metálicos inorgánicos y de sales como cromatos, óxidos metálicos, sulfatos, etc. Mientras que los pigmentos orgánicos están formados por anillos de carbono y cadenas de carbono.

*Tabla 1.2 Clasificación de pigmentos orgánicos e inorgánicos.*

Pigmentos	Ejemplos
<b>Orgánicos</b>	Naranja de pirazalona. (Poca resistencia a la temperatura). Rojo BON. (Rojo fuego o pigmento rojo, resistencia moderada). Rojo DPP (Pigmento rojo, muy resistente a temperatura y al intemperismo). Azul ftalocianina (alto poder tintóreo, resistente a la temperatura y al intemperismo). Negro de Humo o de carbono (muy resistente a la temperatura). Violeta carbazol (tono sumamente concentrado, alto precio). Amarillos diarilina (tono sumamente concentrado). Amarillos hansa (tono sumamente concentrado). Violetas de quinacridona (tonos azulosos muy resistentes a la temperatura).
<b>Inorgánicos</b>	Amarillo de cromo. (Utilizado para las calles, contiene alta cantidad de plomo). Amarillo de cadmio. (Muy resistente a altas temperaturas). Amarillo de hierro. (Tonos color mostaza, alta resistencia a rayos UV y a bajas temperaturas). Amarillo ferrita de zinc. (Resistente a altas temperaturas e intemperismo, tono amarillo rojizo). Naranja molibdato. (Resistente a la temperatura) Naranja y rojo de cadmio. (Resistente a altas temperaturas y atacados por ácidos fuertes). Azul de ultramar. (Alta resistencia a la temperatura). Verde Oxido de cromo. (Sumamente duro). Blanco de titanio. (No se decolora y no se amarilla significativamente).

FUENTE: (Siete, Calderón y López, 2016)

A menudo se mezclan diferentes tipos de pigmentos para obtener los colores deseados y la opacidad requerida. Sin embargo, pigmentos orgánicos e inorgánicos con diferente polaridad y tensión superficial, tienden a separarse. Esta separación puede ser horizontal, formando celdas como estructuras (Celdas de Bernard), o vertical, que resultan en una variación de color.

#### **1.2.1.4 Aditivos**

Los aditivos para recubrimientos son los encargados de mejorar las propiedades y eliminar o reducir los problemas que ocurren durante la formulación, optimizando el proceso productivo. Como, por ejemplo, modificar las propiedades reológicas, mejorar la nivelación, reducir la espuma, mejorar las condiciones de dispersión y acelerar el proceso de curado. (Schnall, 2012)

Algunos aditivos utilizados generalmente son:

##### *A. Humectantes y dispersantes*

Los agentes humectantes tienen la función de reemplazar el aire que se encuentra en la superficie de las partículas y permitir que la fase líquida cubra los pigmentos y extendedores.

Por otro lado, los agentes dispersantes son los responsables de la estabilización homogénea de la distribución de partículas. Estos aditivos previenen la aglomeración de los pigmentos y la formación de flóculos. Hay diferentes tipos de estabilización que se deben optimizar para lograr las propiedades requeridas de brillo, fuerza de color, opacidad, protección a la corrosión y viscosidad en la formulación (Allnex Group, 2018).

##### *B. Niveladores*

Los agentes de flujo y nivelación se utilizan para prevenir o reducir defectos superficiales como la mala nivelación, la cáscara de naranja o la formación de cráteres. Estos aditivos son materiales activos de superficie con tendencia a concentrarse en la interfaz aireada del recubrimiento. Para esta aplicación se utilizan acrilatos de polietileno (metilo), siliconas modificadas y tensioactivos basados en compuestos que contienen flúor.

### *C. Antiespumantes y des aireadores*

En muchas etapas de producción, manipulación y aplicación, el aire se incorpora y finalmente se dispersa en resinas, lacas y pinturas. Durante la producción y la manipulación, el aumento del volumen por la espuma y el aire incorporado causará problemas de manipulación y llenado. Después de la aplicación de los recubrimientos, el aire dentro del sistema debe salir de la película mientras que la viscosidad es lo suficientemente baja como para permitir que las burbujas vuelvan a fluir.

Las burbujas más grandes son llamadas macro espuma y logran ser eliminadas por medio del uso de antiespumantes. El aire disperso que queda en el sistema se llama micro espuma. También se utilizan des aireadores o des moldeadores de aire, como ayuda mecánica, para transportar estas pequeñas burbujas a la superficie de la fase líquida. La técnica del anti espumado se basa en la incompatibilidad controlada en el sistema y es importante calcular el equilibrio correcto entre actividad y compatibilidad para evitar defectos (Allnex Group, 2018).

### *D. Modificadores reológicos*

Las propiedades reológicas de los sistemas de recubrimiento están diseñadas principalmente para mejorar el manejo, la aplicación y las propiedades de nivelación de la pintura. Los modificadores reológicos son compuestos que interactúan con los componentes de la formulación, formando una red tridimensional o modificando sólo la fase fluida. Estos aditivos optimizan el perfil de viscosidad de los sistemas de recubrimiento (Shay, 2012).

Sin embargo, el control de la viscosidad también es muy importante para la estabilidad de almacenamiento, para reducir la tendencia a la sedimentación de pigmentos y diluyentes en

el contenedor. Durante el almacenamiento, los pigmentos y extendedores pueden mostrar una tendencia a depositarse en una capa blanda o dura en el contenedor. Esto se debe a la mayor densidad de estos componentes con relación a la fase líquida. La sedimentación puede superarse utilizando aditivos que forman redes tridimensionales. Los agentes anti sedimentaste modifican la viscosidad a tasas de cizallamiento extremadamente bajas que rigen la sedimentación.

#### *E. Secantes y catalizadores*

Los secantes y la selección de catalizadores son elementos muy importantes para asegurar el rendimiento deseado en recubrimientos reactivos y de acoplamiento. La reacción de acoplamiento de los sistemas alquídicos de secado al aire se basa en un mecanismo radical, comenzando con la incorporación de oxígeno del aire.

El paso de absorción es acelerado por los secantes, que son sales carboxílicas de metales. El cobalto, el manganeso y el hierro son los metales secantes activos más importantes, mientras que el bario, el circonio o el calcio pertenecen al grupo de los metales secantes secundarios (Schnall, 2012).

### **1.2.2 Salidas del proceso productivo de pinturas base solvente**

Las salidas del proceso productivo en la elaboración de pintura base solvente pueden clasificarse de la forma siguiente:

#### **1.2.2.1 Producto terminado**

Entre las categorías de productos terminados más frecuente, según Siete, Calderón y López, se tiene:

- a) Esmaltes. Este es el tipo de pintura que mejor conserva el brillo, incluso a la intemperie. El acabado es liso, con aspecto mate, satinado o brillante. Se utiliza mucho para proteger superficies de metal y de madera, tanto en el exterior como interior. A diferencia del esmalte graso esta se seca con mayor rapidez.
- b) Anticorrosivos. La pintura anticorrosiva tiene el propósito principal de inhibir la oxidación del material, y secundariamente el de proporcionar una superficie que ofrezca las condiciones propicias para ser pintada con otros acabados, esmaltes y lustres coloridos.
- c) Horneables. Los esmaltes horneables son recubrimientos termo-endurecibles, formulados en base de resinas alquídicas y melaminas, que proporcionan un acabado liso de notable elasticidad, adherencia, dureza y brillantez.  
  
Se aplican sobre superficies metálicas: ferrosas y no ferrosas, utilizados en la industria metalmeccánica en lo que se refiere a divisiones de oficina, marcos de lámparas, estanterías, closets, gabinetes, escritorios, bicicletas y muebles en general.
- d) Barnices. El barniz es una disolución de aceites o sustancias resinosas en un disolvente, que se volatiliza o se seca al aire mediante evaporación de disolventes o la acción de un catalizador, dejando una capa o película sobre la superficie a la que se ha aplicado. Existen barnices de origen natural, en general derivados de resinas y aceites esenciales de las plantas, y barnices sintéticos. Su aplicación a maderas y otras superficies tiene como objeto primordial preservarlas de la acción de agentes atmosféricos si se expone al exterior o de proteger y dar belleza además de resistencia física y química si su destino es interior. Puede admitir tintes o colorantes que modifican su color y tono.

### **1.2.2.2 Emisiones atmosféricas.**

Estas se deben a actividades inherentes al proceso productivo como el almacenamiento y manejo de resinas y solventes dentro de la planta, así como por el uso de tanques de mezcla abiertos a la atmosfera y descarga de pigmentos.

### **1.2.2.3 Residuos**

Usualmente, se generan cantidades considerables de residuos tanto peligrosos como no peligrosos. Los no peligrosos incluyen residuos comunes como: papel, envases que no contienen productos químicos, cartón, plásticos y madera.

En cambio, los residuos peligrosos son generados durante la fabricación o formulación y resultan de la limpieza de equipo, evaporación de solventes, envases o empaques vacíos de materia prima, producto “fuera de especificaciones” y derrames (Miller, Peden, & Lindsey, 2006); los cuales son peligrosos debido a su toxicidad, inflamabilidad o una combinación de ambas y pueden suponer un riesgo potencial para el medio ambiente y la salud humana, si se eliminan de forma ilegal (en vertederos) o se almacenan de forma inadecuada.

Los solventes utilizados para el lavado de equipo, como ya se mencionó con anterioridad, son recolectados y llevados a un proceso de destilación. Esta operación genera los denominados fondos o residuos de destilación, que siguen mostrando características peligrosas ya que reflejan la presencia de concentraciones residuales de solventes. Las fracciones de solventes que se encuentran típicamente en estos residuos pueden variar significativamente (Frick & Gruber, 1989).

La gestión sostenible de estos es crítica debido a su volumen relativamente alto, al costoso proceso de disposición final y a la alta peligrosidad de sus componentes químicos (Houshamand, Disfani, Dias, Oates & Arulrajah, 2013).

### 1.3 Impactos ambientales asociados al proceso productivo de pinturas base solvente

Los principales impactos ambientales asociados al proceso productivo de pinturas base solvente están relacionados con el consumo de recursos naturales, renovables o no renovables, la generación de emisiones y desechos.

Los insumos consisten principalmente en recursos no renovables como: combustibles fósiles, utilizados como fuente de energía y materia prima como solventes y resinas orgánicas; metales pesados, utilizados en pigmentos; y biocidas (Partidário & Vergragt, 2000).

En la Tabla 1.3 se presenta una visión general de los principales impactos ambientales en la producción de pintura.

*Tabla 1.3 Principales problemas ambientales en la producción de pintura.*

Operación/ proceso	Impactos ambientales					
	Energía	Aire	Agua	Residuos	Tierra	Ruido
Almacenamiento				✓	✓	
Producción de pintura (base agua o base solvente)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Producción de polvo	✓	✓		✓	✓	
Remoción de impurezas		✓		✓	✓	
Llenado y envasado		✓		✓	✓	
Limpieza		✓	✓	✓	✓	

FUENTE: (Partidário & Vergragt, 2000)

Entre los ambientales y a la salud, asociados con la fabricación de pintura se pueden mencionar:

- a) Envases vacíos de materias primas, pigmentos residuales en bolsas y envases, desechos de limpieza de equipos (disolvente y lodos), derrames y pintura fuera de especificación; emisiones al aire, incluido el polvo de pigmentos, productos obsoletos y devoluciones de clientes.
- b) El uso de aditivos basados en sustancias peligrosas que incluyen sustancias como formaldehído, ftalatos, estaño y otros biocidas orgánicos. También el cobre, el estroncio, los compuestos clorados y las aminas, aunque son peligrosas, siguen estando incluidas como aditivos en la composición de las pinturas (Partidário & Vergragt, 2000).
- c) Los pigmentos basados en metales pesados (por ejemplo, el plomo, el cadmio, el estaño, el zinc y el cromo) también son peligrosos, por lo que producen importantes repercusiones ambientales (Partidário & Vergragt, 2000).

Se han realizado múltiples esfuerzos para buscar alternativas menos contaminantes, como el realizado por Dominion Colour Corporation en 2013, quien desarrollo un estudio comparativo de alternativas para el C.I. Pigmento Amarillo 34 (PY.34) o Amarillo de sulfocromato de plomo y el C.I. Pigmento Rojo 104 (PR.104) o cromato de plomo sulfato de molibdeno rojo, dos de los pigmentos con más repercusiones ambientales y a la salud humana. Sin embargo, estas alternativas resultaron técnicamente inferiores y uso implicarían una mayor demanda de energía, tiempo y materiales para lograr la misma opacidad, resistencia al interperismo y tamaño de partícula necesario para su aplicación en la industria de pintura. En la tabla 1.4, se detallan los



efectos que tienen la exposición a los distintos metales pesados en el cuerpo humano y en el medioambiente cuando no son almacenados de forma adecuada.

*Tabla 1.4 Impacto de los metales pesados en la contaminación ambiental.*

Metal	Efecto en el cuerpo	Efecto en el medioambiente
Cadmio	La alta exposición se ha relacionado con el cáncer de pulmón. En niveles muy altos, presenta graves problemas relacionados con defectos óseos en humanos y animales, hígado y riñones, y puede causar la muerte. La mayor amenaza para la salud humana es la acumulación crónica en los riñones que conduce a la disfunción renal.	Puede acumularse en sus cuerpos, especialmente cuando estos comen muchas plantas diferentes. Altas concentraciones pueden influir en los procesos del suelo de microorganismos y amenazar a todo el ecosistema del suelo.
Cromo	Irritación en la piel y ulceración. Daño renal y hepático. Daño a tejidos respiratorios y nerviosos. Alteración del material genético. Cáncer de pulmón. Debilidad en el sistema inmune. Muerte.	El cromo en los suelos se adhiere fuertemente a las partículas del suelo y, como resultado, no se desplaza hacia las aguas subterráneas. En el agua, el cromo se absorbe en los sedimentos y se inmoviliza. Sólo una pequeña parte del cromo que termina en el agua se disuelve con el tiempo. Dentro de un organismo animal puede causar problemas en el sistema nervioso.
Plomo	Alteración de la biosíntesis de la hemoglobina y la anemia. Aumento de la presión arterial. Daño renal. Abortos espontáneos y abortos sutiles. Alteración del sistema nervioso. Daño cerebral. Disminución de la fertilidad de los hombres a través del daño causado por el esperma. Disminución de la capacidad de aprendizaje de los niños. Interrupciones en el comportamiento de los niños, como la agresión, el comportamiento impulsivo y la hiperactividad.	El plomo puede permanecer en el ambiente en forma de polvo de forma indefinida, este polvo llega a ser absorbido por las plantas mediante sus hojas y rara vez desde el suelo. Las funciones del suelo también se ven perturbadas por el plomo, de mayor manera en las cercanías de las carreteras y tierras de cultivo, donde pueden estar presentes altas concentraciones. Los efectos sobre la salud de los moluscos pueden producirse incluso cuando sólo hay concentraciones muy pequeñas de plomo presentes.

FUENTE: (Rajeswari & Sailaja, 2014)

- d) Los disolventes y diluyentes orgánicos son una fuente principal de contaminación atmosférica, debido a su contenido de carbono orgánico volátil (COV) que se emite

y se dispersa en la atmósfera. Los disolventes orgánicos incluyen productos con diferentes grados de peligrosidad para la vida humana.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), como el tolueno y el xileno, son en su mayoría cancerígenos y no deben ser inhalados durante largos períodos de tiempo; y se emiten a partir del almacenamiento a granel de resinas y solventes, así como de ser utilizado en equipos de procesamiento abierto como tanques de mezcla (Durson & Sengul, 2006).

Según un informe realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en 1989, los solventes utilizados para el lavado de equipo, que son sometidos al proceso de destilación presentan un porcentaje de recuperación del 73% por lo que el 27% de los solventes destilados no son recuperados, de manera que los residuos de la destilación no pueden disponerse en vertederos y deben evaluarse otras alternativas, como el coprocesamiento.

La exposición prolongada o alta a la pintura y a los vapores de la pintura puede causar dolores de cabeza, provocar alergias y reacciones asmáticas, irritan la piel, los ojos y las vías respiratorias, y aumentan el estrés en órganos vitales como como el corazón. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha provocado un alza del 20% en el riesgo de ciertos tipos de cáncer (en particular de pulmón) para aquellos que están en contacto regular con, o trabajan con pinturas, mientras que algunos investigadores señalan la posibilidad de añadir daño neurológico (Porwal, 2015).

#### **1.4 Consideraciones Jurídicas y Normativas Ambientales Aplicables**

Las leyes nacionales deben definir los principios fundamentales bajo los cuales se realiza la disposición final de los residuos y desechos peligrosos, para luego definir los requerimientos

y normas concretas. A su vez, deben reflejar las capacidades de las autoridades ambientales y establecer criterios claros que sean fáciles de evaluar y de aplicar.

#### **1.4.1 Ley de medio ambiente.**

“La presente ley tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refieren a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada y la protección ambiental como obligación básica del Estado, los municipios y los habitantes en general; y asegurar la aplicación de los tratados o convenios internacionales celebrados por El Salvador en esta materia” (MARN, 2012).

De igual forma en el Artículo 2, se establecen los principios que deben regir la Política Nacional del Medio Ambiente; y que en su literal h se resalta la importancia de incentivar en los procesos productivos el uso racional de recursos y de desincentivar el desperdicio de materias primas o materiales que pueden reciclarse. la Política Nacional del Medio Ambiente luego es definida en el Artículo 3, como: “un conjunto de principios, estrategias y acciones, emitidas por el Consejo de Ministros, y realizada por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales y por el Sistema Nacional de Gestión del Medio Ambiente”.

Para esto en el Art. 5, se establecen una serie de definiciones básicas que se deben tener claros para el presente estudio, entre ellas la de DESECHOS PELIGROSOS, que se refiere a “Cualquier material sin uso directo o descartado permanente-mente que por su actividad química o por sus características corrosivas, reactivas, inflamables, tóxicas, explosivas, combustión

espontánea, oxidante, infecciosas, bio acumulativas, eco tóxicas o radioactivas u otras características, que ocasionen peligro o ponen en riesgo la salud humana o el ambiente, ya sea por sí solo o al contacto con otro desecho”.

Así mismo establece en su Art. 21 que “Toda persona natural o jurídica deberá presentar el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental para ejecutar las siguientes actividades, obras o proyectos: literal d) Sistemas de tratamiento, confinamiento y eliminación, instalaciones de almacenamiento y disposición final de residuos sólidos y desechos peligrosos.”

Consecuentemente, el art. 60 reza que se debe obtener el permiso correspondiente “Toda persona natural o jurídica que use, genere, recolecte, almacene, **reutilice**, recicle, comercialice, transporte, haga tratamiento o disposición final de sustancias, **residuos y desechos peligrosos**, deberá obtener el **Permiso Ambiental** correspondiente, de acuerdo con lo establecido en esta ley”.

Para la obtención del Permiso Ambiental se deberá llenar el formulario correspondiente a la obra o actividad a realizar, así como realizar el estudio de impacto ambiental correspondiente, el mismo se realiza por cuenta del titular y los que realizan el Estudio deben estar registrados en el Ministerio de Medio Ambiente.

Como resultado del Estudio de Impacto Ambiental, se establece un plan de manejo ambiental y una respectiva fianza de cumplimiento ambiental, por un monto equivalente a los costos totales de las obras físicas o inversiones que se requieran para cumplir con los planes de manejo y adecuación ambiental. Esta tendrá un tiempo de vigencia igual al que tome realizar las obras o inversiones descritas en el Plan de Manejo Ambiental, todo esto con el fin de obtener el Permiso Ambiental (MARN, 2012).

De igual forma establece la responsabilidad civil, penal y administrativa en la que incurren los infractores de la ley, establece medidas preventivas y sanciones accesorias.

En su Título XII, Capítulo I ,Art. 85 establece la responsabilidad por contaminación y daños al ambiente: “Quien por acción u omisión, realice emisiones, vertimientos, disposición o descarga de sustancias o desechos que puedan afectar la salud humana, ponga en riesgo o causare un daño al medio ambiente, o afectare los procesos ecológicos esenciales o la calidad de vida de la población, será responsable del hecho cometido o la omisión, y estará obligado a restaurar el medio ambiente o ecosistema afectado. En caso de ser imposible esta restauración, indemnizará al Estado y a los particulares por los daños y perjuicios causados.”

Seguidamente, el Capítulo II, Art. 86 establece las infracciones ambientales por las acciones u omisiones cometidas por personas naturales o jurídicas, inclusive el Estado y los Municipios; también se establece la jurisdicción ambiental para deducir la responsabilidad civil, de los que hayan causado daños al medio ambiente y que la acción penal será ejercida por la Fiscalía General de la Republica.

#### **1.4.2 Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos**

##### **Peligrosos.**

Tiene como objetivo reglamentar la Ley del Medio Ambiente, y la aplicación de este corresponde al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Establece las diversas obligaciones que deben cumplir los importadores de sustancias peligrosas, entre ellas, proporcionar al MARN la información técnica necesaria para evaluar las sustancias peligrosas y los posibles riesgos que las mismas pudieren ocasionar a la salud humana y el medio ambiente.

En el Art. 17 responsabiliza a los generadores de residuos y demás agentes del proceso de la forma siguiente: “Los generadores de residuos peligrosos, así como las personas naturales o jurídicas que usen, generen, recolecten, almacenen, reutilicen, reciclen, comercialicen, transporten o realicen tratamiento de dichos residuos, serán responsables del cumplimiento de las disposiciones de la Ley, de este Reglamento y de las reglas técnicas que de él se deriven, estando obligados a determinar su peligrosidad y a solicitar su inscripción y registro en el Consejo Superior de Salud Pública, así como a mantenerse actualizados en dicho Registro.”

“Las obligaciones del generador de residuos de acuerdo con el reglamento son:

- a) Manejar segregada mente los residuos peligrosos que no sean compatibles entre sí;
- b) Envasar sus residuos peligrosos en recipientes que reúnan las condiciones de seguridad, plena identificación de su estado físico y sus características de peligrosidad e incompatibilidad;
- c) Dar a sus residuos peligrosos el tratamiento que le corresponda;
- d) Mantener y almacenar sus residuos peligrosos en condiciones de seguridad y en áreas que reúnan los requisitos previstos al respecto.”

El responsable de gestión de desechos peligrosos está obligado a llevar un registro de sus actividades, con firma del responsable.

De acuerdo con el Art. 33, tampoco es permitido el transporte de desechos peligrosos por vía aérea, excepto cantidades pequeñas que sean aceptadas por las empresas de transporte aéreo. En este caso, el titular de la actividad deberá solicitar el Permiso Ambiental correspondiente y una vez emitido, presentar la aceptación por escrito de la empresa de transporte aéreo. Al mismo tiempo, serán aplicables las restricciones al transporte de los desechos, contempladas

en el Convenio de Basilea y en los demás instrumentos internacionales pertinentes, aplicables en El Salvador.

Instituye que todo vehículo que transporte sustancias, residuos o desechos peligrosos, debe portar en lugar visible y fácilmente distinguible, un cartel que contenga el color indicador de la clase de riesgo, el número o nombre de esa clase y el número de identificación de las sustancias, residuos o desechos peligrosos, según las reglas técnicas, normas y disposiciones legales aplicables.

De la misma manera, prohíbe transportar en los contenedores de los vehículos que hayan sido autorizados para transportar sustancias, residuos o desechos peligrosos, personas o animales y productos alimentarios o de consumo humano o animal.

Así mismo hace referencia a que “el tratamiento previo, para algunos desechos peligrosos, se orientará a reducir su volumen, aumentando su concentración, o a disminuir su grado de peligrosidad, por solidificación, por procesos físicos, químicos, bioquímicos o biotecnológicos, o la combinación de los anteriores”.

Entre los tratamientos mencionados en el presente reglamento se encuentra el Tratamiento Destructivo, que en el Art. 35 establece que “La pirólisis, la incineración u otro método destructivo de desechos peligrosos debe ser realizada en lugares autorizados para tal efecto, evitando la contaminación ambiental”.

Además, dice que la Incineración de desechos peligrosos capaces de generar dioxinas u otros contaminantes peligrosos, la incineración y el tratamiento de gases efluentes, se deberá realizar en condiciones de temperatura que asegure que se minimizará la generación de dichos compuestos.

Cuando en lugar del tratamiento destructivo se opte por el confinamiento se debe tener en cuenta el Art. 37 que advierte que “Los sitios de confinamiento deben ser debidamente señalizados, evidenciando a la población la peligrosidad o riesgo del área”. Y la ubicación de estos, según el Art. 38, “no podrán ser ubicados en zonas o lugares cercanos a ríos, lagunas, capas freáticas, zonas residenciales o habitacionales. La selección del sitio de confinamiento, así como el diseño y la construcción de confinamientos controlados, de receptores de agroquímicos u otros desechos, deberán de cumplir características de seguridad establecidas en el Permiso Ambiental”.

De igual forma, el Art. 74 establece que “El generador y, en su caso, el titular de la actividad de servicio de manejo de sustancias, residuos o desechos peligrosos, deberán dar aviso inmediato al Ministerio, por cualquier medio, cuando se produzcan derrames, infiltraciones o vertidos de materiales peligrosos”.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), podrá efectuar los actos de inspección y las auditorías necesarias para verificar el debido cumplimiento de las reglas técnicas, de las normas de calidad ambiental y las disposiciones de la Ley de Medio Ambiente y del Reglamento.

“Toda persona podrá denunciar ante el Ministerio o ante las autoridades competentes, todo hecho, acto u omisión que produzca desequilibrio ecológico o daños al ambiente, por contravención a las disposiciones contenidas en este Reglamento” (MARN, 2000).

### **1.4.3 Acuerdo regional de desechos peligrosos**

Los presidentes de Centroamérica y Panamá, conscientes de los daños irreversibles que pueden causar a la salud de las personas y a los recursos naturales, consideraron necesario emitir



regulaciones que controlaran el movimiento fronterizo de los desechos peligrosos. Debido a esto, en diciembre de 1992, se comprometieron a enfrentar de manera responsable el problema de los desechos peligrosos originados dentro y fuera de la región centroamericana, por medio del Acuerdo Regional Sobre Movimiento Transfronterizo De Desechos Peligrosos.

Además de las prohibiciones de tránsito de desechos peligrosos también, en el Art. 3 inciso 3°, se establecen las obligaciones generales de cada una de Las Partes a “adoptar y aplicar el enfoque preventivo y precautorio a los problemas de contaminación. Dicho enfoque tendrá por objeto, entre otras cosas, impedir la liberación hacia el ambiente de sustancias que podrían causar daño a los seres humanos o al medio ambiente. Las Partes cooperarán entre sí, para tomar las medidas apropiadas para aplicar el enfoque precautorio a la prevención de la contaminación mediante la aplicación de métodos de producción limpia o en su defecto un enfoque relativo a emisiones permitidas o tolerables”.

Al igual que el Art. 5 de la Ley de Desechos Peligrosos, en su artículo 1 literal 1°, nos da una definición de "Desechos Peligrosos" que establece que: “Las sustancias incluidas en cualquiera de las categorías del Anexo I, o que tuvieran las características señaladas en el Anexo II de este Acuerdo; así como las sustancias consideradas como tal según las leyes locales del Estado Exportador, Importador o de Tránsito y las sustancias peligrosas que hayan sido prohibidas o cuyo registro de inscripción haya sido cancelado o rechazado por reglamentación gubernamental, o voluntariamente retirado en el país donde se hubieren fabricado por razones de salud humana o protección ambiental”.

Por lo antes mencionado, los lodos provenientes de la destilación simple de solventes, según el Anexo I, pueden clasificarse como corriente de desecho “Y12 Desechos resultantes de la

producción, formulación y uso de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices.” Por su contenido, pueden asignarse las categorías: Y21 Compuestos de cromo hexavalente, Y31 Plomo; compuestos de Plomo y Y42 Solventes orgánicos, excluyendo solventes halogenados (MARN, 2000).

#### **1.4.4 Convenio de Basilea**

El Convenio de Basilea es un tratado ambiental que fue adoptado el 22 de marzo de 1989 y entro en vigor en 1992, tiene como finalidad regular el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos, además acuerda las obligaciones de todas las partes involucradas para asegurar el correcto manejo ambientalmente de los mismos, especialmente en lo relativo a su disposición. Esta es la respuesta de la comunidad internacional ante los problemas causados, al hombre o el medio ambiente, por la producción mundial anual de desechos peligrosos debido a sus características tóxicas/eco tóxicas, venenosas, explosivas, corrosivas, inflamables o infecciosas.

Este Convenio reconoce que la forma más efectiva de proteger la salud humana y el medio ambiente de los daños causados por los desechos peligrosos se basa en la máxima reducción de su generación tanto en cantidad como en peligrosidad.

Los principios básicos del Convenio de Basilea son:

- a) El tránsito transfronterizo de desechos peligrosos debe ser reducido al mínimo y debe ser consistente con un manejo ambientalmente apropiado
- b) Los desechos peligrosos deben ser tratados y dispuestos lo más cerca posible de la fuente de su generación
- c) Los desechos peligrosos deben ser reducidos y minimizados en su fuente.

Para lograr estos principios, se pretende controlar los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos, monitorear y prevenir el tráfico ilícito, proveer asistencia en el manejo ambientalmente adecuado de los desechos, promover la cooperación entre las Partes y desarrollar Guías Técnicas para el manejo de los desechos peligrosos.

En el tema de pinturas, el convenio enumera en el ANEXO VIII, en la lista A los desechos catalogados como peligrosos en los que mencionan a los resultantes de la producción, preparación de tintas colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices (PNUMA, 1992).

## **CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DE LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS**

La revalorización de los residuos peligrosos es de mucha importancia ya que mediante un tratamiento adecuado que se le da a cada uno de ellos, pueden llegar a ser reutilizados de distintas formas dependiendo el aporte que genera cada uno de estos, ya siendo si se reintroduce al proceso y disminuir el consumo de materias primas vírgenes, también dando valor energético y así disminuir el consumo de combustible o ver si son utilizados para controlar contaminantes y prescindir de controladores más costosos y por veces menos eficientes que los creados con los residuos tratados.

### **2.1 Antecedentes de la revalorización de residuos peligrosos**

La generación de los residuos peligrosos se ha incrementado con el paso de los años debido al aumento de la población. A nivel mundial ha sido una problemática constante la disposición de estos, ya sea por desconocimiento de los generadores de los residuos peligrosos, así como por ausencia de controles por parte de entidades gubernamentales, todo esto contribuye como factor importante en las estadísticas de riesgo ambiental y a la salud humana.

A nivel mundial se han reconocido diferentes impactos ambientales a raíz de una mala disposición de residuos peligrosos como lo es el incidente de Minamata en Japón, debido a la ingestión de pescado y mariscos contaminado con restos de mercurio vertidos a la bahía de Minamata por la empresa Chisso quien empezó a producir aldehído acético y cloruro de vinilo (elementos utilizados como materia prima en la fabricación del plástico). Como catalizador del proceso se utilizaba mercurio metálico que después era vertido al agua sin tratar.

Entre 1932 y 1968 se vertieron a la bahía aproximadamente 81 toneladas de mercurio a través de las aguas residuales sin tratar (Zarsa, s.f.).

También en los años 80, debido a la regulación y control en los países industrializados, se generó un aumento en los costos de disposición, es así como, con el fin de evitar estos costos, los comerciantes de tóxicos empezaron a embarcar sus residuos peligrosos hacia los países en vía de desarrollo y Europa Oriental. Cuando se puso en evidencia este hecho, bajo el auspicio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se crea el Convenio de Basilea el cual establece el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (Ariaza y Bustos, 2013).

El Salvador no ha sido la excepción en cuanto a incidentes ambientales causados por la mala disposición de residuos peligrosos, El MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales) decretó en el año 2010 por primera vez la emergencia ambiental en un radio de 1,500 metros alrededor de las instalaciones de la fábrica Baterías de El Salvador S.A. de C.V., ubicada en el cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico, después que los análisis determinaron contaminación ambiental por plomo en niveles que representan peligro para la salud.

Otro caso de incidente ambiental fue el generado por pesticidas, ocasionada por la ex planta formuladora Agrojell, S. A. ubicada en el kilómetro 144, carretera panamericana, municipio y departamento de San Miguel, donde por más de diez años los desechos de toxafeno se mantuvieron abandonados y se derramaron, contaminando el suelo y el recurso hídrico subterráneo (López, 2017).

Para el año 2013, el MARN en coordinación con el MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería) y el MINSAL (Ministerio de Salud de El Salvador) realizaron un estudio en San

Luis Talpa en el departamento de La Paz con el objetivo de determinar la presencia de pesticidas en suelos y aguas de pozos artesanales utilizados por los pobladores de la zona para su consumo. Investigación impulsada por el abandono de pesticidas y productos para su formulación en la ex planta formuladora QUIMAGRO S.A de C.V por problemas de salud (insuficiencia renal) presentados por los pobladores de este municipio.

Como control gubernamental en El Salvador para el tratamiento de residuos peligrosos se cuenta con el Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos. El cual de conformidad a lo establecido en el artículo 5 de la Ley del Medio Ambiente, detalla una serie de conceptos, como lo son:

- a) Sustancias Peligrosas: todo material con características corrosivas, reactivas, radioactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o con actividad.
- b) Desechos peligrosos: cualquier material sin uso directo o descartado permanentemente que por su actividad química o por sus características corrosivas, reactivas, inflamables, tóxicas, explosivas, combustión espontánea, oxidante, infecciosas, bioacumulativas, ecotóxicas o radioactivas u otras características, que ocasionen peligro o ponen en riesgo la salud humana o el ambiente, ya sea por si solo o al contacto con otro desecho.

Entre las definiciones frecuentemente empleadas en la temática de los materiales peligrosos encontramos las siguientes:

- a) Establecimiento o instalación peligrosa: aquella que por el tipo de los productos que elabora; o de la materia prima que utiliza, puede poner en grave peligro la salud, la

vida o el medio ambiente, tales como fábricas de explosivos, almacenes de sustancias tóxicas o peligrosas, fundiciones de minerales y las que produzcan radiaciones.

- b) Procesos peligrosos o de peligro: los que por el tipo de tecnología que aplican, la materia prima que usan o transforman o los productos que generen, pongan o puedan poner en peligro la salud, la vida humana, los ecosistemas o el medio ambiente, tales como: la fabricación, manipulación, almacenamiento y disposición final de sustancias tóxicas, peligrosas, radioactivas.
- c) Manejo de materiales peligrosos: el conjunto de operaciones que incluyen el almacenamiento, recolección, transporte, reutilización, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición ambientalmente adecuada de las sustancias, residuos y desechos peligrosos.
- d) Manejo ambientalmente racional de los desechos peligrosos: se entiende la adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los desechos peligrosos y otros desechos se manejen de manera que queden protegidos el medio ambiente y la salud humana contra efectos nocivos que puedan derivarse de tales desechos.
- e) Eliminación final, desnaturalización o destrucción: eliminación física, o transformación en productos inocuos realizado bajo estrictas normas de control, de materiales nocivos o peligrosos para el ambiente, el equilibrio de los ecosistemas, la salud y calidad de vida de la población.
- f) Tratamiento de desechos peligrosos: se refiere a cualquier proceso o método destinado a modificar las características físicas, químicas o biológicas de los desechos peligrosos, con el fin de disminuir su peligrosidad o de reducir su volumen.
- g) Residuos peligrosos: materiales que revisten características peligrosas, que después de servir a un propósito específico todavía conservan propiedades físicas y químicas

útiles, y por lo tanto pueden ser reutilizados, reciclados, regenerados o aprovechados con el mismo propósito u otro diferente.

Además, según el artículo 25 del Reglamento antes mencionado: cualquier proceso de tratamiento de desechos peligrosos debe realizarse preferentemente y cuando ello sea posible en el lugar de su generación.

La Agencia de Protección Medioambiental (Environmental Protection Agency-EPA) de los Estados Unidos define los residuos peligrosos como los residuos o combinación de ellos que presentan un determinado riesgo, ya sea actual o potencial, para la salud humana o para otros organismos vivos, a causa de alguno de los cuatro motivos genéricos siguientes:

- a) No-degradabilidad y persistencia en el lugar de vertido.
- b) Posibilidad de efectos nocivos por efecto acumulativo.
- c) Posibilidad de sufrir transformaciones biológicas con agravamiento de sus efectos.
- d) Contenido elevado de componentes letales.

Existen residuos que en determinadas situaciones y previos a un tratamiento se aprovechan en los países en vías de desarrollo mientras que en los países desarrollados se desechan diariamente a la basura. Muchos de los residuos se pueden reciclar si se dispone de las tecnologías adecuadas y el proceso es económicamente rentable.

Una buena gestión de los residuos persigue precisamente no perder el valor económico y la utilidad que pueden tener muchos de ellos y usarlos como materiales útiles en vez de tirarlos, es por ello por lo que surge el concepto de valorización de residuos.



La Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, define la valorización de residuos como “cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general” (Directiva, 2008).

La valorización de residuos surge como una alternativa viable para el tratamiento de determinados residuos, ya que la generación y el tratamiento de residuos peligrosos es un tema que afecta al medio ambiente, la salud humana y la economía de los países en general. Por lo que el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Asociación Internacional de Desechos Sólidos plantea en la jerarquía de la gestión de residuos, que lo más importante es prevenir la generación del desecho mediante prácticas de mejoramiento continuo para evitar, reutilizar y reciclar los desechos, esta jerarquía de muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Jerarquía de gestión de desechos.

FUENTE: (Coprocesamiento.org, s.f.)

La jerarquía de gestión de Desechos se define de la siguiente manera según GmbH y Holcim Group:

- I. La prevención de residuos es la solución ideal. Esto sólo y puede lograrse por medio de una estricta política de productos que asegure que ciertos materiales no aparezcan como residuos.
- II. Minimización o reducción de residuos es la solución ideal. Esto solo puede mediante la aplicación del concepto de producción más limpia o cambios en los hábitos del consumidor relacionados con el embalaje y envasado.
- III. Recuperación de residuos por medio de reciclado directo y reutilización de materiales primarios (por ejemplo, metal a metal o papel a papel). También incluye otras tecnologías como el compostaje o la digestión anaeróbica.
- IV. Coprocesamiento o recuperación de energía y materiales a partir de residuos como un sustituto para energía provenientes de fósiles y materias primas vírgenes.
- V. Incineración es principalmente una tecnología enfocada de los residuos para reducir volúmenes de estos, así como el impacto potencialmente negativo del material de residuos, y hasta cierto punto, recuperar energía.
- VI. Pretratamiento fisicoquímico es un procedimiento para estabilizar residuos antes de la eliminación final.
- VII. Relleno controlado es el método común para la disposición final de residuos no reciclables.
- VIII. Incineración o confinamiento no controlado, acompañado con frecuencia por combustión al aire libre, todavía es el método más común de disposición de residuos en

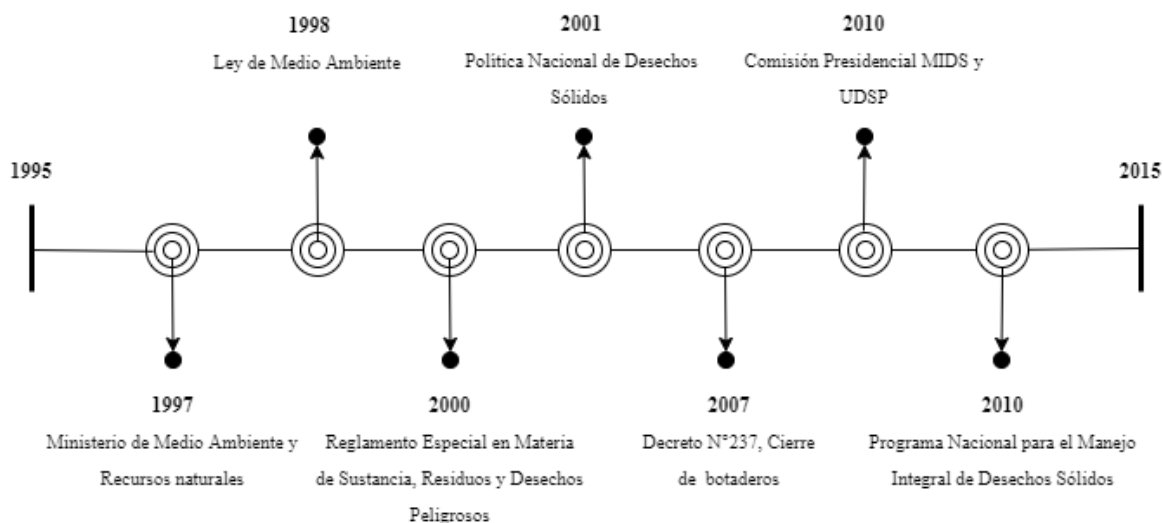
los países en vías de desarrollo, donde representa la principal amenaza para los recursos naturales y a la salud del ser humano. Esta forma de disposición de residuos debe evitarse.

## 2.2 Contexto histórico de la gestión de residuos en El Salvador

Con respecto a los residuos, el país ha avanzado, la gestión del manejo de residuos y desechos en El Salvador tiene sus inicios desde los años 1900.

Hasta la fecha, ha ido evolucionando, asignando obligaciones a través de distintas legislaciones a las instituciones públicas y privadas para normar la disposición y el manejo de los residuos.

En la figura 2.2, se presenta una línea de tiempo de las instituciones y leyes creadas en El Salvador para la gestión de residuos.



*Figura 2.2 Línea de tiempo de instituciones y leyes salvadoreñas para la gestión de residuos y desechos.*

En este sentido se han dado en el periodo 1998-2018 diversas iniciativas a nivel de gobierno con apoyo de cooperación internacional, así como proyectos de empresas privadas sobre recuperación de residuos y reciclaje. Se han creado diversas asociaciones municipales para el manejo integral de residuos sólidos que incluyen la recuperación de residuos con potencial de reciclaje.

La ley de Medio Ambiente establece en el artículo 52 que el MARN promoverá programas de reducción en la fuente, reciclaje, reutilización y adecuada disposición final de los residuos y desechos peligrosos.

Además, el Art. 60 de la Ley de Medio Ambiente establece el requerimiento del permiso ambiental para personas naturales o jurídicas que usen, generen, recolecte, almacene, reutilice, recicle residuos y desechos peligrosos.

Las empresas líderes en la disposición de residuos peligrosos son Geocycle El Salvador, S. A. de C. V. y Holcim El Salvador, S. A. de C. V. ambas poseen permisos ambientales para la gestión de desechos peligrosos y el coprocesamiento en hornos cementeros. Dichas sociedades tienen sus instalaciones para el manejo de residuos peligrosos en el cantón Tecomapa, municipio de Metapán, departamento de Santa Ana.

Además, las empresas generadoras y distribuidoras de energía: el Grupo AES El Salvador, la Distribuidora de Electricidad DELSUR y la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) cuentan con permisos ambientales para sitios de almacenamiento temporal de sus equipos y aceites contaminados (MARN, 2012).

Sin embargo, la capacidad nacional para las alternativas de tratamiento y disposición final de los residuos y desechos peligrosos sigue siendo muy limitada, en el plano local solamente se encuentra disponible el coprocesamiento en los hornos de cemento.

### **2.2.1 Ventajas de la disposición de residuos peligrosos en el Salvador**

Desde la década de 1970, Lafarge Holcim ha sido pionera en el coprocesamiento de materiales de desecho, y durante décadas desarrolló servicios innovadores y personalizados de gestión de desechos industriales y municipales.

Geocycle ofrece soluciones de tratamiento de residuos basadas en un proceso industrial único llamado coprocesamiento. Se refiere al reciclaje simultáneo de materiales minerales y la recuperación de energía dentro de un solo proceso industrial: la fabricación de cemento.

La parte mineral de los desechos reemplaza los materiales minerales primarios (como la piedra caliza, la arcilla o el hierro) y la parte combustible proporciona la energía necesaria para la producción de clinker. Como resultado, el 100% de la entrada de residuos se recicla o recupera sin producir ningún residuo adicional. La tecnología utilizada también garantiza la destrucción de los componentes tóxicos.

El coprocesamiento logra un desempeño ambiental superior en comparación con el relleno sanitario y la incineración que se demuestra mediante estudios de evaluación del ciclo de vida.

El convenio de Basilea del PNUMA reconoce el coprocesamiento como una opción práctica, rentable, segura y ambientalmente preferida en comparación con otras opciones de tratamiento de residuos. Además, no deja residuos que necesiten ser depositados, ya que la ceniza reacciona con otros componentes para formar el producto final fabricado.

Entre otras ventajas reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que los desechos se utilizan para reemplazar los combustibles fósiles y conserva los combustibles fósiles no renovables y los recursos naturales a medida que se recupera el valor energético y mineral de los materiales de desecho (Geocycle, 2020).

### **2.3 Alternativas utilizadas en la valorización de residuos peligrosos**

La selección de la alternativa de tratamientos de residuos peligrosos debe realizarse de acuerdo con el principio de desarrollo sostenible (Moller, 2010). Esto significa que la gestión de los desechos debe realizarse tomando en cuenta tanto los factores ambientales como los económicos, incentivando la utilización de residuos en todas las aplicaciones posibles y al mismo tiempo limitar su impacto negativo al medio ambiente (Pyssa, 2019).

Al discriminar cuál de las alternativas para el tratamiento de residuos peligrosos es la más adecuada, se debe tener en cuenta la disminución de la presión sobre los recursos, la optimización de los procesos productivos, la valorización o reciclaje de los residuos y su disposición final (Pyssa, 2019).

Los tipos de alternativas para la valorización de residuos en tan diversa como la naturaleza de los mismo. Según Noll, Hass y Patterson, pueden agruparse de la forma siguiente:

- a) Valorización directa
- b) Materia prima para uso secundario
- c) Valorización energética
- d) Control de contaminantes
- e) Coprocesamiento

Una misma tecnología puede ser utilizada en diferentes alternativas de valorización, sin embargo, su clasificación depende del propósito de esta. Por ejemplo, una tecnología puede clasificarse como de valorización energética, si su fin es la recuperación de energía, mientras que, si su fin es la recuperación de minerales, metales, etc. puede clasificarse como alternativa de recuperación de materia prima para uso secundario.

### **2.3.1 Valorización directa**

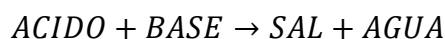
Consiste en el procesamiento de la corriente de residuos por medio de métodos químicos, físicos y/o biológicos, para recuperar materiales de valor para la industria que generó el desecho, con el fin de maximizar el aprovechamiento de materia prima y reducir la cantidad de residuos.

#### **2.3.1.1 Valorización directa por métodos químicos**

Los métodos químicos se caracterizan por alterar la estructura química de los desechos, reduciendo su peligrosidad. (Ramirez) Diversos procesos de tratamiento químico útiles en el tratamiento de residuos peligrosos se presentan a continuación:

##### *I. La neutralización:*

Arrhenius define la neutralización como el proceso por el cual, y mediante una reacción química, un ácido entra en contacto con una base o álcali, para dar paso a la formación de una sal y agua. Tal y como se representa en la siguiente reacción:



Para aplicar este método en el tratamiento de residuos peligrosos es necesario evaluar previamente las características de dichos residuos. El fin de la neutralización es los tratamientos

químicos es disminuir o anular la toxicidad, convirtiéndose así en un pretratamiento o acondicionamiento previo a un proceso de tratamiento de carácter ya sea físico o químico que concluya con la total inertización de estos. El grado al que se deberá llegar al aplicar un proceso de neutralización a un residuo peligroso va a estar sujeto principalmente a los siguientes factores:

- a) El pH establecido por quien recibe el residuo peligroso posterior a la neutralización.
- b) En el caso que el proceso siguiente a la neutralización sea uno biológico, hay que tener en cuenta la DBO (Demanda biológica de Oxígeno) al que tenga que ajustarse el residuo, debido a que en estos procesos se producen neutralizaciones al desprenderse  $\text{CO}_2$ , debido a la asimilación de la materia orgánica por microorganismos.
- c) La acidez o alcalinidad del residuo peligroso a tratar.

Dentro de este método se pueden mencionar dos tecnologías con gran aplicación en la industria, las cuales son: la neutralización en tanque y la neutralización a través de lechos filtrantes.

En primer lugar, el proceso de neutralización tanque, puede realizarse en tanques resistentes a la corrosión, en tanques o en lechos filtrantes. Este tipo de neutralización requiere de una agitación continua para que la reacción ocurra de forma homogénea, así como para facilitar el desprendimiento de calor de estas reacciones, que normalmente son exotérmicas. El tiempo de residencia en el reactor del residuo y del agente neutralizante, oscila entre los 5 y 15 minutos, para que la reacción sea efectiva. Dicha reacción debe controlarse de forma estricta con dosificadores de reactivos, activados mediante sensores unidos a mecanismos motorizados, para control de pH y caudal de entrada.



Por otro lado, la neutralización a través de lechos filtrantes consiste en hacer pasar un flujo residual líquido a través de un lecho fijo de carbonato catiónico. Este proceso puede desarrollarse en sentido ascendente o descendente. Si se produce en sentido descendente, por gravedad, la velocidad máxima de circulación del residuo no debe sobrepasar los 45-50 litros por minuto por metro cuadrado, para que se pueda alcanzar un tiempo de residencia óptimo.

Este sistema presenta muchas veces el inconveniente asociado a la presencia en la composición del residuo, de  $H_2SO_4$  en concentraciones que supere el 0.6 %, ya que se produce la formación y depósito, en el lecho filtrante, de una capa de  $CaSO_4$  que impide que entren en contacto el residuo y el agente neutralizante. Sin embargo, la solución a este inconveniente consiste en utilizar un dispositivo rascador que impida o elimine la capa de sulfato.

Es conveniente señalar que los agentes neutralizantes de origen industrial de mayor uso son los siguientes:

- a) Hidróxido de calcio: es un producto químico muy usado debido a su bajo precio, aunque presenta los inconvenientes de baja solubilidad de agua, es de lenta velocidad de reacción y forma precipitados como en el caso de los residuos que contienen ácido sulfúrico, al originarse sulfato de calcio, por lo que posteriormente es necesario utilizar un decantador.
- b) Carbonato de calcio (calizas, dolomitas, entre otros): se usan para neutralizar residuos peligrosos muy ácidos. Es de bajo costo en el mercado. Presenta los mismos inconvenientes que el hidróxido de calcio en cuanto a la cinética de la reacción y a la insolubilidad de agua. Al tratarse de un reactivo de origen natural tiende a formar una gran cantidad de lodos. Además, suele producir  $CO_2$  como resultado de la neutralización.

- c) **Ácido sulfúrico:** es el reactivo más utilizado para la neutralización de residuos peligrosos alcalinos, su coste es competitivo respecto a otros agentes neutralizantes, y su fácil manipulación. De su comportamiento químico resalta su carácter corrosivo a bajas concentraciones, así como la formación de precipitados con metales alcalinotérreos.
- d) **Gases de combustión:** estos gases, con contenido de  $\text{CO}_2$  de alrededor del 15% en contacto con agua, forma  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (ácido carbónico), utilizable para neutralizar sustancias básicas. El proceso consiste en hacer burbujear los gases en el flujo de residuos peligrosos líquido o mediante la utilización de una columna con elementos de relleno, como anillos Raschig.

## *II. Precipitación*

La precipitación química es la formación de compuestos insolubles contenidos en los residuos peligrosos. Entre los metales pesados que pueden ser eliminados por medio de este proceso se encuentran el arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc.

La principal aplicación que este proceso químico presenta para el tratamiento de residuos peligrosos se centra en la eliminación de metales pesados mediante la formación de los correspondientes hidróxidos, que son posteriormente separados en un decantador.

En general, para este proceso suelen emplearse reactores fabricados con materiales que permitan el contacto de soluciones químicas en concentraciones muy variadas y en un amplio espectro de pH. Los materiales más utilizados son el acero o los polímeros orgánicos (polipropileno, PVC, polietileno, entre otros). El proceso completo puede ocurrir en tres etapas:

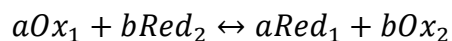
- 1) Ajuste de pH: para provocar un desplazamiento del equilibrio químico que no favorezca la solubilidad. El pH óptimo para la precipitación de los distintos metales pesados es variable entre 9.5 y 12, pudiéndose obtener buenos rendimientos de eliminación de estos contaminantes con concentraciones inferiores a 1 mg/l en el efluente tratado. Sin embargo, habrá que vigilar la presencia en el flujo residual de agentes competentes como el ion amonio, ion cianuro y EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) que pueden mantener altas concentraciones de metales pesados en solución.
- 2) Adición de un agente precipitante: siendo los más utilizados hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Estos últimos son más eficaces para provocar la precipitación de metales pesados, incluso en presencia de agentes quelantes, aunque en exceso pueden provocar el desprendimiento de  $\text{SH}_2$  (sulfuro de hidrogeno), que es un gas toxico, si el efluente tratado se pusiera en contacto con una corriente acuosa a pH bajo.
- 3) Floculación: mediante la cual los elementos precipitados se unen formando flóculos o precipitados voluminosos que favorecen su decantación. Pueden utilizarse sales de hierro o aluminio.

El fluente producido puede requerir, según los casos, un tratamiento posterior y los lodos resultantes, generalmente, son ricos en metales pesados, que posteriormente pueden someterse a un proceso de deshidratación y almacenarlos para luego disponerlos por medio del coprocesamiento u otra alternativa de revalorización.

### *III. Oxidación Química*

Es un proceso químico que se utiliza en el tratamiento de residuos peligrosos, se realiza mediante una reacción entre reactivo y residuo peligroso, produciendo así una transferencia electrónica, que origina un cambio sustancial en el comportamiento químico de ambos. Un

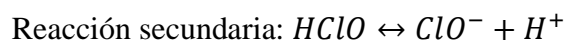
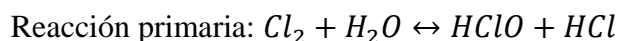
residuo peligroso es tratado por medio de la oxidación química para degradar o eliminar su toxicidad, como en el caso de ciertos compuestos nitrogenados, sulfurados o los cianuros. El esquema de reacción genérico es el siguiente:



El contaminante  $Red_2$  es oxidado por un agente oxidante  $Ox_1$ , que a su vez es reducido pasando a la forma  $Red_1$ . Dicha reacción se determina por medición eléctrica y se caracteriza por el potencial de oxidación-reducción o potencial redox, que es una función de la actividad de las formas oxidada y reducida de un determinado compuesto químico.

Los reactivos más usados en el proceso de tratamiento de oxidación de residuos peligrosos son los siguientes:

- a) Cloro ( $Cl_2$ ): es uno de los reactivos más utilizados debido a su alto poder oxidante y bactericida en el tratamiento de residuos peligrosos orgánicos, al destruir determinadas enzimas indispensables para el desarrollo de microorganismos patógenos. Una de sus principales aplicaciones radica en la detoxificación de residuos cianurados. El mecanismo de reacción del cloro en agua, en residuos peligrosos acuosos es el siguiente:



Ambas reacciones están controladas por el pH, ya que su variación afecta el sentido del equilibrio. Para un pH menor a 2 la reacción primaria esta desplazada a la izquierda, estando todo el cloro molecular como  $Cl_2$ . Si el pH es igual a 5, el cloro

molecular ha desaparecido y se ha convertido en ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ). Ahora bien, si el pH es mayor a 10, el cloro se encontrará en forma de ion hipoclorito  $\text{ClO}^-$ .

- b) Dióxido de cloro ( $\text{Cl}_2\text{O}$ ): se trata de un gas, al igual que el cloro, con la particularidad de ser explosivo a concentraciones superiores al 10 % en volumen, en el aire. Es un agente oxidante muy poderoso. Se utiliza para oxidar sales de hierro o manganeso, produciendo su precipitación. También es utilizado en la oxidación de residuos cianurados.
- c) Hipoclorito sódico ( $\text{NaClO}$ ): este reactivo oxidante es comúnmente conocido como lejía y se utiliza frecuentemente por su efectividad y bajo coste, ya que presenta un alto contenido en cloro activo. Es utilizado en la detoxificación de residuos cianurados. Debe utilizarse en ausencia de metales como cobre, níquel, magnesio, cobalto y sus aleaciones, así como el acero, ya que actúan como catalizadores descomponiendo el reactivo.

Otros métodos químicos aplicables:

#### *IV. Deshalogenación*

La aplicación de las reacciones de deshalogenación química en el tratamiento de compuestos peligrosos es relativamente reciente. Es un proceso eficaz para suprimir halógenos de compuestos orgánicos peligrosos, como dioxinas, furanos, bifenilos policlorados y ciertos plaguicidas clorados. El tratamiento es de corta duración y usa una cantidad moderada de energía, teniendo gastos de operación y mantenimiento relativamente bajos. Los equipos pueden trasladarse hasta el sitio que deba tratarse, de modo que no es necesario transportar residuos peligrosos.

#### V. *Fotólisis*

Es el proceso de desintoxicación o destrucción de sustancias químicas peligrosas en soluciones acuosas con la ayuda de la radiación ultravioleta (UV), se conoce como fotólisis UV (por ejemplo, la degradación de las dioxinas en los lodos residuales). Sin embargo, como la radiación UV no puede penetrar en el suelo o soluciones opacas, este método no puede ser usado para los contaminantes en tales medios.

#### VI. *Hidrólisis química*

La hidrólisis puede realizarse mediante la adición de productos químicos (hidrólisis ácida), la irradiación (fotólisis) o biológicamente (ruptura de enlaces enzimáticos), donde se produce la ruptura de enlaces, en una molécula que es generalmente insoluble en agua, de tal manera que va a la solución iónica con agua. Hay que tener especial cuidado de no movilizar los metales pesados.

### **2.3.1.2 Valorización directa por métodos físicos**

Estos métodos de tratamiento utilizan las características físicas de los residuos para separar los componentes peligrosos y ser enviados a la siguiente etapa de tratamiento o eliminación. En las siguientes subsecciones, se examinan algunos de los métodos físicos fundamentales (Shukla, Ganguly y Hussain, 2020):

#### I. *Sedimentación*

La sedimentación es un tipo de proceso en el que la gravedad hace que las partículas más pesadas se asienten y se recogen en el fondo del tanque de sedimentación. La sedimentación sólo es una opción cuando hay una diferencia en las gravedades específicas de los componentes de la mezcla de residuos.

El mecanismo de sedimentación o decantación de partículas en el seno de un líquido transportador es complejo, con la intervención de múltiples factores, como son forma y tamaño de la partícula, viscosidad del líquido, densidad de la partícula y frotamiento.

Para este método se tienen diferentes tecnologías, sin embargo, las más utilizadas son los decantadores estáticos y los decantadores por contacto de fangos.

Los decantadores estáticos a su vez se agrupan en una serie de aparatos cuyo proceso de decantación no se basa en la utilización de fangos activados. Dentro de este grupo se encuentran:

- i. Decantadores cilíndricos-cónicos: se caracterizan por ser de flujo vertical, se utilizan para bajos caudales o para flujos que generen poco volumen de lodos, ya sea por tener escaso material sedimentable o bien por su elevada densidad.
- ii. Decantadores de flujo horizontal: son poco utilizados por la dificultad que presenta para retirar los lodos, ya que se tendría que vaciar de líquido el tanque de decantación, otra de las desventajas que presentan estos decantadores es que necesitan una gran superficie para su implantación. Dentro de este tipo son bien conocidas las llamadas “balsas de decantación”.
- iii. Decantadores estáticos laminares: se caracterizan por la utilización de elementos internos que favorecen la decantación, como las placas deflectoras en la zona de floculación. Usualmente estos decantadores están desprovistos de mecanismos de eliminación de fangos producidos, ya que, debido a su forma y las características del flujo entrante, no es necesario su utilización. Sin embargo, hay un grupo de decantadores estáticos que si van provistos de algún mecanismo para la evacuación de lodos para que dicho mecanismo sea más rápido y efectivo.

Por otro lado, en los decantadores por contacto de fangos uno de los factores a controlar es la concentración del elemento a decantar, para que el choque de las partículas facilite su disposición, por lo tanto, si se añade una cantidad de lodos producidos en procesos anteriores, se aumenta la concentración en material sedimentable. Para alcanzar el objetivo de que el líquido entrante llegue a un contacto lo más eficiente posible, se emplean un par de técnicas. La primera de ellas consiste en hacer circular una masa de lodos hasta una zona del decantador en la que, mediante un agitador, se produce la mezcla con el fluido. En la segunda técnica la masa del lodo permanece estática, ocupando una zona del decantador, a través de la cual circula el flujo en sentido ascendente, propiciándose, así, el contacto buscado.

## *II. Centrifugación*

Los componentes de la mezcla a tratar pueden ser separados usando el proceso de centrifugación, donde el uso de la fuerza centrífuga y centrípeta se utiliza para recoger las partículas más pesadas a través del centro del equipo. Las fuerzas centrípetas son mucho más fuertes que las fuerzas gravitacionales y por lo tanto son mejores para separar mezclas de residuos. Sin embargo, la centrifugación se limita generalmente a la deshidratación de los lodos, la separación de los aceites del agua y la clarificación de las gomas viscosas y resinas.

Según sea el rotor de la centrifuga, se pueden clasificar en:

- i. Centrifuga de cuba: consiste en un recipiente tubular con la parte inferior en forma de cono, donde se acumula el material más denso. El interior del recipiente se ocupa con una espiral que gira en su misma dirección, pero con una ligera variación de velocidad. También es conocida como centrifuga de cuba solida continua.
- ii. Centrifuga de cesta: es similar al tipo anterior, pero con la diferencia de un mayor diámetro respecto a su longitud. Según el eje sobre el que gira la cesta, horizontal o



vertical, se obtienen centrifugas con distintas posibilidades técnicas. La centrifuga de eje horizontal es de tipo discontinuo y por lo tanto requerirá paradas periódicas para poder evacuar el lodo producido. La centrifuga de eje vertical se caracteriza porque al girar, el líquido es obligado a desplazarse hasta la parte superior de la cesta, por donde es retirado, mientras que el lodo migra hacia las paredes laterales de la cesta, de donde se desprende al bajar por efecto de la gravedad o con la ayuda de algún dispositivo cayendo en el fondo de la cesta, para su posterior recogida.

- iii. Centrifuga de disco: este aparato utiliza una pila de platos o discos angulosos, montados sobre un eje vertical, provocando el corte en capas de pequeño grosor, del fujo tratado, lo que favorece la separación de los distintos componentes. Los lodos quedan depositados en la parte baja de la pila de discos, para su posterior evacuación.
- iv. Residuos tratados por centrifugación: ese método es frecuentemente utilizado en la separación de sustancias oleosas, líquidas o sólidas. También es utilizado en la deshidratación de lodos, como proceso de tratamiento para posibilitar que el residuo pueda ser transportado con mayor facilidad y rendimiento, para posteriormente incinerarlos o pasarlos a otro proceso de tratamiento.

### *III. Coagulación y floculación*

La coagulación y la posterior floculación ayudan al proceso de sedimentación, en el que un coagulante (polímero, alumbre, etc.) se añade, lo que ayuda a la aglomeración de partículas formando un flóculo que se vuelve pesado y se asienta. La floculación se utiliza principalmente para los residuos inorgánicos.

Estos son procesos cuya misión es aumentar la eficacia de un tratamiento de sedimentación o decantación, en los que las partículas sólidas en suspensión son de muy pequeño tamaño

que impiden su sedimentación natural o se trata de disoluciones coloidales que habrá que inestabilizar para que sea efectiva la separación de fases.

Las sustancias que se añaden en el proceso se llaman coagulantes, siendo los más utilizados para estos tratamientos: el sulfato de aluminio, cloruro y el sulfato férrico.

La coagulación se ve influenciada por una gran cantidad de factores, entre los que se encuentran:

- a) Naturaleza de la materia en suspensión: los flujos más difíciles de tratar son los que presentan un grado alto de coloración, carecen de turbidez y bajo contenido de materia inorgánica disuelta.
- b) Temperatura: el aumento de temperatura favorece la coagulación, de manera que a menor temperatura se requiere mayor dosis de coagulante.
- c) pH: se ha evaluado que, al tratar sustancias coagulantes, su efectividad depende de distintos rangos de pH, por lo que su control es fundamental para la buena marcha del proceso.
- d) Orden de adición de reactivos: si el flujo a tratar presenta cantidades importantes de materia orgánica, que perjudica la coagulación, habrá que eliminarse en primer lugar, añadiendo para ello un oxidante. Luego se agrega el coagulante, con el corrector de pH, si fuese necesario.

Una vez producida la desestabilización del coloide por la acción del coagulante, la segunda fase consistirá en aglomerar las partículas mediante colisiones sucesivas que se verán favorecidas con agitación mecánica.

Esta segunda fase es la floculación y al igual que en la coagulación, una serie de sustancias pueden añadirse al flujo residual para favorecer este proceso, estas son las llamadas floculantes, cuya acción se ve reflejada en mejorar la velocidad de interacción entre partículas y la calidad de los flóculos. Los floculantes se pueden clasificar por su naturaleza en minerales u orgánicos. Según su origen en naturales o sintéticos y por el signo de su carga eléctrica en aniónicos, catiónicos y no iónicos.

#### *IV. Destilación*

El proceso de destilación consiste en la separación de los componentes de un flujo líquido, mediante la vaporización parcial del mismo, obteniéndose, así, una mayor concentración de elementos volátiles en flujo vapor y un flujo líquido enriquecido en componentes no volátiles o menos volátiles en las condiciones en las que se da el proceso.

La destilación es eficaz cuando el vapor que se origina en la ebullición sea de una composición lo más diferente posible del flujo original. De esta apreciación se deduce que el fundamento de la destilación se encuentra en el estudio del equilibrio líquido-vapor para las distintas mezclas posibles.

Entre los tipos de destilación más utilizados están la destilación simple, la destilación por rectificación y la destilación por arrastre de vapor.

La destilación simple es bastante utilizada en los procesos productivos industriales, existen dos métodos distintos:

- i. Destilación cerrada: en este caso el líquido de composición conocida se mantiene a una temperatura constante comprendida entre la temperatura inicial y la final, que en este caso será la temperatura de ebullición, alcanzándose un equilibrio en el que las

composiciones del vapor y del líquido son coincidentes con las composiciones de equilibrio a la temperatura de destilación y a la presión total de trabajo.

- ii. Destilación abierta: también conocida como destilación diferencial, se emplea para la separación de componentes con volatilidades muy distintas. En este proceso el líquido a tratar se calienta hasta la ebullición y se va eliminando el vapor producido de forma continua. De esta forma el líquido se empobrece en los componentes más volátiles, ascendiendo continuamente la temperatura de ebullición y produciendo un vapor que también será más pobre en componentes volátiles.

Por otro lado, la destilación por rectificación se considera el procedimiento más empleado para separar líquidos con distinto grado de volatilidad. El proceso consiste en hacer pasar una corriente de vapor producido en un calderín en la base de una columna, en sentido contrario al líquido condensado del vapor ascendente que recibe el nombre de reflujo. Al objeto de aumentar el rendimiento de la técnica, se ha estudiado las distintas formas de mejorar el contacto líquido-vapor, llegándose a la conclusión que las columnas de platos y las columnas de relleno, son las más adecuadas.

Por último, la destilación por arrastre de vapor consiste en lograr que los componentes volátiles de un flujo compuesto de una mezcla de líquidos inmiscibles se vaporicen a baja temperatura, mediante el contacto directo de una corriente de vapor de agua o bien con otros gases y calefacción indirecta. La corriente de vapor consigue, por una parte, calentar la mezcla de líquidos hasta conseguir su ebullición y por otra, rebaja la temperatura de ebullición al añadir su presión de vapor a la propia de los componentes volátiles. Los vapores obtenidos se envían a un condensador donde se forman capas inmiscibles de agua y compuestos a eliminar que normalmente se pueden separar por decantación.

Otros métodos físicos aplicables:

#### *V. Filtración:*

Es otra técnica adecuada en el tratamiento de residuos peligrosos. Al igual que muchos métodos avanzados, la filtración ha evolucionado a lo largo de los años. La filtración es la operación por la cual se consigue separar sólidos finamente divididos de los fluidos, en cuyo seno se encuentran suspendidos, utilizando para ello, una superficie permeable al fluido (líquido o gas). Por tanto, son necesarios dos componentes, un líquido turbio y un material filtrante, adecuado a la finalidad perseguida.

Como medios filtrantes se emplean materiales granulares como polvo de carbón, arena y grava, tierras de variada naturaleza, entre otros. Otras veces el medio filtrante es un tejido o fieltro, siempre con las características de resistencia mecánica y química, necesarias para la misión a cumplir. El tamaño de grano de un lecho filtrante se define según los conceptos de tamaño efectivo, es la luz de una malla que retenga el 90% en peso del material filtrante y deje pasar el 10% restante; y coeficiente de uniformidad, es el coeficiente entre la luz de una malla que deje pasar el 60% del material y la otra que deja pasar solo el 10%.

#### *VI. Adsorción*

Se utiliza para la eliminación de contaminantes en muchos sistemas ambientales. La adsorción es un proceso por el cual se produce la fijación de moléculas orgánicas de fases líquidas o gaseosas, en la superficie de ciertas sustancias sumergidas o en contacto con ellas. Es por tanto un proceso superficial en el que intervienen una sustancia adsorbente que retiene y otra sustancia adsorbato que queda retenida. Se caracteriza por ser un fenómeno en dos dimensiones y además reversible.

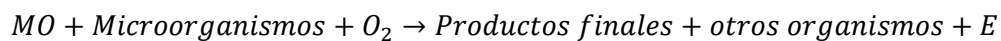
### 2.3.1.3 Valorización directa por métodos biológicos

La degradación biológica de los componentes peligrosos es una de las opciones más utilizadas y factibles, en un proceso integral de gestión de desechos y hace uso de microorganismos para degradar y desintoxicar el residuo. En los últimos tiempos, un gran número de estudios se han centrado principalmente en la identificación de nuevas especies de este tipo y en la reingeniería de los procesos. (Shukla, Ganguly & Hussain, 2020)

Generalmente, los microorganismos se descomponen en compuestos más simples a través de la respiración aeróbica, la respiración anaeróbica y la fermentación. Sin embargo, se prefieren los procesos de degradación aeróbica porque son rápidos y más completos y, por lo tanto, no producen gran cantidad de subproductos. Sin embargo, esos métodos se limitan a bajos niveles de productos orgánicos halogenados (DBO o 10, 000 mg/l).

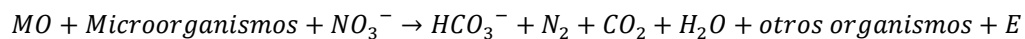
Los fundamentos biológicos se fundamentan en la oxidación biológica, que se esquematizan según las siguientes reacciones.

Proceso aeróbico:

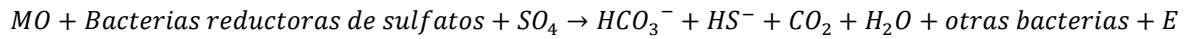


Proceso anaeróbico:

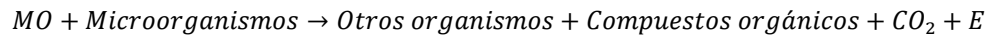
Si el oxígeno captado por los microorganismos procede de nitratos, la reacción que se produce es la siguiente:



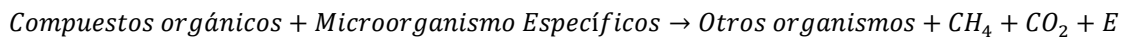
Cuando los microorganismos utilizan sulfatos como fuente de oxígeno, la reacción química producida es la siguiente:



Cuando el oxígeno necesario para la vida de los organismos es captado de la propia materia orgánica, la ecuación que ocurre es la siguiente:



Los compuestos orgánicos pueden ser: Alcoholes, ácidos orgánicos, aldehídos, entre otros. Puede suceder que bacterias presentes en el proceso, metabolicen los compuestos orgánicos a otros más simples, dando paso a la reacción secundaria siguiente:



Los productos finales primarios de todas las digestiones anaeróbicas de los procesos de digestión (logrados a través de bacterias que sobreviven en un medio ambiente) son el metano y el dióxido de carbono. Los sistemas que operan con este proceso generalmente requieren largos tiempos de retención. Muchas variantes de esta tecnología están disponibles comercialmente, pero el principio básico sigue siendo el mismo. La aplicabilidad está limitada por la concentración de sustancias orgánicas. Se puede observar que casi todos los métodos de biorremediación funcionan con desechos líquidos que no tienen altas concentraciones de metales pesados y son generalmente procesos de desintoxicación.

Entre las tecnologías más utilizadas se pueden mencionar:

### *I. Lodos activados*

Este método consiste en provocar el desarrollo de un cultivo de microorganismos biológicamente activos (flóculos bacterianos) para ponerlos en contacto con el flujo a detoxificar. Dicho proceso ocurre en un tanque agitado y aireado cuya finalidad es evitar sedimentos y homogenizar la mezcla de los flóculos bacterianos y el flujo a tratar (licor mixto). Cuando

concluye el tiempo de contacto necesario según el diseño, el flujo residual pasa a un clarificador o decantador secundario, donde se produce la separación del líquido depurado de los lodos. Parte de estos lodos se hacen recircular al tanque de aireación, consiguiéndose así, mantener el nivel de bacterias adecuado al rendimiento del proceso, mientras que el resto se evacua hacia un sistema de tratamiento de fangos.

Entre los principales sistemas de tratamiento por lodos activados se encuentran:

- i. Sistema básico o flujo pistón: este sistema comprende depósitos de aireación alargados, a cuya entrada llegan simultáneamente el flujo a tratar y los lodos recirculados. Este sistema presenta la ventaja de producir un efluente depurado de buena calidad, por el contrario, provoca un fuerte consumo de oxígeno a la entrada del tanque al aumentar la concentración orgánica con la mezcla de fangos. Se favorece la nitrificación.
- ii. Sistema de alimentación escalonada: en este sistema, el flujo a tratar se reparte a lo largo del tanque de aireación, mientras que el lodo recirculado accede por la cabeza de este. La masa de lodos activados es superior a la del sistema anterior para una misma concentración de contaminantes en el efluente de salida. Este proceso presenta la ventaja de poder airear los lodos previamente a su contacto con el residuo.
- iii. Sistema de mezcla completa: constituye un tercer sistema que permite obtener una homogeneidad de masa residual, lodos activados y oxígeno, en todo el tanque de proceso. Este sistema soporta mejor que los anteriores los efectos de choque, pero es menos favorable a la nitrificación. Es difícil su aplicación a grandes tanques de aireación separados y especialmente en los de forma alargada, pero si puede ponerse en práctica en aparatos compactos.



## *II. Contactores biológicos rotativos*

Este es otro método de tratamiento aeróbico especialmente utilizado para las corrientes de desechos que contienen alcoholes, ftalatos, fenoles, amoníaco y cianuros. Los sólidos también se eliminan en este proceso como parte del tratamiento primario. De manera similar al proceso de lodos activados, las corrientes que contienen compuestos altamente clorados no son adecuado para el tratamiento por este método.

El objetivo de este método es oxidar la materia orgánica en presencia de oxígeno, utilizando como soporte el líquido, provocando la aparición de una película de biomasa que al desprenderse por su propio peso o por la utilización de un rascador mecánico o un incluso aire a presión, decanta en la cuba en la que se produce el tratamiento, pasando por el efluente a la etapa de clarificación.

Los contactores biológicos rotativos son de poliestireno, cloruro de polivinilo o polímeros orgánicos, estos pueden utilizarse con éxito en el tratamiento de flujos de carga orgánica biodegradable, incluyendo disolventes y compuesto orgánicos halogenados. No resulta eficaz para residuos con altas concentraciones de metales pesados.

El proceso genera un líquido depurado que pasará posteriormente a le etapa de clarificación de un decantador, mientras que en el fondo de tanque se irá depositando una masa biológica decantada que constituyen los lodos, que según sus características necesitarán de tratamientos posteriores. También se puede provocar el desprendimiento de compuestos orgánicos volátiles que se tendrán que controlar para evitar la propagación al aire, y minimizar los riesgos de explosión en el caso que se estén tratando residuos con un alto poder calorífico.

### *III. Balsas o lagunas de estabilización*

Son instalaciones de tratamiento de flujos orgánicos mediante oxidación biológica, construidas en el terreno, se caracterizan por su gran superficie y escasa profundidad (1 a 2 metros). La superficie necesaria es importante debido a que el rendimiento de este proceso biológico es bajo, entre 25 y 100 Kg de DBO por hectárea al día. Se pueden distinguir entre tres tipos de balsas de acuerdo con sus características de construcción y los microorganismos que van a actuar en ellas.

- i. **Lagunas aeróbicas:** son aquellas en las que predominan los procesos de fermentación en presencia de oxígeno, para el tratamiento de residuos industriales de carácter orgánico. En este tipo de instalaciones se requieren dos especies de organismos vivos, por una parte, las algas microscópicas que se alimentan del oxígeno del aire para efectuar sus funciones clorofílicas durante el día, para cederlo en disolución al medio acuoso durante la noche. El oxígeno disuelto es aprovechado por el otro tipo de microorganismos presentes.
- ii. **Lagunas anaeróbicas:** son aquellas en las que el proceso de fermentación se produce en ausencia de oxígeno molecular, dando lugar a distinguir dos etapas claramente detectables. En la primera etapa, un grupo de bacterias sintetizadoras de ácido, se encargan de romper las largas cadenas orgánicas de la masa residual, transformándolas en compuestos orgánicos de cadena corta como ácidos, aldehídos, cetonas y alcoholes. Posteriormente, en una segunda etapa, otro grupo de bacterias transforman los compuestos intermedios citados, en metano, amoníaco, dióxido de carbono e hidrógeno y generándose nuevo plasma celular.

- iii. Lagunas facultativas: son aquellos en las que se producen los dos tipos de reacciones de fermentación; en la parte superior se dan condiciones aeróbicas por acción de las algas, a las que les llegan aportes de oxígeno y luz con los que realizan sus funciones de fotosíntesis, y en la parte inferior, donde no llega el oxígeno del aire, los microorganismos se desarrollan en condiciones anaerobias, produciéndose la descomposición de moléculas orgánicas de largas cadenas en otras más pequeñas y biomasa decantable originando gran cantidad de lodos.

#### IV. *Lagunas aireadas*

Estas instalaciones de tratamiento de flujos son similares a las balsas o lagunas de estabilización, con la diferencia de que estas reciben aportes de oxígeno mediante sistemas de aireación artificial o forzado, impidiendo así los posibles inconvenientes que presentan las lagunas naturales con las variaciones estacionales, produciendo mejoras en la homogenización del líquido a detoxificar, por la propia agitación a que da lugar la entrada de aire, permitiendo así aumentar el rendimiento y reducir la superficie en 15 veces a la requerida por una laguna no aireada. Por otra parte, el aporte de oxígeno molecular a la masa orgánica es más directo, siendo menos decisivo el aporte de las algas clorofílicas como contrapunto a su acción de fotosíntesis.

En estas condiciones se produce una mineralización de la materia orgánica, dando origen a grandes cantidades de nitratos y fosfatos que producirán, a su vez, un crecimiento importante de las algas, hecho que habrá de tenerse en cuenta al optimizar la instalación. Los sistemas empleados para el suministro de aire utilizan aireadores y difusores. Para los primeros, el

rendimiento se calcula en masa de oxígeno por unidad de potencia aplicada y tiempo, mientras que para los difusores se expresa en % de oxígeno transferido por cantidad de oxígeno en el aire suministrado.

Como se puede observar la labor de los microorganismos en la degradación de contaminantes de flujos industriales. Sin embargo, su aplicación natural no es siempre adecuada para determinados residuos peligrosos de difícil degradación, por lo que es necesario estudios dirigidos a encontrar cepas de microorganismos, que por sí mismos sean capaces de subsistir en un medio altamente agresivo para otras especies microscópicas y por supuesto especies superiores, e incluso propiciar esa afinidad entre microorganismos y contaminante por medio de modificaciones genéticas.

Las cepas mutantes han de producirse mediante ingeniería genética. Se trata de potenciar determinadas capacidades de ciertos microorganismos para metabolizar o detoxificar flujos, igualmente se trata de mejorar la propia capacidad de degradación, para que la detoxificación del flujo a tratar sea más rápida y efectiva, hecho que se consigue influyendo en la producción del agente responsable de la degradación, que no es más que la enzima.

Ante las modificaciones genéticas de las cepas para tratar residuos peligrosos, hay que considerar la incidencia de esta alteración artificial, sobre el medio ambiente, ya que, si bien es cierto que producen la degradación de los residuos, también es posible que originen en esta descomposición, otras sustancias intermedias que sean más perjudiciales para el medio ambiente, que las originales. Por lo tanto, en paralelo a la modificación a dichas cepas hay que hacer un estudio exhaustivo de las posibilidades de destrucción de contaminantes y sus posibles riesgos derivados de una incompleta degradación de los compuestos químicos a eliminar.

### **2.3.2 Materia prima para uso secundario**

Los desechos eliminados por una industria, si bien, ya no poseen valor para la misma, y la valorización directa no es una opción, estos pueden contener materiales de gran valor para otra industria, y representar una fuente de suministro, con o sin purificación intermedia y/o enriquecimiento.

Este tipo de materia prima puede ser usado en conjunto o no con la materia prima virgen, lo cual también proporciona algunos tipos de ventajas de las cuales se puede mencionar una mayor seguridad en su suministro, si es usada con la materia prima primaria existe una reducción en costes y un menor uso de energía, su reúso también significa menos contaminación para la tierra, aire y agua asociados a estas prácticas.

Además, el reúso puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Cuando se reúsan los desechos peligrosos, se necesita menos cantidad de materias primas y energía para la fabricación de productos. Cuando la demanda de energía disminuye, se queman menos combustibles fósiles y se emiten menos GEI a la atmósfera, lo que puede ayudar a disminuir los impactos del cambio climático y a reducir la contaminación del aire. Por último, al reusar los desechos peligrosos, se envían menos de estos para su tratamiento y eliminación. Esto significa una menor necesidad de vertederos e incineradores. El reúso de residuos peligrosos no sólo es bueno para el medio ambiente, sino que puede beneficiar a la propia empresa, ya que puede aumentar la eficiencia de la producción y reducir los costos relacionados. En pinturas, algunas de estas tecnologías se basan en la recuperación de metales pesados usados en el proceso productivo, algunos tipos de estas tecnologías son las siguientes.

## *I. Biometalúrgica*

Se utiliza en el procesamiento de minerales como una tecnología alternativa para recuperar metales de minerales concentrados en cantidades muy bajas. Los campos principales de la biometalúrgica para la recuperación de metales son la biolixiviación y bioadsorción.

- i. **Biolixiviación:** este proceso llega a ser factible mediante el uso de bacterias que ayudan a que ocurran la reacción para extraer metales como cobre, níquel, zinc, cromo y metales preciosos como el oro y la plata. Para que ocurra, el grupo acidófilo de bacterias juega un papel importante en la biolixiviación de metales pesados como: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, y *Sulfolobus sp* (Lingen & Zhenming, 2016). Un estudio hecho por Wang en 2009 observó que estas bacterias pueden lixiviar a los distintos metales a una concentración de 7.8 g/l, los sólidos como en cobre tienen una tasa de disolución del 99% lo cual facilita su extracción.
- ii. **Bioadsorción:** es un proceso fisicoquímico e independiente del metabolismo que da lugar a la eliminación de sustancias de una solución por medio materiales biológicos (Lingen y Zhenming, 2016). Las propiedades de ciertos tipos de materiales de la biomasa microbiana inactivos o muertos que también les permiten unir y concentrar los iones metálicos de los efluentes industriales y las soluciones acuosas. Los bioadsorbentes se preparan a partir de diferentes microorganismos incluyendo bacterias, hongos, algas, actinomicetos, levaduras y algunos materiales de desecho biológico.

## *II. Cristalización*

Se produce cuando los materiales se solidifican a partir de un líquido, o cuando se precipitan a partir de un líquido o gas. Esto puede ser causado por un cambio físico, como un cambio

de temperatura, o un cambio químico, como la acidez. La cristalización es un proceso dirigido por el tamaño y la forma de las moléculas involucradas, y sus propiedades químicas. Los cristales pueden formarse a partir de una sola especie de átomo, diferentes especies de iones, o incluso grandes moléculas como las proteínas. La cristalización tiene dos fases importantes que son la Nucleación y el crecimiento del cristal.

- i. Nucleación: Los primeros átomos de la solución forman una estructura cristalina que se convierten en el centro y más átomos se organizan alrededor de este núcleo. A medida que esto sucede, más células unitarias se agrupan alrededor del núcleo hasta que se forma una pequeña “semilla” de cristal. Esta fase es extremadamente importante en la cristalización, ya que el núcleo del cristal es el que determinará la estructura de cristal entero. Las imperfecciones en el núcleo y en la “semilla” del cristal pueden conducir a reordenamientos drásticos a medida que el cristal continúa formándose.
- ii. Crecimiento del cristal: Como otras moléculas y átomos rodean el núcleo, se ramifican a partir de la simetría que ya se ha establecido, añadiéndose al cristal de la “semilla”. Este proceso puede ocurrir muy rápidamente, o muy lentamente, dependiendo de las condiciones (por ejemplo, el agua puede cristalizarse en hielo en cuestión de minutos, mientras que toma milenios formar cristales geológicos "típicos" como el cuarzo y los diamantes). La formación básica está establecida alrededor del núcleo que determina la totalidad de la estructura cristalina.

### *III. Hidrometalúrgica*

Es la extracción de metal de un mineral mediante la preparación de una solución acuosa de una sal del metal y la recuperación del metal de la solución. Las operaciones que suelen

realizarse son la lixiviación o disolución del metal o del compuesto metálico en agua, comúnmente con agentes adicionales; la separación de los residuos y la purificación de la solución de lixiviación; y la precipitación del metal o de uno de sus compuestos puros de la solución de lixiviación por medios químicos o electrolíticos. El agente de lixiviación más común es el ácido sulfúrico diluido.

Entre las tecnologías de recuperación por medio de procesos térmicos podemos mencionar:

### *I. Pirometalúrgica*

Extracción y purificación de metales mediante procesos que implican la aplicación de calor. Las operaciones más importantes son el tostado, la fundición y el refinado. La torrefacción, o el calentamiento en aire sin fusión, transforma los minerales de sulfuro en óxidos, escapando el sulfuro en forma de dióxido de azufre, en forma de gas. La fundición es el proceso utilizado en los altos hornos para reducir los minerales de hierro. También se funden los minerales de estaño, cobre y plomo.

### *II. Reactores de sales fundidas*

Son reactores que contiene carbonato de sodio o carbonato de calcio, que actúa como un medio conductor del calor, la temperatura de combustión puede mantenerse en el lecho, donde se produce la combustión completa. El lecho también puede actuar como catalizador, permitiendo que se produzca una combustión eficiente a temperaturas más bajas.

Este sistema es muy adecuado para una variedad de desechos en forma sólida, líquida y gaseosa. Además, el azufre, los halógenos y otros subproductos pueden ser retenidos en la masa fundida mientras que los desechos con alto contenido de nitrógeno son incinerados para producir óxidos de nitrógeno. Los productos gaseosos que se escapan se queman en una cámara



de combustión secundaria para completar la oxidación, con lo que se reduce la necesidad de dispositivos de control de contaminación del aire. El sistema de sales fundidas también puede utilizarse para recuperar combustible y metales pesados de los desechos industriales. Aunque el sistema es compacto y tiene potencial para unidades móviles, el lecho fundido puede ser corrosivo para la mayoría de las aleaciones disponibles para la construcción.

Algunos ejemplos de materia prima para uso secundario en los distintos sectores industriales son:

#### **a) Agricultura**

Aprovecha los desechos ricos en fósforo para convertirlos en materias primas de uso secundario para realizar fertilizantes, este fósforo resulta de la operación de recuperación de nutrientes mediante procesos de cristalización (por ejemplo, fosfatos de estruvita y de calcio; sales de fosfato precipitadas) o procesos termoquímicos (por ejemplo, cenizas, derivados de cenizas, escorias y carbonatos obtenidos por oxidación térmica y pirólisis; materiales y derivados de la oxidación térmica y materiales de pirólisis y gasificación, respectivamente) (Huygens, 2018). Para comprobar que el fertilizante funciona correctamente, se le hace un estudio al suelo donde será aplicado y se medirán variables antes y después de su aplicación como lo son el pH, textura del suelo, cantidad de fosfatos, otros es el tiempo de cosecha después de su aplicación y compararlos con los fertilizantes sin materias secundarias.

#### **b) Concreto**

Es de las industrias que más aprovecha los desechos peligrosos a la hora de fabricar sus productos. Entre los desechos aprovechados son las cenizas resultantes de los tratamientos térmicos de los lodos de depuración de aguas residuales, los residuos de la preparación del

carbón, los residuos de escoria de cenizas, desechos de demolición, los cuales son aprovechadas para durante el proceso de fabricación del clinker. Ya muchos de estos desechos tienen propiedades hidráulicas similares a las del cemento, por lo cual estas pueden ser agregadas en pequeñas cantidades con cemento portland y arena para crear hormigón cuyas propiedades mecánicas y criterios ambientales se compararon con uno que tuviera materias primas vírgenes; si después de las pruebas de calidad de esta combinación y sus resultados no varían demasiado con respecto al hormigón que no tiene estos desechos, este puede ser puesto a la venta.

### **c) Pigmentos**

En esta industria existe un gran interés en producir pigmentos altamente estables y que muestren una tonalidad intensa y que cumplan los requerimientos tecnológicos y ambientales. Por lo que a la hora de la elección de las materias primas se busca también las cuales tengan un menor costo, por lo cual se llega a recurrir a materias primas provenientes de otras industrias, como es el caso de los lodos ricos en cromo hexavalente y níquel que son residuos del proceso de galvanización y lodos ricos en hierro generados durante el trefilado del acero, ya que dichos procesos consumen grandes cantidades de agua, la que también necesitará ser tratada posteriormente.

Estos lodos son usados principalmente en la fabricación de pigmentos de color negro ya que es el más utilizado y que por el mismo origen de los metales el color más fácil de fabricar, además siendo usado en el 25% de los productos a pintar, más que todo en los cerámicos (Costa, y otros, 2007).

Para poder usar los metales en el pigmento, los lodos son calentados a 1100°C, que después de enfriarse estos son incorporados en una relación molar de Cr-Ni-Fe aproximadamente de 1:1:1 (ya que es la que da los mejores valores) en la mezcla con las otras materias primas en el proceso, para así obtener el color negro que después para controles de calidad y comparaciones con un pigmento creado a partir de materias primas puras para asegurar de que todo esté en orden antes de producirlo en lotes.

#### **d) Pinturas**

Una de las materias primas que usa la industria para su reuso es el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) por su característico color blanco y su capacidad de dispersar la luz, este componente es usado en revestimientos, pero su producción para ser usado como pigmento requiere una gran demanda de energía y además repercute en un gran impacto al medioambiente con emisiones de CO<sub>2</sub> y residuos los cuales deben ser tratados posteriormente (Mikael C. F. Karlsson, 2019). Una de las formas para recuperar este componente es mediante la lixiviación de ilmenita (FeO.TiO<sub>2</sub>) de los procesos de minería de magnetita y hematita, aunque uno de los problemas que da este método es el de que por veces no es rentable si no hay grandes cantidades de este mineral, aunque la pureza alcanzada sea realmente alta.

Otra forma de recuperar este compuesto es mediante los desechos generados en la elaboración de pinturas, usando la pirolisis para eliminar los compuestos no deseados y después incorporar el pigmento que queda en la pintura. La pintura con el pigmento reciclado correctamente con pirolisis (con una temperatura entre los 470°C y 500°C) llega a tener propiedades muy parecidas comparado con la pintura con materia prima primaria como son el brillo, blancura, viscosidad, dispersión, lo cual la hace apropiada para usar y así poder reducir costos y el impacto ambiental que esta causa.

### **2.3.3 Valorización energética**

Muchos desechos peligrosos tienen un gran poder calorífico que justifica económicamente su recuperación energética. La recuperación de energía puede llevarse a cabo en el mismo lugar donde fue generado el residuo o en un lugar secundario. (Nassos & Avlonas, 2020)

Existen varios sistemas de valorización energética de residuos, que buscan no solo la disminución de las características peligrosas sino también la disminución del volumen de los residuos y la recuperación energética. Entre estos sistemas podemos destacar:

- a) Incineración
- b) Pirólisis
- c) Gasificación
- d) Plasma
- e) Digestión anaeróbica

#### **2.3.3.1 Incineración**

La incineración se utiliza como tratamiento para una amplia gama de residuos. Esta técnica tiene por objetivo reducir el volumen y peligrosidad de los residuos, concentrando o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. La incineración a su vez permite la recuperación energética, mineral o químico de los residuos. Normalmente, la incineración en sí es una sola parte de un sistema complejo de tratamiento de residuos que, en su conjunto, permite la gestión global de los mismos (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

Básicamente, la incineración de residuos es la oxidación de materiales heterogéneos, con alto contenido de materia orgánica, minerales, metales y agua. Durante este proceso, se generan gases de combustión que contienen la mayoría de la energía disponible en forma de calor.

Los principales componentes de los gases de combustión según (Grau y Farré, 2011), son: vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Además, según la composición del material incinerado y las condiciones de operación, también se pueden encontrar pequeñas cantidades de CO, HCl, HF, HBr, HI, NOX, SO<sub>2</sub>, VOC, PCDD/F, PCB y compuestos de metales pesados. Según las temperaturas de combustión alcanzadas durante las etapas principales de la incineración, los compuestos inorgánicos y metales pesados volátiles se evaporan total o parcialmente. Estas sustancias son transferidas desde los residuos a los gases de combustión y ceniza.

El diseño preciso de una planta incineradora y su selección cambia según el tipo de residuo a tratar, siendo los factores claves según Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, y Roudier, los siguientes:

- a) Composición química del residuo
- b) Composición física del residuo (tamaño de partícula)
- c) Características térmicas del residuo (poder calorífico, niveles de humedad, etc.)

Debido a la amplia gama de especificaciones químicas y físicas de algunos residuos peligrosos, pueden surgir dificultades en el proceso de incineración. Por ello, suele aplicarse operaciones de mezcla o pretratamiento del residuo con el fin de garantizar la eficiencia del proceso, evitar sobrepasar la capacidad, y por lo tanto cumplir con los requisitos operativos y ambientales. Teniendo en cuenta la composición y características del residuo, Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, y Roudier, detallan entre los principales pretratamientos:

- a) Disminución del tamaño de partícula;
- b) Neutralización (valores normales de pH de 4-12);

- c) Deshidratación de lodos;
- d) Solidificación de lodos con agentes aglomerantes.

Las incineradoras incluyen una serie de componentes técnicos que interactúan entre sí y que, en su conjunto, realizan un tratamiento global de los residuos.

Cada una de estas etapas tiene una finalidad, que se presenta en la Tabla 2.1 y se detalla a continuación.

*Tabla 2.1 Finalidad de las etapas de una incineradora de residuos*

<b>Etapas</b>	<b>Objetivos</b>
<b>Tratamiento térmico</b>	Destrucción de sustancias orgánicas
	Evaporación de agua
	Evaporación de sales inorgánicas y metales pesados volátiles
	Producción de escoria potencialmente explotable
	Reducción de volumen de residuos
<b>Recuperación energética</b>	Recuperación de energía aprovechable
<b>Limpieza de gases de combustión</b>	Eliminación y concentración de materia inorgánica y metales pesados volátiles en residuos sólidos. Como residuos de limpieza de gases de combustión o lodo de tratamiento de aguas residuales
	Minimización de las emisiones a todos los medios

FUENTE: (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019)

Los tipos de tratamientos térmicos a los cuales pueden ser sometidos dependen de las características físicas y químicas de estos, ya que no todos los tratamientos térmicos son indicados para todos los residuos. Entre las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de residuos peligrosos se pueden destacar los hornos de parrilla y los hornos rotativos (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

## I. Incineración en horno de parrilla

El horno de parrilla es un horno de incineración en el que los residuos se transportan mediante una estructura de forma variable. La parrilla de incineración realiza las siguientes funciones:

- a) Transporte de los materiales a incinerar a través del horno;
- b) Carga y aflojamiento de los materiales a incinerar;
- c) Posicionamiento de la zona de incineración principal en la cámara de incineración, posiblemente en combinación con medidas de control de rendimiento del horno.

Los diferentes sistemas de parrillas pueden diferenciarse por la manera en que el residuo se transporta a través de las diferentes zonas de la cámara de combustión. Normalmente, el tiempo de permanencia de los residuos en las parrillas no es superior a 60 minutos y se extraen, en forma de escorias, por el extremo opuesto de la parrilla.

En la Figura 2.3, se presenta un ejemplo de esquema de incinerador de horno de parrilla.

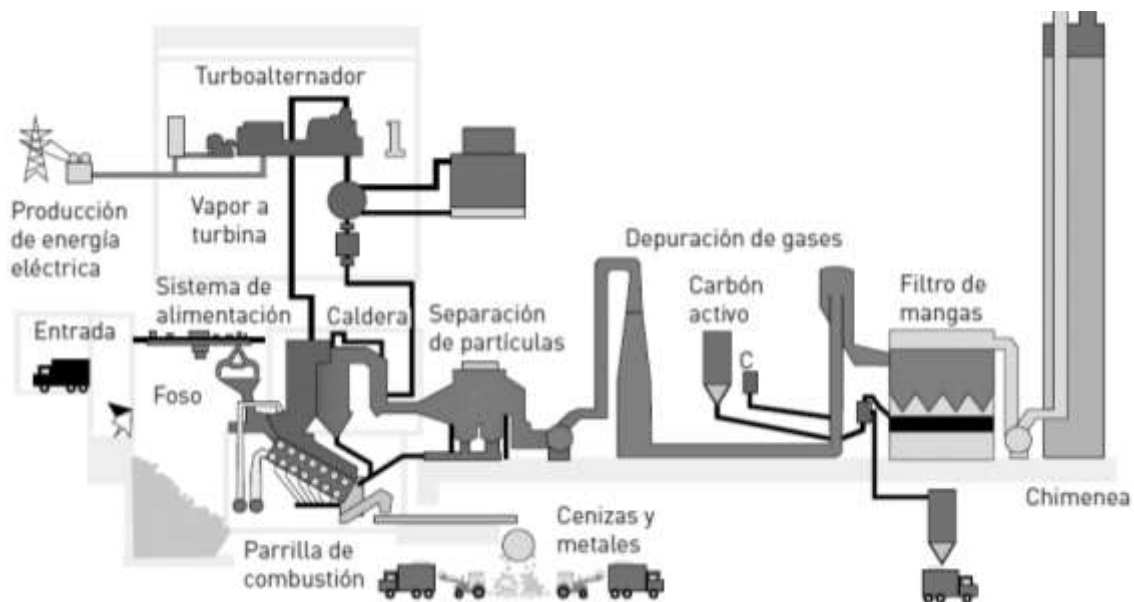


Figura 2.3 Esquema de incineración en horno de parrilla.

FUENTE: (Grau y Farré, 2011)

Generalmente, los finos caen a través de la parrilla, recuperándose en el recolector de cenizas. En algunos casos, se recuperan separadamente y pueden reintroducirse en la parrilla para completar la combustión o eliminarse directamente. Los finos se pueden recircular a la tolva, siempre y cuando se tenga especial cuidado en que no se inflame el residuo contenido en ésta.

Usualmente las parrillas cuentan con un sistema de refrigeración, a menudo con aire, aunque en los casos donde el poder calorífico es mayor (12-15 MJ/kg), se emplea agua fría como fluido refrigerante, haciéndolo circular a través del interior de la parrilla. El flujo del fluido refrigerante avanza desde las zonas frías hasta las calientes de forma progresiva, con el fin de maximizar la transferencia de calor. El calor absorbido por el medio refrigerante puede ser aprovechado para el uso en el proceso o para uso externo (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

Para conseguir una buena combustión, se debe asegurar una buena distribución del aire de incineración en el interior del horno. Esto se logra inyectando aire en distintos puntos del horno, por lo que suelen distinguirse dos tipos:

- a) Aire primario: es aquel que se inyecta a través de la parrilla y cuya función es la de actuar como aire de combustión.
- b) Aire secundario: se inyecta por encima del lecho de residuos para completar la combustión.

Pueden distinguirse distintos sistemas de parrillas, atendiendo al modo en que los residuos son transportados a través de las distintas zonas de la cámara de combustión. Todos ellos



deben cumplir requisitos relativos a la alimentación de aire primario, a la velocidad de transporte e inclinación, así como de mezcla de los residuos (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019). Entre los tipos de parrillas más utilizadas para la incineración de residuos peligrosos tenemos:

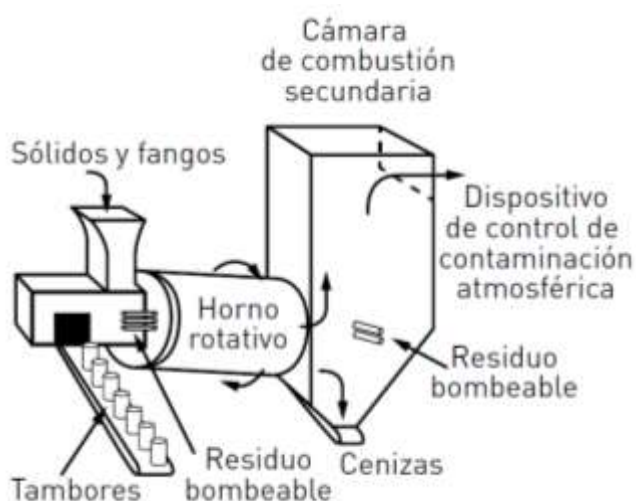
- a) Parrillas oscilantes: las secciones de la parrilla están colocadas a través del ancho del horno. Se aplica una basculación u oscilación en filas alternas para producir un movimiento hacia arriba y de avance, que hace avanzar y agita los residuos.
- b) Parrillas móviles: consisten en una cinta transportadora metálica continua o bielas conectadas que se mueven a lo largo del horno. La mezcla de los residuos se limita a cuando se transfiere de una cinta a otra, por lo que su uso en instalaciones modernas es escaso.
- c) Parrillas de rodillos: consisten en un rodillo perforado que atraviesa el ancho de la zona de parrilla. Hay varios rodillos instalados en serie, y se produce una agitación en la zona de transición, cuando el material se desprende de los rodillos.
- d) Parrillas refrigeradas: la mayoría de las parrillas son refrigeradas, casi siempre con aire, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, en algunos casos se pasa un medio refrigerante líquido (normalmente agua) a través del interior de la parrilla. La circulación del medio refrigerante va desde zonas de baja temperatura hasta las zonas de alta temperatura con el fin de aumentar al máximo la transferencia de calor. El calor absorbido por el medio refrigerante puede transferirse para uso en el proceso o para suministro externo. Esto permite la optimización del control de temperatura y del suministro de aire (oxígeno) según los requisitos específicos de combustión en la parrilla, mejorando el rendimiento de la combustión.

Según Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, y Roudier, la incineración en horno de parrilla es la más extendida y desarrollada de todos los tipos de incineración de residuos, por su capacidad de poder tratar una gran variedad de residuos y sin ser necesario un pretratamiento previo de estos. Únicamente se aplica una trituración previa a la alimentación al horno para reducir el tamaño y homogeneizar el material combustible.

En cuanto a sus limitaciones de aplicación, la incineración en horno de parrilla no es idónea para partículas, líquidos o materiales que pueden fundirse en la parrilla.

## *II. Incineración en horno rotativo*

El horno rotativo consiste en un cuerpo cilíndrico ligeramente inclinado en su eje horizontal, colocado sobre rodillos que permiten que el horno rote u oscile alrededor de su eje en un movimiento alterno, de manera que el residuo se mueve a través del horno impulsado tanto por la gravedad como por la rotación. En la Figura 2.4, se puede observar el esquema de un horno rotativo de incineración.



*Figura 2.4 Esquema horno rotativo de incineración.*

FUENTE: (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019)

Al trabajar a temperaturas altas se tiene el riesgo de dañar el material refractario de las paredes del horno por estrés térmico, por lo que algunos hornos tienen una camisa refrigerada (por aire o agua), que ayuda a alargar la vida del material de las paredes, y disminuir el tiempo entre paradas por mantenimiento del horno.

El tiempo de residencia del material sólido en el horno se determina por el ángulo horizontal del cuerpo cilíndrico y la velocidad de rotación. Para conseguir una buena combustión de los residuos, se requiere un tiempo de residencia de entre 30 y 90 minutos.

Para la incineración de residuos peligrosos, suelen instalarse hornos de tambor de 10 a 15 metros de longitud, con una relación de longitud a diámetro que normalmente es del orden de 3-6, y un diámetro interior entre uno y cinco metros (Grau y Farré, 2011).

La temperatura operativa del horno puede variar entre 850°C y 1300°C. Esta puede mantenerse quemando residuos con mayor poder calorífico (ej., líquidos), aceites residuales, gasóleo de calefacción o gas.

Para el caso de los compuestos tóxicos y con el fin de aumentar su destrucción, normalmente se agrega una cámara de postcombustión, donde se realiza una combustión adicional junto con residuos sólidos o con la adición de combustible para mantener las temperaturas requeridas para asegurar la destrucción.

Las temperaturas en la cámara de postcombustión (CPC) varían típicamente entre 900 y 1200°C, según la instalación de alimentación de residuos. La mayoría de las instalaciones tienen la capacidad de inyectar aire secundario en la cámara de postcombustión. Debido a las elevadas temperaturas en la introducción de aire secundario, la combustión de los gases de

escape es completa, por lo que los compuestos orgánicos (como HAP, PCB y dioxinas), incluidos los hidrocarburos de bajo peso molecular, son destruidos (Grau y Farré, 2011).

Los hornos rotativos pueden tratar casi cualquier residuo y su aplicación actualmente está dirigida al tratamiento de residuos peligrosos, pero en algunos casos será necesario consumir combustible auxiliar, lo que encarece su explotación. Además, son difíciles de escalar para grandes capacidades, ya que requieren grandes diámetros. Además que generaran grandes costos de mantenimiento o materiales especiales, en los casos en que debido a la temperatura se produjera fusión de escorias.

Cabe destacar que la mayoría de la energía producida durante la combustión se transfiere a los gases de combustión, por lo que su aprovechamiento permite:

- a) la recuperación de la energía de los gases de combustión calientes, y
- b) la limpieza de los gases de combustión antes de su liberación a la atmósfera.

En plantas sin recuperación de energía, los gases son enfriados normalmente mediante inyección de agua, aire, o ambos. En la mayoría de los casos se utiliza una caldera.

En plantas de incineración de residuos, la caldera tiene dos funciones que son enfriar los gases de combustión y transferir el calor de los gases de combustión a otro líquido, normalmente agua que, casi siempre, se transforma en vapor dentro de la caldera (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, & Roudier, 2019). El diseño de la caldera dependerá principalmente de las características del vapor y las características del gas de combustión (potenciales de corrosión, erosión y ensuciamiento).

Las características del gas de combustión, por su parte, dependen mucho del contenido de los residuos. Los residuos peligrosos, por ejemplo, tienden a tener variaciones muy amplias

en composición y concentración. Esto tiene un impacto significativo en las posibles técnicas de recuperación de energía que se emplean.

Los principales usos de la energía transferida a la caldera son:

- a) Producción y suministro de agua caliente (como vapor o agua caliente)
- b) Producción y suministro de electricidad
- c) Combinaciones de los anteriores

La energía suministrada puede usarse para una amplia variedad de otras aplicaciones. Normalmente, el calor y el vapor se utilizan para sistemas de calefacción industrial o centralizada, calor y vapor para procesos industriales, y ocasionalmente para el funcionamiento de sistemas de refrigeración y aire acondicionado. La electricidad puede suministrarse a la red de distribución nacional o ser utilizada dentro de la instalación.

En cuanto a los sistemas de tratamiento de gases de combustión, estos pueden ser húmedos, semi húmedos o secos, y se componen de una combinación de unidades de proceso individuales que en conjunto proporcionan un sistema de tratamiento global para los gases de combustión. Los sistemas de tratamiento de gases de combustión tienen como finalidad reducir las emisiones de partículas, gases ácidos, emisiones de óxidos de nitrógeno, mercurio, metales pesados, etc. (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

Ahora bien, los posibles impactos ambientales de las instalaciones de incineración de residuos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- a) Emisiones globales del proceso a la atmósfera y al agua (incluido olor);
- b) Producción global de residuos del proceso;
- c) Ruido y vibración del proceso;

- d) Consumo y producción de energía;
- e) Consumo de materias primas (reactivos);
- f) Derrames;
- g) Reducción de los riesgos de almacenamiento/manejo/proceso de residuos peligrosos.

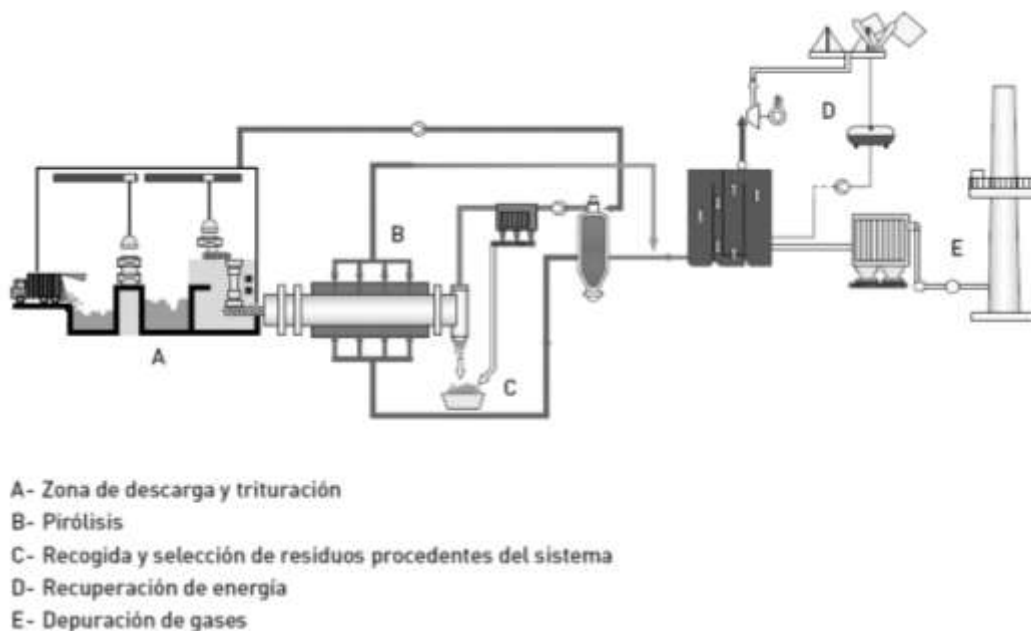
### **2.3.3.2 Pirolisis**

La pirolisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno añadido, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión.

Grau y Farré, destacan que, entre las características básicas de la pirolisis, que el oxígeno presente durante el proceso proviene exclusivamente del residuo a tratar, las temperaturas de operación oscilan entre los 300 °C y los 800 °C y como resultado del proceso se obtiene:

- a) Gas de síntesis, cuyos componentes básicos son CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y compuestos más volátiles procedente del cracking de las moléculas orgánicas, juntamente con las ya existentes en los residuos.
- b) Residuo líquido, compuesto básicamente por hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, o ceras, formados al condensar a temperatura ambiente.
- c) Residuo sólido, compuesto por todos aquellos materiales no combustibles, los cuales o bien no han sido transformados o proceden de una condensación molecular con un alto contenido en carbón, metales pesados y otros componentes inertes de los residuos.

Al no darse la reacción de oxidación de los compuestos más volátiles, el PCI del gas de síntesis procedente del proceso de pirólisis llega a oscilar entre 10 y 20 MJ/Nm<sup>3</sup>. En la Figura 2.5, se presenta el ejemplo de un diagrama de proceso de una planta de pirolisis.



*Figura 2.5 Diagrama de proceso de una planta de pirolisis.*

FUENTE: Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2010

Las plantas de pirólisis para el tratamiento de residuos suelen incluir las siguientes etapas de proceso básicas:

- I. Preparación y molienda: la molidora mejora y normaliza la calidad del residuo presentado para proceso, y también promueve la transferencia de calor.
- II. Secado: el secado, cuando es necesario, mejora el PCI (poder calorífico inferior) de los gases de proceso crudos y aumenta la eficiencia de las reacciones gas-sólido dentro del horno rotativo.

- III. Pirólisis de residuos, donde además del gas de pirólisis se acumula un residuo sólido con contenido de carbono que también contiene porciones minerales y metálicas.
- IV. Tratamiento secundario del gas y el coque de pirólisis, mediante condensación de los gases para la extracción de mezclas de aceite utilizables energéticamente y/o incineración de gas y coque para la destrucción de los ingredientes orgánicos y utilización simultánea de energía.

Además, Grau y Farré, diferencian tres tipos de pirolisis dependiendo de las condiciones de operación, los cuales son:

- i. Pirólisis lenta: proceso discontinuo, ( $P=atm$ ,  $T= 400\text{ }^{\circ}C - 500\text{ }^{\circ}C$ ) en el que la velocidad de calentamiento es reducida, ( $<2\text{ }^{\circ}C/s$ ), prolongando su tiempo de reacción entre 5 minutos y varias horas.
- ii. Pirólisis rápida: proceso continuo, a vacío y a temperaturas elevadas, por lo que la velocidad de reacción es mayor que en el caso anterior. Los productos volatilizados permanecen unos segundos en el reactor, evitando las reacciones de condensación. Se usa comúnmente para biomasa.
- iii. Pirólisis “flash”: proceso continuo, en el que el tiempo de residencia de los gases es  $<0,5\text{ s}$ , y la transmisión de calor es muy rápida. Se aplica a casos en los que el material a pirolizar tiene un alto contenido en volátiles.

Asimismo, dependiendo de la temperatura de reacción se clasifican en:

- a) Procesos de baja temperatura:  $<550\text{ }^{\circ}C$ , se producen principalmente alquitranes, aceites y un residuo carbonoso.



- b) Procesos de temperatura media: entre 550 °C y 800 °C, se obtienen elevados rendimientos de gas.
- c) Procesos a alta temperatura: >800 °C y producen elevadas cantidades de gas, debido al cracking de alquitranes.

Las bajas temperaturas de trabajo provocan una menor volatilización de carbono y otros contaminantes precursores en la corriente gaseosa, como metales pesados o dioxinas. Los compuestos que no se volatilicen, permanecerán en los residuos del pirólisis y necesitará ser gestionado adecuadamente.

Los residuos sólidos procedentes de la pirólisis pueden contener carbono, en una proporción superior al 40%, conteniendo una proporción significativa de energía del residuo de entrada (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

La recuperación energética se puede llevar a cabo de distintas maneras, por ejemplo, por medio de la combustión de gases y aceites obtenidos, mediante un ciclo de vapor para la producción de energía eléctrica o el uso del producto sólido como combustible en instalaciones industriales, por ejemplo, en plantas cementeras.

Algunas de las ventajas potenciales de los procesos de pirólisis son la posibilidad de recuperar fracciones orgánicas, como por ejemplo el metanol, generar electricidad usando motores de gas o turbinas de gas para la generación, en lugar de calderas de vapor, y reducir de forma considerable el volumen de los gases de combustión, reduciendo así el coste de inversión en el tratamiento de gases de combustión. Sin embargo, esta tecnología no está ampliamente probada y necesita un mercado para el gas de pirolisis. También requiere un buen control del proceso y no es recomendado para todos los tipos de residuos.

### 2.3.3.3 Gasificación

La gasificación es un proceso de oxidación parcial de la materia, en presencia de cantidades de oxígeno inferiores a las requeridas estequiométricamente. En términos generales, según Grau y Farré, las características para el proceso de gasificación de una corriente de residuos son las siguientes:

- i. Se usa aire, oxígeno o vapor como fuente de oxígeno, y en ocasiones como portador en la eliminación de los productos de reacción.
- ii. La temperatura de trabajo es típicamente superior a los 750 °C.
- iii. Las reacciones químicas producidas en este proceso son de dos tipos. La primera es el cracking molecular en donde la temperatura provoca la fractura de los enlaces moleculares más débiles originando moléculas de menor tamaño, generalmente hidrocarburos volátiles. La segunda de las reacciones es la de reformado de gases, estas son específicas de los procesos de gasificación y en ellas suele intervenir el vapor de agua como reactivo.
- iv. Como resultado del proceso de gasificación se obtiene un gas de síntesis que está compuesto principalmente por CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (si se emplea aire como gasificante) y CH<sub>4</sub> en menor proporción. Como productos secundarios se encuentran alquitranes, compuestos halogenados y partículas. Además, también se obtienen residuos sólidos compuestos por materiales no combustibles e inertes presentes en el residuo alimentado; generalmente contiene parte del carbono sin gasificar. Las características de este residuo son similares a las escorias de los hornos en las plantas de incineración.

- v. La cantidad, composición y poder calorífico de los gases procedentes de la gasificación dependerá de la composición de los residuos, de la temperatura y de las cantidades de aire y vapor utilizadas.

El uso del gas de síntesis como materia prima para la producción de compuestos orgánicos es uno de los más comunes, así como el de combustible en los procesos de producción de energía eléctrica mediante ciclos térmicos distintos a los de vapor de agua. Además, también es utilizado como combustibles en calderas tradicionales o en hornos.

Existen distintos procesos de gasificación disponibles o en desarrollo que, en principio, son adecuados para el tratamiento de residuos municipales, para ciertos residuos peligrosos y para lodo de depuradora seco (UBA, 2001).

En la Figura 2.6, podemos observar un esquema general del proceso de gasificación.

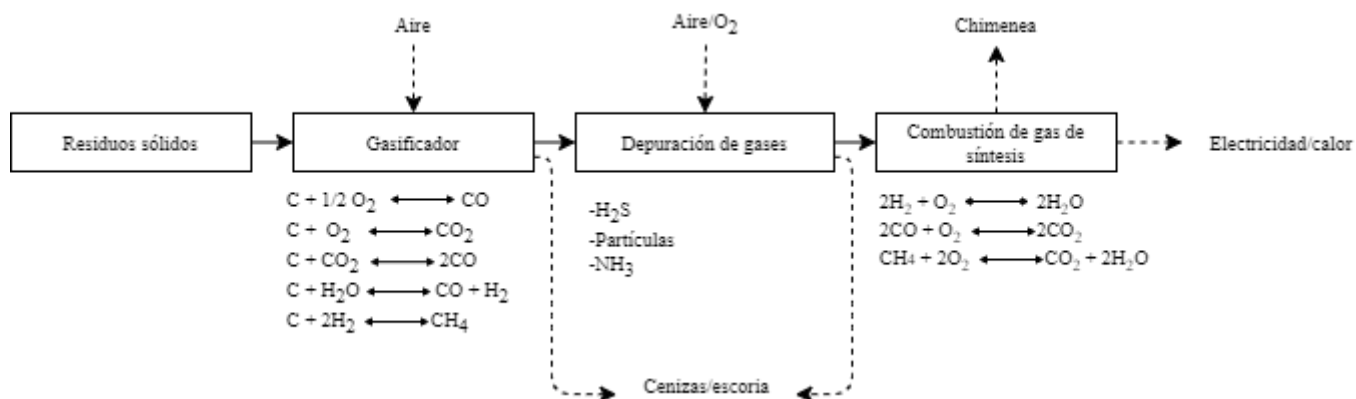


Figura 2.6 Ejemplo de proceso de gasificación

FUENTE: Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2010

Según Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, y Roudier, entre los tipos de reactores de gasificación tenemos:

- i. Gasificador de lecho fijo: se requiere pretratamiento en forma de secado para material con grumos.
- ii. Gasificador de baño de escoria: como el de lecho fijo, pero con descarga de ceniza de fondo fundida.
- iii. Gasificador de flujo por arrastre: para material líquido, pastoso y de grano fino que pueda inyectarse en el lecho mediante boquillas de inyección.
- iv. Gasificador de lecho fluidizado: gasificador de lecho fluidizado circulante para residuos municipales pretratados, lodo de depuradora deshidratado y algunos residuos peligrosos.
- v. Gasificador de lecho con borboteo: similar a los incineradores de lecho fluidizado con borboteo, pero funciona a menor temperatura y como gasificador.

Para los gasificadores de flujo por arrastre y lecho fluidizado, los residuos o materiales debe de alimentarse en forma de gránulos finos. Por lo que es necesario un pretratamiento, especialmente para residuos municipales. Los residuos peligrosos, por otra parte, pueden gasificarse directamente si son líquidos, pastosos o finamente granulados (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

#### **2.3.3.4 Plasma**

El plasma es un estado de la materia, formado a partir de un gas sometido a altas temperaturas y en el cual prácticamente todos los átomos han sido ionizados. El resultado es un fluido formado por una mezcla de electrones, iones y partículas neutras libres, siendo en conjunto eléctricamente neutro, pero conductor de la electricidad (Grau y Farré, 2011).

Los procesos de plasma utilizan altas temperaturas (5000-15000°C), resultantes de la conversión de energía eléctrica en calor, para producir un plasma. En estas condiciones, los contaminantes peligrosos, como PCB, dioxinas, furanos, pesticidas, etc. se descomponen en sus constituyentes atómicos mediante su inyección en el plasma. El proceso se utiliza para tratar compuestos orgánicos, metales, PCB (incluido equipo a pequeña escala) y HCB. En muchos casos, se requiere pretratamiento de los residuos (Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook & Roudier, 2019).

Se requiere un sistema de tratamiento de gases de salida según el tipo de residuos tratados, y el residuo es una ceniza o sólido vitrificado. Las eficacias de destrucción de esta tecnología son muy altas, >99,99 %. Neuwahl, Cusano, Gómez, Holbrook, y Roudier, (2019) consideran que el plasma es una tecnología comercialmente establecida, aunque reconocen que el proceso puede ser muy complejo, caro e intensivo en mano de obra.

#### **2.3.3.5 Tecnologías de digestión anaerobia**

La digestión anaeróbica consiste una serie de procesos biológicos en los que microorganismos en ausencia de oxígeno, descomponen el material biodegradable. Uno de los productos obtenidos es el biogás, que puede ser utilizado para generar electricidad y calor, o puede ser procesado en gas natural y combustibles para el transporte (Nassos & Avlonas, 2020).

Las tecnologías de digestión anaeróbica son capaces de convertir el estiércol de ganado, los sólidos de las aguas residuales municipales, los residuos de alimentos, las aguas residuales y los residuos industriales de alta resistencia, los aceites y la grasa, y varios otros flujos de residuos orgánicos en el biogás. Los sólidos generados del proceso de digestión pueden ser separados y ser compostados para ser utilizados en la agricultura como fertilizante (Nassos & Avlonas, 2020).

El proceso de digestión comienza con la hidrólisis bacteriana de los materiales de entrada para descomponer polímeros orgánicos insolubles como los carbohidratos y hacerlos disponibles para otras bacterias. Las bacterias acidógenicas se encargan de convertir los azúcares y aminoácidos en dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco, y ácidos orgánicos. Posteriormente, las bacterias acetogénicas convierten estos ácidos orgánicos en ácido acético, junto con amoníaco, hidrógeno y carbono adicionales dióxido de carbono. Finalmente, las bacterias metanógenicas convierten estos productos en metano y dióxido de carbono (Nassos & Avlonas, 2020).

A continuación, en la Figura 2.7, puede observarse un esquema del proceso de digestión anaerobia de valorización energética:

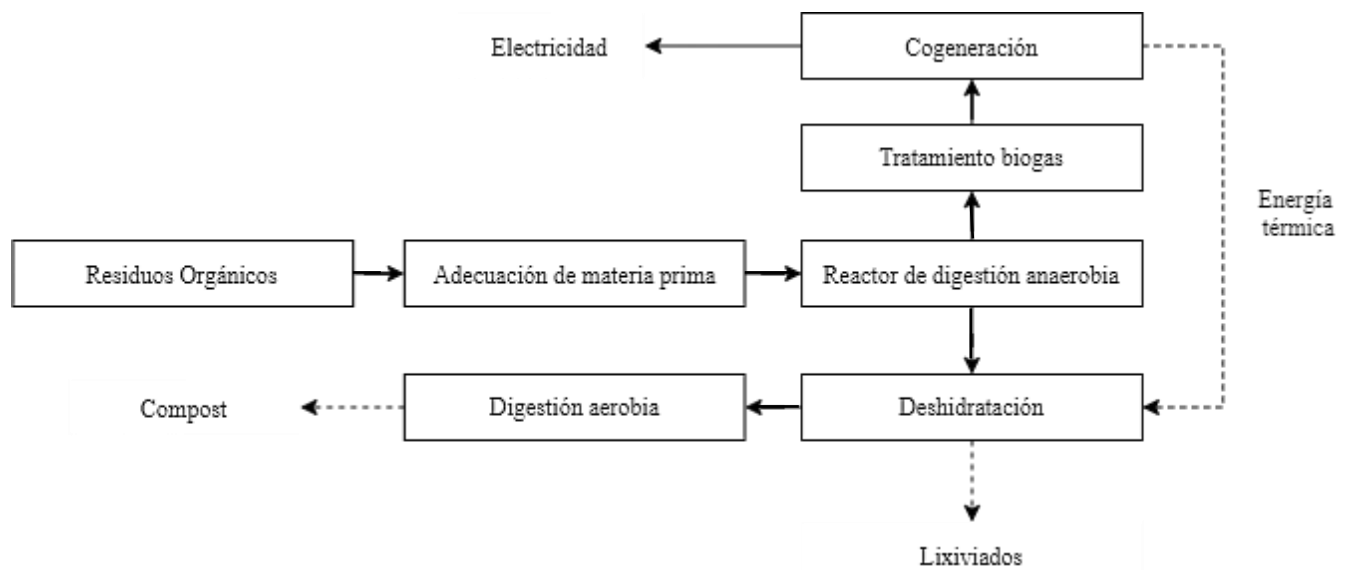


Figura 2.7 Proceso de digestión anaerobia

Fuente: (Grau y Farré, 2011)

### 2.3.4 Control de contaminantes

En algunos casos, la valorización de una corriente de desechos puede realizarse en el control de otros contaminantes, en lugar de reactivos de tratamiento alternativo. El uso más común de esta tecnología es la neutralización de los residuos mediante la mezcla de un ácido y una corriente de desechos alcalinos.

Entre los factores que influyentes en el control de contaminantes se pueden mencionar:

- a) pH: El pH de la solución metálica tiene un claro impacto en la adsorción de iones metálicos en varios desechos industriales. Se ha observado que con el aumento del pH en la solución la adsorción aumenta hasta un cierto límite y una vez sobrepasado ese límite la adsorción vuelve a disminuir (Md. Juned K. Ahmed, 2018), pero eso no ocurre por veces con los metales pesados ya que estos casi siempre necesitarán estar en un medio ácido para ser tratados de la forma más eficiente posible.
- b) Concentración inicial y el tiempo de interacción: Normalmente con el aumento de la concentración del ion metálico al inicio, la capacidad de adsorción aumenta debido a una mayor fuerza guiadora que supera la resistencia de transferencia de masa entre las fases líquida y sólida (Md. Juned K. Ahmed, 2018). Sin embargo, se observa una disminución en el porcentaje de eliminación del ion metal debido a la mayor concentración del ion metálico competidor en comparación con el limitado sitio activo de los adsorbentes. El tiempo de interacción entre los residuos industriales y el ion metal también influye en la eficacia de la eliminación de los metales pesados que, a mayor tiempo de interacción, mayor será el porcentaje de adsorción de ion metálico.
- c) Efecto de la fuerza iónica: La fuerza iónica es una propiedad de la solución en virtud en cual la afinidad entre la fase soluto y de solución se ve afectada. En la mayoría de

los casos, hay una disminución de la adsorción con el aumento de la fuerza iónica del medio acuoso. Esto puede deberse a cambios en actividad de los metales o en las propiedades en la doble capa eléctrica. Cuando dos fases (residuos industriales y especies metálicas) en solución acuosa están en contacto, seguro que están encerradas por una doble capa debido a la interacción electrostática (Lingen Zhang, 2016). Por ejemplo, Quan Gan investigó el efecto de diferentes iones compitiendo en una solución como el fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la adsorción del cromo (VI) bajo diversas concentraciones de los metales. Al final dedujo que la eliminación porcentual del cromo (VI) disminuyó con el aumento de las concentraciones de iones y a un mismo pH.

- d) Tamaño de las partículas de los desechos industriales: El tamaño de las partículas de los desechos empleados también afecta a la tasa de adsorción. Con la disminución del tamaño de las partículas se producirá un aumento de la superficie de contacto del material y, por consiguiente, la adsorción puede aumentar (Md. Juned K. Ahmed, 2018). R. A. Williams investigó el efecto del tamaño de las partículas de los desechos de té en la capacidad de adsorción del cobre (II). Observó una eliminación porcentual de cobre (II) del 41, 53 y 57% para tamaños medios de partículas de desechos de té de 1250, 925 y 575  $\mu\text{m}$ , respectivamente. También se realizaron experimentos de adsorción por lotes para estudiar la influencia del tamaño de las partículas de las cenizas volantes del bagazo en el secuestro de plomo (II) y cromo (VI) de las soluciones acuosas. Los tamaños de las partículas que se examinaron fueron, 100-150, 200-250 y 300-350  $\mu\text{m}$ . Los parámetros operacionales fueron: dosis de adsorción de 10 g/l, temperatura de 30°C, pH 6 y 5, tiempo de agitación de 80 y 60 min, para plomo (II) y cromo (VI), respectivamente. Los porcentajes de remoción de plomo (II) y cromo



(VI) fueron 99,9, 95,0, y 88,0%, que corresponde al tamaño de las partículas, 100-150, 200-250, y 300-350  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

En el caso de los desechos agrícolas, se aprovechan en la bioadsorción como mecanismo para el control de iones de metales pesados que son introducidos en las corrientes acuáticas provenientes de las distintas actividades industriales, ya que estos presentan algunas ventajas respecto a otros tipos de control de contaminantes como se puede mencionar: Su costo es menor, su eficiencia llega a ser mayor que otros métodos (p. ej. filtros de carbón activado), minimizan la generación de lodos químicos o biológicos, el bioadsorbente se puede regenerar y posibilita la recuperación de los metales. Los componentes básicos de la biomasa en los materiales de desecho agrícola incluyen la hemicelulosa, la lignina, los extractos, los lípidos, las proteínas, los azúcares simples, y el almidón que contiene una variedad de grupos funcionales que facilitan la absorción de metales ya que tienen mayor afinidad con sus iones para así poder formar complejos o quelatos. Además, estos bioadsorbentes pueden ser modificados para obtener una mayor eficiencia y múltiples reutilizaciones para mejorar su aplicación a escala industrial.

Entre los metales importantes a controlar en el área de pinturas se tiene al cadmio, cromo y plomo, los cuales pueden ser eliminados de la siguiente forma:

- a) Eliminación del cadmio: Este compuesto es relativamente soluble en el agua, por lo que es móvil en el suelo y tiende a bioacumularse. En el cuerpo humano, el cadmio se acumula en los riñones y ocasionar una disfunción en ellos (Dhiraj Sud, 2008). En un estudio realizado por Saeed e Iqbal para eliminar el cadmio del medioambiente utilizaron cascaras de frijol negro, de papaya, maní o avellanas en un medio ácido,

demonstraron que el cadmio llega a ser removido de medio con estos desechos con una eficiencia del 99%.

- b) Eliminación del cromo: Este compuesto es liberado al medioambiente por aplicaciones como el curtido, los pigmentos, los tintes para plástico, las pinturas y los textiles. Este se encontrará en varios estados de oxidación, pero el cromo (VI) y cromo (III) son los de mayor preocupación a nivel ambiental (Dries Huygens, 2018). Entre los principales desechos que muestran una eliminación del 99% del cromo se tiene al bagazo de caña de azúcar, la mazorca del maíz y la corteza de eucalipto, mucha de la bioabsorción del cromo (III) ocurre en el rango de pH ácido, siendo el pH 2 donde mejor se da este fenómeno, mientras que en pH de 6 es mejor para eliminar el cromo (VI).
- c) Eliminación del plomo: La mayor parte del plomo que llega a la naturaleza proviene de herramientas de acabado, tubos de rayos catódicos, cerámicas, soldaduras, piezas de destellos de plomo, acero y recuperación de cables (Dries Huygens, 2018). En el medioambiente este tiende a formar sedimentos y lodos de depuración. Entre los principales desechos agrícolas para eliminar este compuesto se tiene la cáscara nuez, el bagazo de la caña de azúcar, cascara de cacahuate en un entorno con un pH alrededor de 5-6 para obtener una eficiencia mayor del 98%.

Estos desechos utilizados en la recuperación de metales en aguas residuales tienen la ventaja de ser económicos, estar en abundante cantidad y buena efectividad a la hora de adsorber los metales, algunos de estos residuos usados son escoria de alto horno, y lignina y lodo rojo.

- a) Escoria de alto horno: Este desecho proviene principalmente de la industria siderúrgica, es utilizado principalmente en la adsorción de iones de níquel (II) y cobre (II) en donde con un pH de 5 se da la mayor adsorción. También se usa esta escoria con el arsénico (III) y (V) en condiciones acidas (pH de 2) demostrando ser una buena alternativa económica a los adsorbentes carbonados
- b) Lignina: Es un residuo industrial generado por la industria de fabricación de papel y pulpa. Extraída del licor negro, es utilizado para la adsorción de metales pesados en soluciones acuosas, este desecho se usa en combinación con filtros de carbón activado y reducir los costos de solo utilizar este último y así poder eliminar los iones de cobre, cadmio, cromo hexavalente.
- c) Lodo rojo: Es un material de desecho industrial (residuo del procesamiento de bauxita) generados en la producción de alúmina. Se forma cuando los minerales de bauxita están sujetos a lixiviación cáustica. Entre 1 y 2 toneladas de barro rojo son producida por tonelada de alúmina en una planta de proceso típica de Bayer. Los principales constituyentes del barro rojo son partículas finas de sílice, alúmina y calcio, hierro, óxidos de titanio e hidróxidos. Debido a la alta reactividad de la superficie de los lodos rojos, han sido explotado para la eliminación de metales pesados tóxicos de las aguas residuales.

Se llevaron a cabo experimentos por lotes para investigar la eliminación de cobre, zinc y cadmio transportados por el agua hacia un desecho de lodo rojo dominado abundante en  $\text{CaCO}_3$ . Los resultados muestran que el cobre transportado tenía una mayor afinidad con el barro rojo, en comparación con el zinc y el cadmio transportados. El principal mecanismo responsable de la retención del cobre por el lodo rojo fue la formación de atacamita (Md. Juned K. Ahmed, 2018).

Algunas veces estas tecnologías suelen combinarse y dar paso a otras consideradas más beneficiosas por no necesitar grandes extensiones de tierra y con un riguroso control ambiental, como es el caso del coprocesamiento.

### **2.3.5 Coprocesamiento**

El coprocesamiento consiste en aprovechar el potencial calórico de los residuos y someterlos a una reacción de combustión completa, sin dejar cenizas o residuos secundarios. Se debe tener especial cuidado cuando los residuos contienen compuestos como cloro y/o metales pesados, ya que se pueden formar dioxinas y furanos.

En las industrias donde los procesos requieren una gran cantidad de recursos, los desechos de fabricación, comunes o peligrosos suelen ser coprocesados con el objetivo de recuperar energía y recursos para reducir el consumo de combustibles convencionales y materias primas (GTZ-Holcim, 2006).

El coprocesamiento de los desechos peligrosos generalmente empieza con la recepción y análisis de una muestra representativa de los residuos. Si la muestra es apta para el coprocesamiento, la empresa que realizara el coprocesamiento y el generador acuerdan la recolección de los residuos y posteriormente se separan según sus características para dar un tratamiento previo como trituración y mezcla. Cuando se han logrado las características físicas y químicas deseadas, son llevados a los altos hornos de las cementeras, ya que permite la recuperación del valor energético y mineral de los desechos a la vez que se fabrica el cemento. Cabe resaltar que, el coprocesamiento no es una opción para los residuos radioactivos, biológicos infecciosos, asbestos u explosivos.

Según el Convenio de Basilea, esto constituye una operación “que puede llevar a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos” en las categorías R1 (“utilización como combustible u otros medios de generar energía”) y R5 (“reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas”) de la parte B del anexo IV del Convenio (UNEP , 2011).

Entre los beneficios del uso de esta tecnología podemos destacar el potencial de recuperación de energía, la reducción del volumen de contaminantes puede utilizarse para tratar los residuos de diferentes industrias, el bajo requerimiento de superficie terrestre comparado con vertederos y la posibilidad de escalar la capacidad de coprocesamiento (Vallero, 2019). Otro de los beneficios es que pueden ahorrar en combustible fósil y consumo de materias primas; para las autoridades municipales una de las ventajas principales es que este método de recuperación de residuos usa una instalación existente, con lo que se elimina la necesidad de invertir en un incinerador nuevo o en un sitio de disposición final seguro.

Los estudios de evaluación del ciclo de vida demuestran que el coprocesamiento ofrece un rendimiento medioambiental superior al de los vertederos o la incineración. Entre sus muchas ventajas, según Geocycle:

- a) Destruye completamente los materiales de desecho a través de altas temperaturas, exceso de oxígeno y largo tiempo de residencia.
- b) Evita la formación de dioxinas y furanos debido al perfil de temperatura específico.
- c) No deja ningún residuo que deba ser vertido, ya que la ceniza reacciona con otros componentes para formar el producto final manufacturado.
- d) Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que los residuos se utilizan para sustituir los combustibles fósiles.

- e) Preserva los combustibles fósiles no renovables y los recursos naturales a medida que se recupera el valor energético y mineral de los materiales de desecho.

El coprocesamiento, según GTZ-Holcim, tiene las siguientes características durante el proceso de producción:

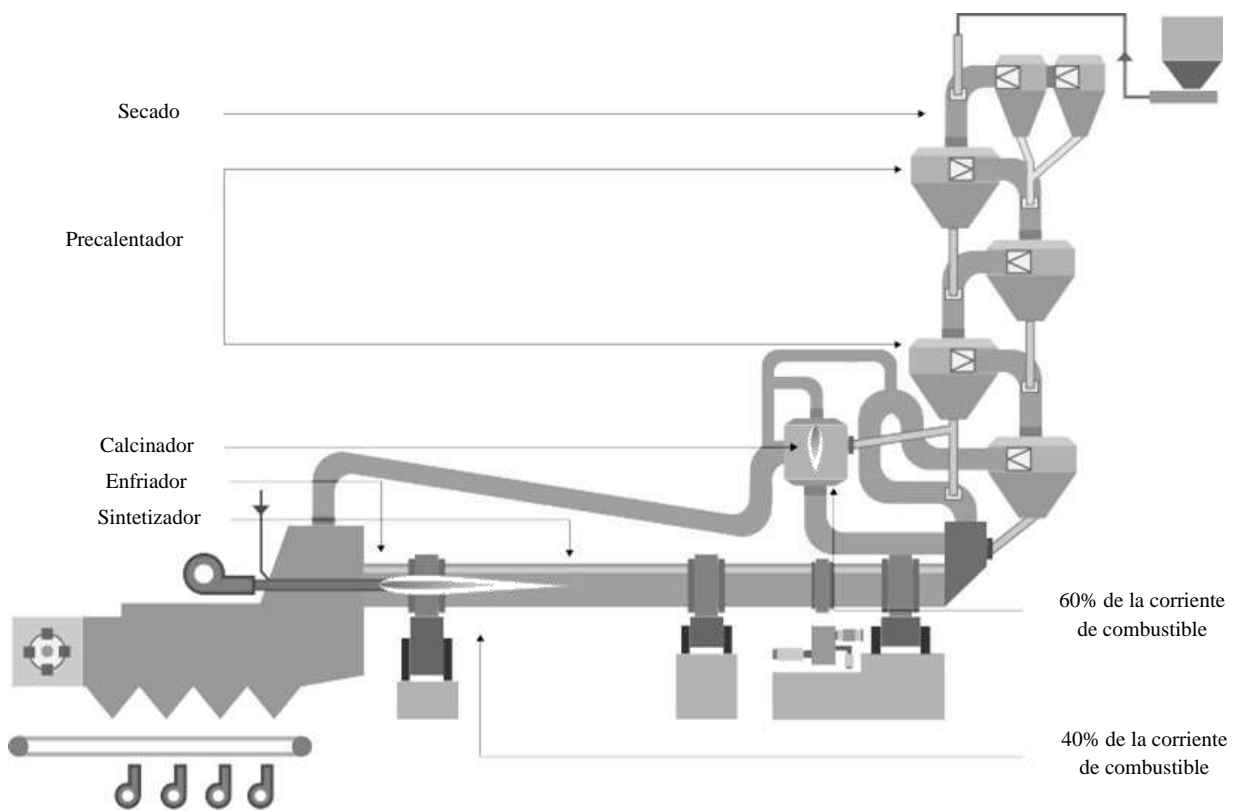
- a) Las condiciones alcalinas y el mezclado intensivo favorecen la absorción de los componentes volátiles de la fase gaseosa. Esta depuración interna del gas da como resultado emisiones bajas de componentes como SO<sub>2</sub> y HCl y, con excepción del mercurio y el talio, esto también aplica para la mayoría de los metales pesados
- b) Las reacciones del clinker a 1450°C permiten la incorporación de cenizas y, en especial, el enlace químico de los metales al Clinker.
- c) La sustitución directa del combustible primario por material de residuo de alto poder calorífico da como resultado una eficiencia mayor en la recuperación de energía en comparación con otras tecnologías de conversión de “residuos en energía”.

Los residuos y materias primas que se usarán en el coprocesamiento pueden incorporarse en distintos puntos del proceso de fabricación del clinker y a diferentes rangos de temperatura, ya que estos materiales serán usados como fuente de combustible o de materia prima de uso secundario. Entre los puntos más comunes para introducir la materia prima se tiene: Por el quemador principal en el extremo de salida del horno rotatorio.

- a) Por la chimenea interior de alimentación de la cámara de transición en el extremo de entrada del horno rotatorio (para combustible en grandes cantidades).
- b) Por quemadores secundarios al tubo ascendente.
- c) Por quemadores de precalcinación al precalcinador,

- d) Por chimenea interior de alimentación al precalcinador (para combustible en grandes cantidades).
- e) Por válvula de la zona media del horno rotatorio en caso de hornos largos de proceso húmedo o seco (para combustible en grandes cantidades).

En la Figura 2.8, se presenta un esquema del proceso de fabricación del clinker.



*Figura 2.8 Esquema del proceso de fabricación del Clinker*

Fuente: (Surya Gold Cement, 2020)

### ***I. Pretratamiento de metales pesados***

Un método de pretratamiento de residuos que tengan un alto contenido de metales pesados, ya siendo estos volátiles como el mercurio o no volátiles como el plomo y el cadmio. El método consiste en una planta para realizar tres rondas de lavado de los desechos para poder

extraer las sales de NaCl y KCl disueltas, para eliminar los metales pesados disueltos después del proceso lavado, son precipitados mediante un tanque de depósito químico, y la solución salina libre ya de estos metales pasa a través de una torre de precompresión mecánica de vapor en la que se cristaliza las sales y el agua condensada se recircula por el tanque de lavado, el lodo de los metales pesados es almacenado en un silo hasta que se elimina mediante incineración .

## ***II. Equipo usado en el coprocesamiento***

### ***A. Enfriador de clinker***

Después de la salida del horno rotatorio el clinker se trata con enfriadores de aire en contracorriente o en forma transversal a través del clinker, donde este aire caliente casi en su totalidad se aprovecha como aire secundario para la combustión en el horno. Este proceso influye en la composición mineralógica y la molturabilidad y en las características del cemento que con él se elabore (Silva, s.f.).

Entre los enfriadores de clinker más usados si tienen los siguientes:

- a) **Enfriador de tambor rotatorio:** Consiste en un tambor dispuesto a la salida del clinker del horno que es colocado debajo de este. Sus cuyas dimensiones varían con longitudes entre 20 y 25 m y con diámetros comprendidos entre 2 y 5 m, con pendientes de entre 4 y 7% normalmente en sentido contrario a la pendiente del horno; se apoyan en aros de rodadura que se accionan independientemente del horno. Sus revoluciones varían entre 0 y 8 vueltas por minuto. En aproximadamente el 70% de la longitud del enfriador hay unas paletas elevadoras o listones de material cerámico refractario o de acero resistente al desgaste, de manera tal que elevan el clinker y al caer lo ponen en



contacto con el aire de enfriamiento, logrando así aumentar el rendimiento del enfriador.

- b) Enfriadores planetarios: Está constituido por tubos dispuestos en la periferia del tubo de salida del clinker del horno y están instalados en el mismo cuerpo del mismo, situados en la periferia de la parte externa, en la zona más caliente; se mueven conjuntamente con el horno, sin tener accionamiento propio.

Algunas de las ventajas del uso del enfriamiento de clinker se tiene: El adecuado enfriamiento perfecciona las propiedades del cemento, el clinker caliente influye negativamente en la molienda del cemento, se aprovecha el contenido térmico del mismo disminuyendo costos de producción, el enfriamiento rápido influye notablemente en el comportamiento del óxido de magnesio y consecuentemente en la estabilidad del cemento fabricado con este clinker (Silva, s.f.).

#### *B. Horno rotatorio*

Es el equipo más utilizado en el coprocesamiento ya que por su sistema de funcionamiento que es un cilindro en unos rodillos para que gire en su propio eje y el uso de altas temperaturas hace que los residuos se incineren en un tiempo de alrededor de 30 a 90 minutos.

Aunque en este horno acepta distintos tipos de residuos que hayan sido tratados o no a la hora de ser coprocesados, pero al final es decisión sobre cuales desechos aceptar depende más que todo de la empresa que incinerará estos y también el valor agregado que le puedan dar como poder calorífico de los residuos orgánicos o valor en la parte mineral.

### *C. Precalcinador*

Es un sistema de precalentamiento de suspensión en el que, en adición de la llama del horno, se quema combustible adicional en la base del precalentador. Este sistema hace que la harina cruda se esparza y se suspenda en el flujo de aire, y asegura que el consumo de combustible y la descarbonatación ocurran en poco tiempo. En el precalcinador, la combustión del combustible se realiza al mismo tiempo que la reacción endotérmica del material en condiciones de turbulencia, las partículas finas de combustible flotan por un lado y se queman por el otro, haciendo que todo el horno casi se convierta en la zona de combustión. Por lo tanto, no se puede formar una llama visible, pero a una baja temperatura de 820-900°C estado de combustión sin llama. Existen dos tipos de precalcinadores: los llamados "aire-a través de" y "aire-separado".

- a) Aire-a través de: En este tipo de precalcinador, todo el aire de combustión pasa por el horno. La velocidad de los gases en la parte posterior del horno es un factor limitante en su producción, ya que, si su velocidad se encuentra por encima de una velocidad crítica, la alimentación de polvo se recoge y es expulsada de nuevo del horno. Por lo tanto, el diseño de paso de aire está limitado en su producción de la misma manera que un sistema ordinario de precalentamiento de suspensión. Además, al quemar menos combustible (para un determinado flujo de aire) en el quemador principal, la llama se diluye por un exceso de aire, y esto enfría la llama. Por lo tanto, estos dos factores ponen un límite de alrededor del 25% en la proporción de combustible que puede quemarse en el precalentador.

b) Aire-separado: En estos el aire de combustión adicional (conocido como aire terciario) para el calcinador es extraído desde el enfriador. Esto sólo puede hacerse fácilmente si se utiliza un enfriador de estilo parrilla. El diseño evita las limitaciones que sufre el aire, aunque el aire de combustión para el calcinador pasa por el horno, de modo que se evita la alta velocidad del gas y la dilución de la llama. La proporción de combustible que puede quemarse eficientemente en el calcinador aumenta hasta aproximadamente el 70% (para la mezcla de materia prima ordinaria). El grado de calcinación de la alimentación que entra en el horno se eleva alrededor del 90-95%, y esto define el límite de combustible del 70%, más adición de combustible pone en riesgo la formación de clinker en el precalentador, por lo cual esto debe evitarse a toda costa. Esta optimización de la eficiencia térmica permite que un horno relativamente pequeño produzca un gran rendimiento. El horno realiza únicamente el proceso de sinterización, para el cual la rodadura del horno rotatorio es indispensable

#### *D. Precalentador de harina cruda (ciclón)*

Utiliza el método de precalentamiento en suspensión para precalentar y descomponer parcialmente la materia prima para que se pueda utilizar en el horno rotatorio, y al mismo tiempo hace que la materia prima y el gas caliente fluyan por completo en el horno, mejorando así la eficiencia del intercambio de calor, logrando así el propósito de mejorar la eficiencia de la producción de todo el sistema del horno y reducir el consumo de calor de la cocción del clinker. Este tipo de precalentador aprovecha plenamente el calor del horno, para así poder reducir el consumo de energía en la quema de clinker, reducir el espacio de suelo del equipo de quema, aprovechar plenamente el calor del horno y la además llega a requerir un horno de menor longitud.

### III. Aceptación de residuos para coprocesamiento

Entre los residuos orgánicos e inorgánicos aceptados para el coprocesamiento según el anexo 5 de la guía GTZ se tiene: los lodos y residuos sólidos aceitosos, aceites hidráulicos y líquidos de frenos usados, aceite de motor, restos de separados agua/sustancias oleosas, residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización (FFDU) de pinturas y barniz, lodos del decapado de pinturas y barnices que contienen solventes halogenados, entre otros. También existen residuos que no pueden ser aptos para coprocesamiento ya que estos no cumplen con los criterios ambientales, de salud y seguridad, socioeconómicos y operativos, la Tabla 2.2 ofrece una vista general de las razones por la cual ciertos desechos no pueden ser aceptados.

Tabla 2.2 Lista de los residuos no adecuados para el coprocesamiento.

Tipos de residuos	Enriquecimiento de contaminantes en el Clinker	Valores de emisión	Salud y seguridad en el trabajo	Potencial del reciclaje	Confinamientos públicos como mejor opción	Impacto negativo por la operación del horno rotatorio
Residuos electrónicos	X	X		X		
Baterías completas	X	X		X		X
Residuos hospitalarios infecciosos y biológicamente activos			X			
Ácidos minerales y corrosivos		X	X			X
Explosivos	X		X			X
Asbestos			X		X	
Residuos radioactivos	X		X			
Residuos municipales no calificados	X	X		X		X

FUENTE: (GTZ-Holcim, 2006)

Existen justificaciones para no aceptar estos tipos de desechos, entre las cuales podemos mencionar:

- a) Residuos electrónicos: La composición promedio de estos desperdicios contiene, por un lado, sustancias nocivas para la salud y el ambiente, tales como cloro, níquel, mercurio, bifenilos policlorados y retardantes de flama brominados en grandes concentraciones que con frecuencia rebasan los límites fijados en los permisos.
- b) Baterías enteras: Estas pueden tener en su composición componentes nocivos para el medioambiente y la salud humana como lo son el plomo, cadmio, níquel, zinc, iones de litio, por lo que, si se llegaran a coprocesar, provocarían el aumento de la concentración de las sustancias peligrosas en el cemento y en las emisiones al aire libre.
- c) Residuos hospitalarios infecciosos y biológicamente activos: la principal razón por la que estos residuos no son aceptados para ser coprocesados es debido a que si no son separados, almacenados correctamente y tratados previamente (ya sea esterilizándolos), puede resultar en un riesgo biológico para los operadores que manipulen estos desechos.
- d) Ácidos minerales y corrosivos: Los componentes principales de estos ácidos como el azufre y el cloro impactan negativamente en la calidad del producto y además generan emisiones gaseosas no deseadas. También el ácido puede corroer las instalaciones de producción y ocasionar daño a los operarios.
- e) Explosivos: Algunos explosivos como la nitroglicerina, detonador de mecha, bengalas y municiones no son aceptados ya que estos pueden ocasionar explosiones no controladas en la parte del transporte, preprocesamiento, trituración, etc.

- f) **Asbesto:** Las fibras de asbesto tienen las propiedades de ser resistentes a la abrasión, ser inertes a soluciones acidas y alcalinas, y ser estable a temperaturas altas. También que al ser demasiado pequeñas las fibras, estas pueden ingresar al cuerpo de la persona y alojarse en el tejido pulmonar y en los peores casos ocasionar cáncer. Por lo que es mejor almacenarlos en rellenos sanitarios ya que puede ser desechado sin modificar su estructura y sin provocar emisiones al aire libre.
- g) **Residuos radiactivos:** Estos residuos no pueden ser aceptados para coprocesamiento ya que de por sí necesitan una reglamentación especial en base a convenios internacionales para su manejo, por lo cual, es necesario obtener permisos especiales para su tratamiento, además de que las plantas cementeras no están preparadas para manejar residuos radioactivos.
- h) **Residuos municipales no clasificados:** Ya que estos al ser una mezcla heterogénea (por ejemplo, basura de cocina, arena, envases) por veces no aporta la información necesaria para ser financieramente apto para coprocesarlo, por lo cual la mejor opción que queda es la separación y su posterior reciclaje.

#### **2.4 Tipos de residuos adecuados para la revalorización de residuos peligrosos**

Como se mencionó con anterioridad, el tratamiento de residuos peligrosos se realiza mediante métodos físicos, químicos y/o biológicos e implica una serie de procesos unitarios, que dependen de la naturaleza y las características del residuo, la naturaleza del producto final deseado y del tipo y el grado de contaminación.

En el artículo Recuperación, reciclaje y reutilización de 1986; Noll, Haas y Patterson, presentan las Tablas 2.3 y 2.4, donde resumen las posibles estrategias de valorización de diferentes clases de residuos.

*Tabla 2.3 Resumen del potencial de valorización de recursos y energía de los desechos peligrosos (orgánicos)*

Tipo de residuo	Valorización directa o reutilización	Materia prima para uso secundario	Valorización energética	Usado en control de contaminantes	Bajo potencial de valorización
Líquidos concentrados					
201-Limpio, halogenado	X	X	X		
202-Limpio, no halogenado	X	X	X		
203-Limpio, mezcla de solventes	X	X	X		
204-Sucio, halogenado	X	X	X		
205-Sucio, no halogenado	X	X	X		
206-Sucio, mezcla de solventes	X	X	X		
Soluciones acuosas diluidas					X
211-Realmente oxidada, halogenada					X
212-Realmente oxidada, no halogenada					X
213-Difícil de oxidar, halogenada					X
214-Difícil de oxidar, no halogenada					X
Sólidos orgánicos					
221-Sales y otros sólidos	X	X			
222-Alquitranes y residuos			X		
223-Lodos	X		X		
Gases/vapores orgánicos					
232-Combustible			X		
Residuos especiales					
311-Agentes oxidantes fuertes					X
312-Explosivos					X
313-Residuos biológicos					X

NOTA: Números de acuerdo con Clasificación Industrial Estándar (SIC, por sus siglas en inglés).

FUENTE: (Noll, Haas, & Patterson, 1986)

Entre los residuos inorgánicos de la Tabla 8 encontramos algunos residuos con alto potencial de valorización como es el caso de las soluciones alcalinas con compuestos metálicos, estos provienen principalmente de la fabricación de hierro y acero, los cuales pueden valorizarse de forma directa, utilizarse como materia prima de uso secundario o para control de contaminantes.

*Tabla 2.4 Resumen del potencial de valorización de recursos y energía de los desechos peligrosos (inorgánicos)*

Tipo de residuo	Valorización directa o reutilización	Materia prima para uso secundario	Valorización energética	Usado en control de contaminantes	Bajo potencial de valorización
101 Solución acida - no contaminada	X	X		X	
102 Solución acida - con metales					
Metales pesados (excepto Cr)	X	X			
Cromo	X				
Metales nobles	X				
Licor de encurtidos	X	X		X	
103 Solución acida - con orgánicos					
Emulsión orgánica		X	X		
Disolventes orgánicos	X	X			
104 Lodos ácidos					
Sólidos inertes					X
Dolidos con metales	X				
Solidos orgánicos					X
105 Gases ácidos				X	
111 Solución alcalina - con metales	X	X		X	
112 Solución alcalina con orgánicos	X	X	X		
113 Solución con cianuro					X
114 Solución limpiadora					X
115 Lodos alcalinos					
Solidos inertes					X
Solidos con metales	X				
Solidos orgánicos					X
121 Solución salina					X
122 Sólidos					X
123 Metales					
Metales pesados	X				
Metales alcalinos					X
Metales volátiles	X	X			
Metales no volátiles					
Componentes fosfosulfurado	X				
Asbestos					X

NOTA: Números de acuerdo con Clasificación Industrial Estándar (SIC, por sus siglas en ingles).

FUENTE: (Noll, Haas, & Patterson, 1986)



De forma similar, los residuos orgánicos como los líquidos concentrados tienen un alto potencial de valorización, ya que se puede usar tanto para la valorización directa, materia prima para uso secundario o valorización energética.

También puede observarse en ambas tablas, que existen cierto tipo de residuos que poseen un bajo potencial de valorización y para los que se deben buscar otras alternativas como el coprocesamiento, incineración, confinamiento o disposición final. Este es el caso de las soluciones con cianuro resultantes del chapado de piezas metálicas, soluciones o los residuos especiales como los agentes oxidantes fuertes, los explosivos y los residuos biológicos.

## **CAPÍTULO 3. GENERALIDADES DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL**

La evaluación del impacto ambiental (EIA) es una herramienta diseñada para identificar y predecir el impacto de un proyecto en el entorno físico, en la salud y el bienestar del hombre, para interpretar y comunicar información sobre el impacto, para analizar alternativas de sitio y de proceso y para proporcionar soluciones para tamizar o reducir/mitigar las consecuencias negativas en el hombre y el medio ambiente.

La EIA siempre es necesaria para cualquier proyecto industrial de importancia y es un medio de evitar perturbaciones ambientales que siempre son mucho más costosas de corregir que de prevenir. Por lo tanto, las cuestiones ambientales deben ser abordadas tan pronto como sea posible durante la planificación del proyecto.

### **3.1 Antecedentes de la evaluación del impacto ambiental**

Conscientes de esta necesidad, numerosos países han aplicado los reglamentos de la EIA y por lo general, también los organismos internacionales prestan su asistencia a cualquier proyecto industrial de importancia que aplique una EIA (Sánchez L. E., 2008).

Es importante mencionar que muy pocos proyectos se han considerado no viables simplemente por el costo de la lucha contra la contaminación, y que el control ambiental moderno, en una nueva planta, es menos del 3% de la inversión inicial.

La sistematización de la EIA como actividad obligatoria, a realizarse antes de la toma de determinadas decisiones que puedan significar consecuencias ambientales negativas, ocurrió

en los Estados Unidos a partir de la ley de política nacional del medio ambiente de dicho país, la National Environmental Policy Act, (NEPA).

Esta ley fue aprobada por el congreso en diciembre de 1969 y entró en vigor el día 1° de enero de 1970, requiriendo de “todas las agencias del gobierno federal”:

- a) Utilizar un abordaje sistemático e interdisciplinario que garantizará el uso integrado de las ciencias naturales y sociales y de las artes de la planificación ambiental en las tomas de decisión que puedan tener un impacto sobre el ambiente humano.
- b) Identificar y desarrollar métodos y procedimientos, en consulta con el Consejo de Calidad Ambiental establecido por el Título II de esta ley, que garantizarán que los valores ambientales que en el presente no han sido cuantificados serán tomados adecuadamente en consideración en la toma de decisiones, junto con consideraciones técnicas y económicas.
- c) Incluir en cualquier recomendación o informe sobre propuestas de legislación y otras importantes acciones federales que afecten significativamente la calidad del ambiente, una declaración detallada del funcionario responsable sobre:
  1. El impacto de la acción propuesta.
  2. Los efectos ambientales adversos que no pueden evitarse, en caso de que la propuesta se implemente.
  3. Alternativas a la acción propuesta.
  4. La relación entre los usos locales y de corto plazo del ambiente humano y el mantenimiento y mejora de la productividad a largo plazo.
  5. Cualquier compromiso irreversible e irrecuperable de recursos a involucrar si la acción propuesta se llegara a implementar.

En El Salvador, el EIA está exigido en el Art. 18 de la Ley de Medio Ambiente, y debe incluir el conjunto de acciones que aseguran que las actividades, obras o proyectos que puedan tener un impacto negativo en el ambiente o en la calidad de vida de la población, se sometan desde la fase de pre inversión a los procedimientos que identifiquen y cuantifiquen dichos impactos y se recomienden las medidas que los prevengan, atenúen, compensen o potencien, según sea el caso, seleccionando la alternativa que mejor garantice la protección del ambiente y la sostenibilidad de la inversión (MARN, 2020).

Entre las dependencias del MARN que intervienen en el proceso de EIA se encuentran:

- a) La Dirección General de Evaluación y Cumplimiento, siendo la responsable de la administración del proceso, a través de la Gerencia de Evaluación Ambiental.
- b) La Dirección General de Atención Ciudadana y Municipal, específicamente la Gerencia de Articulación Territorial y Municipal, encargada de gestionar el proceso relacionado con la Consulta Pública del Estudio de Impacto Ambiental (EsIA).
- c) La Dirección General de Saneamiento Básico, con su Gerencia de Vertidos y la Unidad de Desechos Sólidos y Peligrosos, para las actividades, obras o proyectos relacionados a estos temas específicos.

### **3.2 Principales características de la EIA**

El objetivo de la evaluación de impacto ambiental es considerar los impactos ambientales antes de tomar cualquier decisión que pueda implicar una significativa degradación de la calidad del medio ambiente. Para cumplir ese papel, la EIA está organizada en una serie de actividades secuenciales, seguidas de manera lógica. A ese conjunto de actividades y procedimientos se le da el nombre de “Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental”.

En general, dicho proceso es objeto de reglamentación, que define detalladamente los procedimientos a seguir, los tipos de actividades sujetos a la elaboración previa de un estudio de impacto ambiental, el contenido mínimo de dicho estudio y las modalidades de consulta pública, entre otros asuntos (Sánchez L. E., 2008).

Entre las principales características del proceso de EIA, se tiene que:

- a) Es un conjunto estructurado de procedimientos: los procedimientos están orgánicamente vinculados entre sí y deben ser concebidos a fin de que cumplan con los objetivos de la evaluación de impacto ambiental.
- b) Está regido por una ley o reglamentación específica: los principales componentes del proceso están previstos en una ley u otra figura jurídica que tenga instituida la EIA en una determinada jurisdicción; en el caso de las organizaciones (como un banco multilateral o una empresa que adopte voluntariamente la EIA), el proceso se rige por disposiciones internas que emanan de la superioridad.
- c) Está documentado: esta característica tiene una doble connotación; por un lado, los requisitos a cumplir están previamente establecidos; por otro, en cada caso, debe demostrarse el cumplimiento de dichos requisitos con ayuda de registros documentales.
- d) Incluye diversos participantes: en todos los casos, los involucrados en el proceso de EIA son varios (el proponente de una acción, la autoridad responsable, el consultor, el público afectado, los grupos de interés, etc.).
- e) Está dedicado a analizar la viabilidad ambiental de una propuesta: este objetivo mayor de la EIA es lo que guía todo el proceso, es su finalidad; no se establece una serie de requisitos y de procedimientos en el vacío, sino para alcanzar determinado propósito,

perspectiva que no se puede perder al analizar el proceso de EIA, ya que los procedimientos o exigencias que no encajen con esa finalidad no tienen razón de ser y son mera formalidad burocrática.

En el país el proceso EIA se realiza en cumplimiento del Artículo 19 del Reglamento General de la Ley del Medio Ambiente, que comprende cuatro etapas:

A. Planificación de la actividad, la obra o el proyecto, que debe incluir:

- a) Información básica del proyecto a través del Formulario Ambiental
- b) Términos de Referencia
- c) Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental
- d) Consulta Pública del Estudio de Impacto Ambiental
- e) Análisis y evaluación del Estudio de Impacto Ambiental
- f) Realización de inspecciones ambientales, periódicas o aleatorias
- g) Dictamen técnico sobre el Estudio de Impacto Ambiental
- h) Resolución y presentación de la Fianza de Cumplimiento Ambiental
- i) Emisión del Permiso Ambiental.

B. La construcción de la actividad, la obra o el proyecto, comprendiendo la preparación del sitio, edificación de obra civil, equipamiento y prueba

C. El funcionamiento de la actividad, obra o proyecto

D. El cierre de operaciones y rehabilitación.

### **3.3 Etapas del proceso EIA**

Cada país, en base a sus leyes y normas jurídicas, así como en su estructura institucional y sus procedimientos administrativos, adapta el proceso de EIA a sus necesidades de llevar a

cabo ciertas tareas. Los componentes básicos del proceso de EIA, que corresponden a las tareas a realizar, según Sánchez L. E. son:

### **I. Presentación de la propuesta**

Es cuando una determinada iniciativa, como un proyecto o un plan, programa o política (PPP), se presenta para la aprobación o análisis de una instancia de toma de decisión, en el marco de una organización que posea un mecanismo institucionalizado de decisión. Esta organización puede ser una empresa privada, un organismo financiero, una agencia de desarrollo, o incluso un organismo gubernamental (Sánchez L. E., 2006).

Normalmente, se debe describir la iniciativa en sus líneas generales, informando la localización de un proyecto o el alcance de un PPP. Muchas iniciativas tienen un potencial bajísimo de causar impactos ambientales importantes, mientras que otras, de manera irrefutable, serán capaces de causar profundas y duraderas modificaciones. Como regla general, la evaluación previa de los impactos ambientales sólo se realizará para las iniciativas que tengan el potencial de causar impactos significativos.

### **II. Tamizado**

Es seleccionar, entre las innumerables acciones humanas, aquellas que tengan potencialidad de causar alteraciones ambientales significativas. Debido al conocimiento acumulado sobre el impacto de las acciones humanas, se sabe de muchos tipos de acciones que realmente han causado impactos significativos, mientras que otras causan impactos irrelevantes o tienen medidas ampliamente conocidas de control de los impactos.

No obstante, hay un campo intermedio en el cual no son claras las consecuencias que puede generar determinada acción, casos en que es necesario un estudio simplificado para encuadrarla en una de las categorías.

El tamizado da como resultado un encuadramiento del proyecto, normalmente en una de estas tres categorías:

- a) Son necesarios estudios más profundos;
- b) No son necesarios estudios más profundos;
- c) Hay dudas acerca de la potencialidad de causar impactos significativos o sobre las medidas de control.

Los criterios básicos de encuadramiento suelen ser:

- i.** Listas positivas: son listas de proyectos para los cuales es obligatoria la realización de un estudio detallado.
- ii.** Listas negativas: son listas de exclusión, que comprenden proyectos cuyos impactos son sabidamente poco significativos o bien proyectos de los cuales se sabe de la eficacia de las medidas, técnicas o gerenciales, para mitigar los impactos negativos.
- iii.** Criterios de corte: aplicados tanto para listas positivas como para listas negativas, basados generalmente en la envergadura del proyecto.
- iv.** Localización del proyecto: en zonas consideradas sensibles, se puede exigir la realización de estudios completos independientemente de la envergadura o del tipo de proyecto.



- v. Recursos ambientales potencialmente afectados: para proyectos que afecten determinados tipos de ambiente que se quiera proteger (como cavernas, zonas húmedas de importancia internacional, etc.).

### **III. Focalización del estudio de impacto ambiental**

En los casos en que se hace necesaria la realización del EsIA, antes de comenzarlos es imprescindible establecer su focalización, o sea, el alcance y profundidad de los estudios a realizarse. Aunque el contenido genérico de un EsIA esté definido de antemano por la propia reglamentación, dichas normas son generales, aplicándose a todos los estudios; por lo tanto, no pueden ser normas específicas ni normas aplicables a un caso particular, dado que la reglamentación debe prever todas las situaciones posibles.

En realidad, en función de los impactos que pueden sobrevenir con cada proyecto debería definirse un plan de trabajo para la realización de estudios que, una vez concluidos, mostrarán cómo se manifestaron, su magnitud o intensidad y los medios disponibles para mitigarlos o compensarlos.

### **IV. Elaboración del estudio de impacto ambiental**

Es la actividad central del proceso de evaluación de impacto ambiental, la que normalmente consume más tiempo y recursos y sienta las bases para el análisis de la viabilidad ambiental del proyecto.

El estudio lo debe preparar un equipo compuesto por profesionales de diferentes áreas, cuyo objetivo será determinar la extensión e intensidad de los impactos ambientales que podrá causar y, si es necesario, proponer modificaciones al proyecto, de manera de reducir o, dentro

de lo posible, eliminar los impactos negativos. Como los informes que describen los resultados de dichos estudios suelen ser muy técnicos, es usual preparar un resumen escrito en lenguaje simplificado y destinado a comunicar las principales características del proyecto y sus impactos a todos los interesados.

## **V. Análisis técnico del estudio de impacto ambiental**

Tiene como finalidad verificar si el estudio concuerda con los términos de referencia y con la reglamentación o los procedimientos aplicables. Se busca también verificar si el estudio describe adecuadamente el proyecto propuesto, si analiza debidamente los impactos y si propone medidas mitigadoras capaces de atenuar suficientemente los impactos negativos. El análisis lo efectúa no sólo un equipo multidisciplinario, sino que también puede ser interinstitucional, o sea, se pueden consultar diferentes organismos especializados de la administración, como el encargado del patrimonio cultural, o el responsable de la utilización de las aguas de una cuenca hidrográfica.

Normalmente, los analistas se preocupan más con los aspectos técnicos de los estudios, como el grado de detalle del diagnóstico ambiental, los métodos utilizados para la previsión de la magnitud de los impactos y la adecuación de las medidas mitigadoras propuestas. Las manifestaciones expresadas en la consulta pública pueden ser tenidas en cuenta y eventualmente incorporadas a los fines del análisis de los estudios.

## **VI. Consulta pública**

Desde su origen, en la legislación moderna, el proceso de EIA comprende mecanismos formales de consulta a los interesados, incluyendo los directamente afectados por la decisión,

pero no se limita a éstos. Hay diferentes procedimientos de consulta, de los cuales la audiencia pública es uno de los más conocidos.

También hay diferentes momentos en el proceso de EIA en los cuales se puede proceder a la consulta, como la preparación de los términos de referencia, la etapa que lleva a la decisión sobre la necesidad de realización de un estudio de impacto ambiental, o incluso durante la realización de ese estudio. Sin embargo, una vez concluido, dicha consulta es más típica y necesaria, ya que sólo en ese momento se contará con el cuadro más completo posible sobre las implicaciones de la decisión a tomar.

## **VII. Decisión**

Los modelos decisorios en el proceso de EIA son muy variados y están más vinculados a la tradición política de cada jurisdicción que a las características intrínsecas de la evaluación de impacto ambiental. En líneas generales, la decisión final puede estar en manos de:

- a) La autoridad ambiental
- b) La autoridad del área tutelar a la cual se subordina el proyecto, muchas veces conocida como órgano competente (las decisiones sobre un proyecto forestal, por ejemplo, le corresponden al ministerio responsable de ese sector)
- c) Al gobierno (por medio de un consejo de ministros o del jefe de gobierno).

Está también el modelo de decisión colegiada, mediante un consejo con participación de la sociedad civil –muy usado en Brasil- en que esos órganos colegiados están subordinados a la autoridad ambiental. Son posibles tres tipos de decisión:

1. No autorizar el proyecto
2. Aprobarlo incondicionalmente

### 3. Aprobarlo con condiciones

Además, existe la posibilidad de retornar a etapas anteriores, solicitando modificaciones o la complementación de los estudios presentados.

## **VIII. Monitoreo y gestión ambiental**

Luego de una decisión positiva, la implementación del proyecto debe estar acompañada por la puesta en práctica de todas las medidas tendientes a disminuir, eliminar o compensar los impactos negativos, o a potenciar los positivos. Lo mismo se debe observar durante las etapas de funcionamiento y de desactivación y cierre de la obra o actividad. La gestión ambiental, en el sentido aquí empleado, corresponde a todas las actividades que le siguen a la planificación ambiental y que tienden a asegurar la implementación satisfactoria del plan. El monitoreo es una parte esencial de las actividades de gestión ambiental y, entre otras funciones, debe permitir confirmar o no las previsiones hechas en el estudio de impacto ambiental, constatar si el proyecto cumple con los requisitos aplicables (exigencias legales, condiciones de la licencia ambiental y otros compromisos) y, por consiguiente, alertar acerca de la necesidad de ajustes y correcciones.

## **IX. Seguimiento**

El seguimiento es muy importante ya que implica que se esté aplicando correctamente las medidas propuestas y su debido cumplimiento por parte del organismo que realizará el proyecto. El seguimiento agrupa el conjunto de actividades que le siguen a la decisión de autorizar la implantación del proyecto. Estas actividades incluyen fiscalización, supervisión y/o auditoría, observándose que el monitoreo es también esencial para esta etapa.

La función de la supervisión es primariamente la de asegurar que las condiciones establecidas en la autorización se cumplan de manera efectiva, la supervisión ambiental la realiza el encargado del proyecto, en tanto que la fiscalización es una función de los agentes gubernamentales; la auditoría, entre tanto, puede tener carácter público o privado.

La Figura 3.1 muestra un diagrama del general del proceso de evaluación de impacto ambiental.

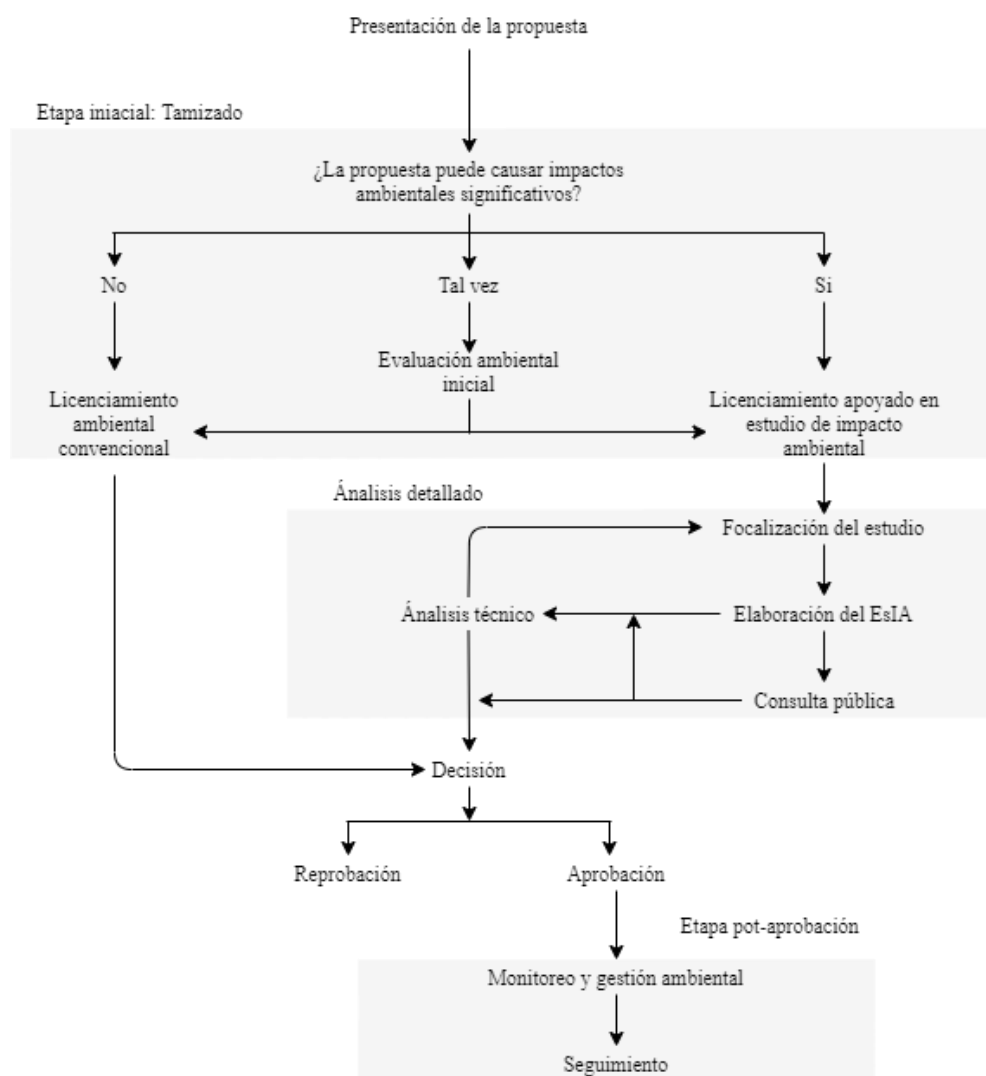


Figura 3.1 Proceso de evaluación de impacto ambiental

FUENTE: (Sánchez L. E., 2006)

### **3.4 Tipificación de impactos ambientales según el atributo indicado**

Los impactos ambientales se pueden tipificar según las siguientes características o atributos: signo, intensidad (IN), extensión (EX), momento (MO), capacidad de recuperación (CR), persistencia (PE), efecto (EF), interrelación de impactos (II) y, periodicidad (PR) (Encinas y Gómez de Balugera, 2011).

#### **I. Por el signo**

También llamado carácter. El signo es carácter beneficioso o perjudicial que una acción puede ejercer sobre un factor ambiental determinado. En función del carácter o del signo, un impacto puede ser:

- a) Positivo o beneficioso: Aquél cuyo efecto aumenta la calidad ambiental del factor, es decir, en el momento en que se valora el impacto la calidad ambiental del factor después de introducir la acción es mayor que la calidad ambiental del factor tal y como hubiera evolucionado sin la acción.
- b) Negativo o perjudicial: Aquél cuyo efecto disminuye la calidad ambiental del factor considerado, es decir, en el momento en que se valora el impacto la calidad ambiental del factor después de introducir la acción es menor que la calidad ambiental del factor tal y como hubiera evolucionado sin la acción.

#### **II. Por la intensidad (IN)**

La intensidad, también llamada grado de incidencia, es otra de las características del impacto ambiental que se refiere al grado de destrucción/mejora del factor o, lo que es lo mismo, a la cantidad de calidad que pierde/gana un factor en el caso de sufrir un impacto negativo/positivo. Según su intensidad, un impacto negativo puede ser:

- a) Mínimo o bajo: Aquél cuyo efecto produce una destrucción mínima del factor, es decir, la pérdida de calidad ambiental es mínima.
- b) Medio: Aquél cuyo efecto produce una destrucción media del factor, es decir, la pérdida de calidad ambiental es media.
- c) Alto: Aquél cuyo efecto produce una destrucción alta del factor, es decir, la pérdida de calidad ambiental es elevada.
- d) Notable o muy alto: Aquél cuyo efecto produce una destrucción casi total del factor, es decir, la pérdida de calidad ambiental es muy alta.
- e) Total: Aquél cuyo efecto produce una destrucción total del factor, es decir, la pérdida de calidad ambiental es total.

### III. Por la extensión (EX)

Es el área de influencia del impacto en relación con el total del entorno considerado, es decir, al porcentaje de área, respecto al entorno, en que se manifiesta el efecto. Según su extensión, un impacto negativo puede ser:

- a) Puntual: Aquél cuyo efecto está muy localizado.
- b) Parcial: Aquél que afecta a una zona apreciable del entorno.
- c) Extremo: Aquél que afecta a gran parte del entorno.
- d) Total: Aquél que afecta de forma general a todo el entorno.

### IV. Por el momento (MO)

Al tiempo que transcurre desde que comienza la acción ( $t_0$ ) hasta que aparece el efecto ( $t_j$ ). En función del momento, los impactos pueden ser:

- a) Inmediato: Aquél cuyo efecto aparece en el mismo momento en que se inicia la acción, es decir, cuando se cumple  $t_0 = t_j$ .
- b) Latente: Aquél cuyo efecto aparece al cabo de cierto tiempo desde el inicio de la acción. Los impactos latentes pueden ser:
  - 1. A corto plazo: si  $t_j - t_0 < 1$  año.
  - 2. A medio plazo: si  $1 < t_j - t_0 < 5$  años.
  - 3. A largo plazo: si  $t_j - t_0 > 5$  años.

V. Por la capacidad de recuperación (CR)

La capacidad de reconstrucción del factor afectado, es decir, a la posibilidad de retornar a las condiciones previas a la acción, ya sea de forma natural o por medio de la acción humana.

Según la capacidad de recuperación, un impacto puede ser:

- a) Reversible: Aquél cuyo efecto puede ser asimilado de forma natural por el entorno, es decir, al finalizar la acción ( $t_f$ ), el factor recupera por sí mismo la calidad ambiental previa a la acción. Si la recuperación es inmediata tras el cese de la actividad, el impacto es reversible fugaz.
- b) Irreversible: Aquél cuyo efecto no puede ser asimilado de forma natural por el entorno, es decir, al finalizar la acción ( $t_f$ ) no es posible retornar a la situación previa a la acción por medios naturales. Se debe recurrir entonces a los medios no naturales, es decir, a las medidas correctoras. Según su capacidad de recuperación mediante el uso de medidas correctoras, un impacto puede ser:
  - 1. Recuperable: Aquél cuyo efecto puede eliminarse totalmente.
  - 2. Mitigable: Aquél cuyo efecto puede paliarse o mitigarse de manera importante.



3. Irrecuperable: Aquél cuyo efecto no se puede eliminar ni mitigar.

#### VI. Por la persistencia (PE)

Es el tiempo que permanece el efecto desde que aparece (tj). En definitiva, es lo que dura el efecto. Según la persistencia, un impacto puede ser:

- a) Temporal: Aquél cuyo efecto no permanece en el tiempo. Este a su vez puede ser:
  1. Fugaz: si dura menos de 1 año.
  2. Temporal: si dura entre 1 y 3 años.
  3. Pertinaz: si dura entre 4 y 10 años.
- b) Permanente: Aquél cuyo efecto permanece en el tiempo. A efectos prácticos se acepta como permanente, un impacto ambiental con una duración superior a 10 años.

#### VII. Por el efecto (EF)

Se refiere a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción. Según el efecto, un impacto puede ser:

- a) Directo o primario: Aquél cuyo efecto es consecuencia directa de la acción.
- b) Indirecto o secundario: Aquél cuyo efecto no es consecuencia directa de una acción, sino que tiene lugar a partir de un impacto primario, actuando el efecto primario como una acción de segundo orden.

#### VIII. Por la interrelación de impactos (II)

La posibilidad de adición de impactos procedentes de distintas acciones, es decir, a la forma que tienen los impactos de sumarse. Por lo tanto, según la interrelación entre acciones y efectos, un impacto puede ser:

- a) Simple: Cuando la acción afecta a un solo factor ambiental, es decir, no hay posibilidad de sumar los impactos ambientales.
- b) Acumulativo: Aquél cuyo efecto aumenta progresivamente debido a la acción conjunta de varias acciones similares. También se considera acumulativo cuando la acción se mantiene en el tiempo y el efecto aumenta progresivamente.
- c) Sinérgico: Aquél que se produce cuando el efecto conjunto de varias acciones supone una alteración mayor que el efecto suma de las alteraciones de las acciones por separado. Al efecto contrario se llama debilitamiento.

#### IX. Por la periodicidad (PR)

Es la regularidad de manifestación del efecto. Según la periodicidad un impacto ambiental puede ser:

- a) Continuo: Aquél que mientras dura la acción tiene un efecto prolongado en el tiempo, aunque pueda ser temporal.
- b) Discontinuo: Aquél que mientras dura la acción tiene un efecto que aparece y desaparece a lo largo del tiempo.

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS MÁS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL**

Existen muchos tipos de métodos que han sido desarrollados y usados en el proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA) de diversos proyectos, pero ningún método por sí solo puede ser usado para satisfacer la variedad y tipo de actividades que intervienen en un estudio de impacto, por tanto, la clave está en seleccionar adecuadamente los métodos más apropiados para las necesidades específicas de cada estudio de impacto a evaluar. La variedad de los métodos constituye una oportunidad así también para enriquecer una EIA ya que el uso de uno u otro permite abordar alguna de las fases requeridas en el proceso, y es precisamente la combinación de estas herramientas la que permite completar dicho proceso.

Los métodos para la EIA se pueden clasificar en: métodos basados en listas, redes de interacciones, matrices de interacciones, sistemas cartográficos, métodos de indicadores, cuantitativos, analices multicriterio, métodos de Ad-Hoc, entre otros (Awad, 2015).

En general las fases de los métodos consisten en:

1. Análisis de aspectos teóricos del proyecto.
2. Diagnóstico del medio ambiente
3. Predicción e identificación de impactos
4. Interpretación y contrastación de impactos
5. Valoración de impactos

### **4.1 Métodos basados en listas**

Las listas son métodos descriptivos y útiles para la etapa de identificación de impactos ambientales. Son formatos diseñados con una serie de requisitos o preguntas que se deben ir

verificando para cada proyecto en particular. Dentro de estas metodologías se destacan las listas de chequeo o verificación, listas comparativas y cuestionarios.

#### **4.1.1 Las listas de chequeo o verificación**

Son instrumentos muy prácticos y fáciles de usar que generalmente consisten en listados estándar por medio del cual se pretende identificar los diferentes impactos ambientales asociados a un tipo y etapa de proyecto en particular. Son útiles para una primera aproximación a la identificación de los impactos, para organizar la información o para verificar que ningún potencial impacto de un proyecto específico, sea pasado por alto; principalmente si el equipo no tiene experiencia previa con el tipo de proyecto analizado (Sánchez L. E., 2006).

Una lista de chequeo debería contener ítems que permitan identificar impactos sobre: suelo (usos del suelo, rasgos físicos únicos, etc.), agua (calidad, alteración de caudales, etc.), atmósfera (calidad del aire, variación de temperatura, etc.), flora (especies en peligro, deforestación, etc.), fauna (especies raras, especies en peligro, etc.), recursos (paisajes naturales, pantanos, etc.), recreación (pérdida de pesca, camping y picnics, etc.), culturales (afectación de comunidades indígenas, cambios de costumbres, etc.), y en general sobre todos los elementos del ambiente que sean de interés especial (Espinoza, 2001).

En algunas ocasiones, los listados enumeran los impactos más comunes asociados a ciertos tipos de proyectos, como los incluidos en el Libro de Consulta para Evaluación Ambiental del Banco Mundial y sus actualizaciones, otras listas indican los elementos o factores ambientales potencialmente afectados por determinados tipos de proyectos, como las indicadas por Fernández-Vítora, que contiene alrededor de 328 ítems o características que pueden verse afectados por un proyecto o que pueden representar una forma de restricción al mismo (Sánchez L. E., 2006).

Lohani y otros, consideran que las listas de verificación se tratan de una versión más formal de los enfoques ad hoc en la que se enumeran las áreas específicas de impacto y se dan instrucciones para la identificación y evaluación del impacto. Estas listas son una versión sofisticada que suele incluir un escalamiento de los impactos enumerados que se clasifican por orden de magnitud o gravedad y un escalamiento de ponderación, en las que se ponderan numerosos parámetros ambientales (utilizando el juicio de expertos), y se calcula entonces un índice que sirve de medida para comparar las alternativas del proyecto (Lohani, & otros, 1997).

Existen cuatro tipos de listas de chequeo o verificación, entre ellas:

- a) Listas de verificación simples
- b) Listas de verificación descriptiva
- c) Listas de verificación escalonadas
- d) Listas de verificación ponderadas

Las listas de verificación simples son listados de factores o variables ambientales con impacto o listas de características de la acción con impacto, o ambos elementos; sin pautas en cuanto a cómo se realizará la interpretación o la medición de los parámetros ambientales o las necesidades específicas de datos o la predicción y evaluación de los impactos.

En cambio, las listas de verificación descriptivas dan orientaciones para una evaluación de los parámetros ambientales impactados e incluyen una lista de factores ambientales junto con información sobre la medición, la predicción y la evaluación del impacto. Estas pueden requerir sólo un conocimiento generalizado de los parámetros ambientales que probablemente se vean afectados, además de acceso a una base de información sobre el proceso.

Por otro lado, las que resultan atractivas para el análisis de toma de decisiones son las listas de verificación de escalamiento y ponderación. Estas listas de verificación son muy útiles para la identificación de los impactos, ya que además de identificar, son capaces de proporcionar cierto grado de interpretación y evaluación. Sin embargo, son subjetivos y, por lo tanto, plantean el riesgo de dar igual importancia a cada impacto. Tampoco logran prever las interacciones entre los impactos y es probable que se requieran más conocimientos técnicos para su preparación.

#### **4.1.2 Cuestionarios.**

Los cuestionarios generalmente consisten en un conjunto de preguntas sistemáticas sobre categorías genéricas de factores ambientales, donde hay tres respuestas dependiendo de cuánto se sabe de un impacto específico y de esta forma estimar hasta qué punto se cuenta con información sobre los impactos: Sí, No y No Sabe. Por medio de la incorporación y agrupación de respuestas se puede tener una idea cualitativa de la importancia relativa de un cierto impacto, tanto negativo como positivo. El análisis ambiental de un proyecto, en base a cuestionarios, consiste entonces en un procedimiento sistemático de preguntas y respuestas con la adición de información cuantitativa y cualitativa, si es necesario (Espinoza, 2001).

Algunas de las razones importantes para utilizar los métodos basados en listas, según Lohani y otros:

- a) Son útiles para resumir la información a fin de hacerla accesible a especialistas de otras áreas, o a los encargados de tomar decisiones que pueden tener un limitado conocimiento técnico.
- b) La ampliación de las listas de verificación proporciona un nivel de análisis preliminar

- c) La ponderación es un mecanismo para incorporar información sobre las funciones de los ecosistemas.

Sin embargo, según Westman, algunos de los problemas con las listas cuando se utilizan como método de evaluación de los impactos son:

- a) Pueden llegar a ser demasiado generales o incompletas;
- b) No son capaces de ilustrar las interacciones entre los efectos;
- c) El número de categorías que deben examinarse puede ser inmenso, lo que distrae de los impactos más significativos;
- d) La identificación de los efectos es cualitativa y subjetiva.

#### **4.2 Matrices de interacciones (causa/efecto)**

Dentro de ese grupo se encuentran todos los métodos que permiten la representación de los impactos a través de matrices de doble entrada con diferentes escalas y criterios de valoración. A continuación, se explican algunas de ellas como las matrices de Leopold, referencial de impactos ambientales, de Análisis por dimensiones, RIAM, CNYRPAB y M.O.P.U.

##### **4.2.1 Matriz de Leopold**

Es un cuadro de doble entrada en el que se disponen como filas los factores ambientales y como columnas las acciones proyectadas y causantes de los posibles impactos.

Consiste en señalar todas las interacciones posibles, entre las acciones y los factores, para luego establecer en una escala que varía de uno a 10 para la magnitud y la importancia de cada impacto, identificando si el mismo es positivo o negativo.

Para la utilización de la Matriz de Leopold, el primer paso consiste en la identificación de las interacciones existentes, para lo cual, se deben de tomar en cuenta todas las actividades que

pueden tener lugar debido al proyecto. Se recomienda operar con una matriz reducida, excluyendo las filas y las columnas que no tienen relación con el proyecto. Posteriormente y para cada acción, se consideran todos los factores ambientales que puedan ser afectados significativamente, trazando una diagonal en las cuadrículas donde se interceptan con la acción.

Cada cuadrícula marcada con una diagonal admite dos valores:

1. Magnitud: valoración del impacto o de la alteración potencial a ser provocada; grado, extensión o escala; se coloca en la mitad superior izquierda. Hace referencia a la intensidad, a la dimensión del impacto en sí mismo y se califica del 1 al 10 de menor a mayor, anteponiendo un signo + para los efectos positivos y – para los negativos.
2. Importancia: valor ponderal, que da el peso relativo del potencial impacto, se escribe en la mitad inferior derecha del cuadro. Hace referencia a la relevancia del impacto sobre la calidad del medio, y a la extensión o zona territorial afectada, se califica también del 1 al 10 en orden creciente de importancia.

Una vez llenas las cuadrículas el siguiente paso consiste en evaluar o interpretar los números colocados.

El texto que acompañe la matriz consistirá en la discusión de los impactos más significativos, es decir aquellos cuyas filas y columnas estén señalados con las mayores calificaciones y aquellas celdas aisladas con números superiores. Ciertas celdas pueden señalizarse, si se intuye que una condición extrema puede ocurrir, aunque su probabilidad sea baja.

La matriz de Leopold es "global", ya que cubre las características geo biofísicas y socioeconómicas, además de que el método incluye características físicas, químicas y biológicas. El método no es "selectivo", no se distingue, por ejemplo, entre efectos a corto y largo plazo.



La propiedad de "mutuamente exclusivo" no está preservada, ya que hay la oportunidad de contar doble, siendo este un fallo de esta matriz y no de los métodos de matriz en general. La matriz puede acomodar datos cuantitativos y cualitativos. Pero no prevé medios para discriminar entre ambos tipos de datos. Además, las magnitudes de las predicciones no están relacionadas explícitamente con las situaciones "con acción" y "sin acción".

La "objetividad" no es un elemento sobresaliente en la Matriz de Leopold, ya que se puede libremente efectuar la propia clasificación en la escala numérica entre el 1 y el 10 y no contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.

El enfoque matricial tiene sus limitaciones, aunque puede proveer una ayuda inicial en la configuración de los estudios necesarios y ser conveniente para efectuar un análisis preliminar entre diferentes alternativas, reducir el número de relaciones causa-efecto (impactos/celdas) a considerar y que sean preparadas una serie de matrices de acuerdo con las necesidades del estudio.

A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas de este método.

Ventajas:

1. Fuerza a considerar los posibles impactos de acciones proyectuales sobre diferentes factores ambientales.
2. Incorpora la consideración de magnitud e importancia de un impacto ambiental.
3. Permite la comparación de alternativas, desarrollando una matriz para cada opción.
4. Sirve como resumen de la información contenida en el informe de impacto ambiental.

Desventajas:

1. Difícil reproducibilidad, debido al carácter subjetivo del proceso de evaluación, pues no contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.
2. No tiene en consideración las interacciones entre diferentes factores ambientales.
3. No distingue entre efectos a corto y largo plazo, aunque pueden realizarse dos matrices según dos escalas de tiempo.
4. Los efectos no son exclusivos o finales, existe la posibilidad de considerar un efecto dos o más veces.

#### **4.2.2 Matriz referencial de impactos ambientales**

Esta matriz sigue un procedimiento de diagnóstico pronóstico y permite el análisis de las opciones existentes de localización de un proyecto, obra o actividad. Tiene en cuenta criterios como: acción, impacto, incidencia, amplitud, periodicidad, carencia, recurrencia, reversibilidad y magnitud; y a través de un proceso aditivo identifica los impactos más significativos.

#### **4.2.3 Matriz RIAM**

El RIAM proporciona un registro transparente y permanente del proceso de análisis y, al mismo tiempo, organiza el procedimiento de EIA, lo que a su vez reduce considerablemente el tiempo de ejecución de las EIA (Pastakia & Jensen, 1998).

Posee una forma sencilla y estructurada que permite volver a analizar en profundidad los diversos elementos de forma rápida y precisa. Esta flexibilidad hace que el método sea una herramienta poderosa tanto para ejecutar como para evaluar las EIA.

El método RIAM se basa en una definición estándar de los criterios importantes de evaluación, así como en los medios por los que se pueden comparar los valores semicuantitativos

de cada uno de esos criterios, para obtener una puntuación precisa e independiente de cada condición.

Los impactos de las actividades del proyecto se evalúan en relación con los componentes ambientales, y para cada componente en particular se asigna una puntuación (utilizando los criterios definidos), que proporciona una medida del impacto previsto del componente.

Los criterios de evaluación importantes se dividen en dos grupos:

- A. Criterios que son importantes para la condición, que puede cambiar la puntuación obtenida de forma individual, y
- B. Criterios que son de valor para la situación, pero que no son capaces de cambiar la puntuación obtenida de forma individual.

El valor asignado a cada uno de estos grupos de criterios estará determinado por una serie de fórmulas simples. Estas fórmulas tienen la capacidad de determinar las puntuaciones para cada componente sobre una base definida.

El sistema de puntuación requiere la simple multiplicación de las puntuaciones dadas con cada uno de los criterios del grupo (A). El uso del multiplicador para el grupo (A) es importante, ya que garantiza inmediatamente que se exprese el peso de cada puntuación, mientras que la simple suma de las puntuaciones podría proporcionar resultados idénticos para diferentes condiciones.

Los valores de las puntuaciones del grupo de criterios de (B) se suman para obtener una única suma. Esto asegura que las puntuaciones de cada valor individual no puedan influir en el puntaje general, pero que la importancia colectiva de todos los valores del grupo (B) sea tomada en cuenta.

La suma de las puntuaciones del grupo (B) posteriormente se multiplican por el resultado obtenido del grupo (A) para proporcionar una puntuación de evaluación final (ES) para la condición.

El proceso de la RIAM en su forma actual, según Pastakia y Jensen, puede ser expresado:

$$(a1)x(a2) = aT$$

$$(b1) + (b2) + (b3) = bT$$

$$(aT)x(bT) = ES$$

Donde:

(a1) (a2) son las puntuaciones de los criterios individuales para el grupo (A);

(b1) (b2) (b3) son las puntuaciones de los criterios individuales para el grupo (B);

aT es el resultado de la multiplicación de todas las puntuaciones del grupo (A);

bT es el resultado de la suma de todas las puntuaciones del grupo (B);

ES es la puntuación ambiental para la condición.

Los juicios sobre cada componente se hacen de acuerdo con los criterios y escalas que se muestran en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.1 Criterio de evaluación RIAM*

<b>Criterio</b>	<b>Escala</b>	<b>Descripción</b>
A1: Condición de importancia	4	Importante para los intereses nacionales e internacionales
	3	Importante para los intereses regional y nacional
	2	Importante para las áreas inmediatamente fuera de la condición local
	1	Importante solo para la condición local
	0	Sin importancia
A2: Magnitud del cambio o efecto	+3	Beneficio mayoritariamente positivo
	+2	Mejora significativa del status quo
	+1	Mejora del status quo
	0	No hay cambios o mejoras del status quo
	-1	Cambios negativos en el statu quo
	-2	Desventaja o cambio negativo significativo
	-3	Mayor afectación o cambio negativo
B1: Permanencia	1	Sin cambio/ no aplica
	2	Temporal
	3	Permanente
B2: Reversibilidad	1	Sin cambio/ no aplica
	2	Reversible
	3	Irreversible
B3: Acumulativo	1	Sin cambio/ no aplica
	2	No acumulativo simple
	3	Acumulativo sinérgico

Fuente: (Pastakia y Jensen, 1998)

El RIAM requiere definir los componentes de evaluación específicos mediante un proceso de delimitación del alcance, y estos componentes ambientales se incluyen en una de las cuatro categorías que se definen a continuación:

- a) Físico/químico (PC) que se refiere a todos los aspectos físicos y químicos del medio ambiente.
- b) Biológico/Ecológico (BE) que son todos los aspectos biológicos del medio ambiente.
- c) Sociológicos/Culturales (SC), los aspectos humanos del medio ambiente, incluyendo los aspectos culturales.
- d) Económico/Operativo (EO) de forma cualitativa para identificar las consecuencias económicas de debido a las alteraciones del medio, tanto temporal como permanente.

Para utilizar este sistema de evaluación, se produce una matriz para cada opción del proyecto, que comprende celdas que muestran los criterios utilizados, estableciendo la relación con cada componente definido.

Dentro de cada celda se establecen las puntuaciones de los criterios individuales. A partir de las fórmulas dadas anteriormente, se calcula y registra el número de ES. Para proporcionar un sistema de evaluación más seguro, las puntuaciones individuales de los ES se agrupan en rangos en los que se pueden comparar.

Los rangos se definen por condiciones que actúan como marcadores del cambio en los rangos. Las razones completas para el establecimiento de las marcas de rango se describen en Pastakia y Jensen (1998).

En la Tabla 4.2 se indican los valores de ES y las marcas de rango que se utilizan actualmente en el RIAM. La evaluación final se realiza de acuerdo con estas marcas de rango.

*Tabla 4.2 Valores de ES y marcas de rango.*

Puntuación ambiental	Marcas de rango	Descripción de la marca de rango
+72 a +108	+E	Importantes cambios/impactos positivos
+36 a +71	+D	Cambios/impactos positivos significativos
+19 a +35	+C	Cambio/impactos moderadamente positivos
+10 a +18	+B	Cambios/impactos positivos
+1 a +9	+A	Cambios/impactos ligeramente positivos
0	N	No hay cambio/status quo/no se aplica
-1 a -9	-A	Cambio/impactos ligeramente negativos
-10 a -18	-B	Cambios/impactos negativos
-19 a -35	-C	Cambio/impactos moderadamente negativos
-36 a -71	-D	Cambios/impactos negativos significativos
-72 a -108	-E	Cambios/impactos negativos importantes

FUENTE: (Pastakia & Jensen, 1998)

Una vez que la puntuación ES se establece en una marca de rango, estos pueden ser mostrados individualmente o agrupados según el tipo de componente y presentados en cualquier gráfico o la forma numérica que requiere la presentación.

#### **4.2.4 Método de CNYRPAB:**

Es un método de identificación de los impactos que ocasiona un proyecto, obra o actividad, consiste en elaborar dos matrices. La primera de las cuales es semejante a la de Leopold, para las condiciones iniciales del ambiente y estado de recursos naturales con posibles acciones sobre el medio. Se marcan las cuadrículas a las que corresponde un impacto directo y se les califica con un número de orden (Fernández-Vitoria, 1993).

Estos impactos calificados se interrelacionan entre ellos mediante el empleo de una segunda matriz con objeto de identificar los impactos indirectos. Así pues, se destacan los impactos

directos e indirectos que produce una determinada acción y también a la inversa, es decir, se pueden analizar las causas que dan lugar a un impacto dado. Es estático, ya que no se incluye la variable tiempo.

#### **4.2.5 Matriz de análisis por dimensiones**

Consiste en una matriz donde se relacionan las dimensiones ambientales física, biótica, cultural, económica y política. Tiene como fortaleza que permite el análisis de las relaciones entre los componentes ambientales de cada dimensión.

#### **4.2.6 Guías metodológicas del M.O.P.U:**

La Dirección General del Medio Ambiente de España, por medio del MOPU (actual MOPT), publico esta metodología específica para los casos concretos de construcción de carreteras y ferrocarriles, grandes presas, repoblaciones forestales y aeropuertos, teniendo previsto aumentar el número de estas dedicadas a otro tipo de actuaciones. Estas guías metodológicas parten de una sólida base descriptiva de cada parámetro potencialmente afectable, así como de las acciones causantes de los posibles impactos, es decir, una descripción de la situación preoperacional a la que sigue una previsión de impactos, incluyendo criterios y metodologías de evaluación, en las que se incluyen varias alternativas que pueden ser utilizadas según convenga para el caso en cuestión (Fernández-Vitoria, 1993).

El proceso general de esta metodología hace una evaluación cualitativa del impacto (generalmente de tipo matricial) y, cuantitativa (usualmente del tipo Batelle). Es aplicable para proyectos con suficiente información ambiental y permite la relación de medidas preventivas y correctoras, los posibles impactos residuales y un programa de vigilancia y control.



Las ventajas de este método es que posibilita la adaptación a métodos cuantitativos facilitando así también el trabajo secuencial, es importante recalcar que brindan el espacio para realizar el cálculo del impacto ambiental. Las desventajas son que requiere del uso de memorias explicativas y pueden llegar a ser extensas e inmanejables.

#### **4.2.7 Método de MEL-ENEL**

El Método MEL-ENEL es una herramienta de evaluación ambiental para proyectos que se encuentran en las etapas de pre inversión u operación, que garantiza al equipo interdisciplinario conocer de forma exhaustiva el proyecto y el medio ambiente con el que interactúa, realizar una correcta identificación de sus impactos potenciales, además de una adecuada evaluación y priorización de acuerdo con su significancia ambiental, y los criterios para definir el límite entre el nivel significativo y no significativo, para justificar cuáles impactos negativos requieren de medidas correctivas, evitando costos financieros injustificados. El Método de MEL-ENEL consta de seis etapas secuenciales, los cuales se detallan a continuación:

##### *Etapas 1: Desglose de Acciones del Proyecto*

Según López M. (2001), en la mayoría de los proyectos que requieran una EIA, se deben incluir las etapas de ejecución y de funcionamiento, separadas dentro del mismo EsIA. Además, cuando la naturaleza del proyecto lo requiera, la autoridad competente, el MARN en el caso de El Salvador, podrá requerir la fase de cierre o abandono. En esta etapa el equipo multidisciplinario debe conocer a fondo el proyecto para ser capaz de identificar de forma correcta la interacciones con el medio, haciendo uso de un “Cronograma de ejecución del proyecto” para la fase de ejecución y de un “Flujograma de proceso” para la fase de funcionamiento. También deben considerarse algunos aspectos como:

- a) Objetivos del proyecto o acción propuesta
- b) Identificación de tareas y acciones susceptibles de ocasionar impactos ambientales
- c) Localización física del proyecto, de sus componentes y su relación con la infraestructura de servicios existentes.
- d) Materias primas y su relación con la zona
- e) Productos intermedios, finales, subproductos y desechos, tanto durante la construcción como de la operación
- f) Cantidad y calidad de mano de obra
- g) Opciones tecnológicas tanto locales como foráneas
- h) Cualquier otra información que el equipo multidisciplinario considere relevante.

Como resultado de esta etapa se elaborará una tabla resumen con las acciones o actividades del proyecto que sean potencialmente impactantes, tal y como se presenta en la Tabla 4.3.

*Tabla 4.3 Desglose de Acciones del Proyecto.*

N°	Nombre clave	Descripción general de la acción o actividad
1		
2		
3		
4		
5		

FUENTE: (López M., 2001)

*Etapa 2: Desglose de Factores Ambientales*

También llamada Estudio de Base o Diagnostico Ambiental. Consiste en establecer un inventario de la situación en el sitio donde se piensa desarrollar la acción antes de la implementación de esta (López M., 2001).

Este paso es una etapa previa e indispensable para determinar los impactos potenciales y consiste en describir las condiciones ambientales previas a la realización del proyecto, pero no de una forma exhaustiva si no considerando solo aquellas relevantes para el entorno, relacionando las acciones del proyecto que puedan impactar de forma potencial con los factores ambientales.

Hay tener en cuenta que el medio ambiente no es estático, por lo que se debe realizar una descripción de la situación del medio antes del proyecto y realizar una interpretación histórica de esta, para poder predecir con cierta certeza la evolución del medio ambiente si no se ejecuta el proyecto, ya que muchos impactos podrían variar en magnitud debido a la evolución del medio ambiente, aunque la actividad del proyecto sea constante. De esta forma se conocerá cuales impactos se están generando como consecuencia del proyecto y cuales son generados por la evolución natural del medio, evitando así juicios equivocados o injustos, en contra del proyecto.

Esta etapa del método se realizará mediante tres pasos:

1. Visita de reconocimiento de campo: se basa en la identificación in situ de los impactos directos e indirectos de las acciones, tomando en cuenta los factores del ambiente fisicoquímicos, biológico, socioeconómico y/o paisajístico.
2. Elaboración de listado de factores ambientales: se definirá de forma particular el “Área de influencia” o “Entorno”, esto se refiere a aquella parte del medio ambiente que interactúa potencialmente con el proyecto y que es receptora potencial de sus impactos.
3. Elaboración de tabla resumen con los factores ambientales potencialmente impactantes: esta deberá incluir un número de referencia para cada factor, un nombre clave

que resuma y permita hacer referencia en forma ágil a este factor o condición del ambiente, y una explicación general del contenido en cada elemento, como se muestra en la Tabla 4.4.

*Tabla 4.4 Desglose de Factores Ambientales.*

N°	Nombre clave	Descripción general del factor ambiental
1		
2		
3		

FUENTE: (López M., 2001)

### *Etapa 3: Matriz de Identificación de Impactos*

A comparación de otros métodos matriciales, MEL-ENEL permite elaborar en forma directa una matriz específica del proyecto. Esta matriz de interacción se elabora con un máximo de 400 celdas para la condición más crítica de  $M = 20$  filas x  $N = 20$  columnas, siendo M el número de factores ambientales y N el número de acciones de proyecto, la cual servirá como herramienta técnica para la identificación de los impactos potenciales, por medio de la interacción entre ambas.

Posteriormente, se debe realizar una revisión de cada una de las interacciones entre el primer componente del proyecto y cada uno de los factores ambientales, en forma descendente.

Cada vez que se determine por consenso, que existe una interacción causa/efecto, se anotará en la celda un número en el orden ascendente (1, 2, 3, +...). Cuando no se determine interacción se dejará la celda en blanco y se continuará con la siguiente, como se muestra en Tabla 4.5.

*Tabla 4.5 Matriz de Identificación de Impactos.*

Factores	Acciones						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
F1		2				6	8
F2	1			4		7	9
F3		3		5			10

Una vez elaborada la matriz, cada impacto directo deberá identificarse con un nombre clave, que sea fácilmente reconocible para las siguientes tareas del método.

Se debe elaborar una tabla de cuatro columnas que respalde el proceso de identificación en la matriz específica colocando en la primera columna el número de referencia, asignado dentro de cada celda en que existe interacción directa junto con el signo (positivo o negativo) del impacto; en la segunda columna se debe asignar un nombre clave (resumen) del impacto directo; en la tercera columna se describirá brevemente el significado de este impacto según el consenso del equipo evaluador, y en la cuarta se procederá a listar al menos tres posibles impactos indirectos que se generan en el medio ambiente a partir del directo identificado en la matriz (López M., 2001).

Dando como resultado la Tabla 4.6.

*Tabla 4.6 Nombres Claves de la Matriz de Identificación de Impactos.*

Ref.	Nombre clave (signo)	Descripción de impactos Directos	Descripción de impactos indirectos
1			
2			
3			
4			
5			
6			

FUENTE: (López M., 2001)

#### *Etapa 4: Categorización por Impactos Genéricos*

Una vez realizada la identificación y descripción de impactos directos e indirectos, se deberán agrupando según el factor ambiental impactado, los cuales corresponderán a los “impactos genéricos” que serán evaluados y priorizados posteriormente. Una vez apurados los impactos genéricos se debe elaborar una tabla similar a la Tabla 4.7.

*Tabla 4.7 Caracterización por Impacto Genérico.*

<b>Impacto genérico</b>	<b>Signo</b>	<b>Nº de referencia</b>	<b>Descripción</b>
Nombre clave 1			
Nombre clave 2			
Nombre clave 3			
Nombre clave 4			
Nombre clave 5			

FUENTE: (López M., 2001)

#### *Etapa 5: Evaluación de Impactos Genéricos*

La evaluación debe realizarse de forma individual, tanto para los impactos positivos como para los negativos, de acuerdo con su significancia ambiental.

“La significancia ambiental” es una valorización completa de la relevancia que un impacto puede tener en el medio ambiente y se establece en base a cinco características, las cuales son:

- a) Magnitud
- b) Importancia
- c) Extensión
- d) Duración
- e) Reversibilidad

Solo los impactos que resulten “significativos”, sin importar su signo, formarán parte del proceso de toma de decisión. Para esto es necesario clasificar cada impacto como alto (A), moderado (M) o bajo (B)., elaborando un resumen de los resultados relevantes de la evaluación, especificando cada característica del impacto como se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Resumen de Resultados de evaluación.

Impacto genérico	Magnitud	Importancia	Extensión	Duración	Reversibilidad
Nombre clave 1	A	A	A	A	A
Nombre clave 2	A	B	A	B	A
Nombre clave 3	B	B	B	A	A
Nombre clave 4	A	B	M	M	M
Nombre clave 5	B	M	M	B	A

FUENTE: (López M., 2001)

Aquellos cuyas cinco características hayan sido calificadas como baja (B), o aquellos que tengan una sola característica moderada (M) y las restantes calificadas como bajas (B), serán descartadas.

*Etapas 6: Priorización de Impactos por Significancia*

Una vez completada la valorización de las diferentes características particulares de cada genérico, se debe realizar una comparación “todos contra todos”, para finalmente establecer su “Coeficiente de Significancia Relativa, CRS”. La clasificación de cada impacto genérico por pareja se realizará para obtener su significancia relativa en función de cada una de sus características, distribuyendo 100 puntos entre cada pareja. (Ver Tabla 4.9)

Tabla 4.9 Comparación "todos contra todos" de criterios e impactos genéricos.

Criterio	X	Y	Criterio	X	Z	Criterio	Y	Z
Magnitud			Magnitud			Magnitud		
Importancia			Importancia			Importancia		
Extensión			Extensión			Extensión		
Duración			Duración			Duración		
Reversibilidad			Reversibilidad			Reversibilidad		
Suma			Suma			Suma		
CRS			CRS			CRS		

Posteriormente, se deberá construir una matriz cuadrada, de F filas x F columnas, en donde F es el número de impactos genéricos negativos a priorizar de acuerdo con su significancia, como se muestra en la Tabla 4.10. Una vez obtenidos los valores CSR se procede a normalizarlos al 100% mediante una regla de tres simple y cualquier impacto genérico con una ponderación menor del 40% podrá excluirse del proceso de toma de decisiones.

*Tabla 4.10 Matriz de CSR.*

	X	Y	Z	SUMA	CSR	Nivel de Significancia
X						
Y						
Z						

### **4.3 Métodos de indicadores o índices**

Estos métodos se basan en el uso de indicadores. Un indicador ambiental es un parámetro o valor resultante de un conjunto de parámetros que ofrece información sobre un fenómeno con amplio significado, en este caso el fenómeno es el impacto ambiental causado por un proyecto. Se conocen aplicaciones de este método con herramientas desarrollados por Holmes, Universidad de Georgia, Hill-Schechter, Fisher-Davies, índices de importancia y monitorización que se detallan a continuación:

#### **4.3.1 Método de Holmes**

Este método busca realizar la evaluación y comparación de alternativas de un proyecto por medio de la clasificación de factores ambientales por orden de importancia, y comparándolos cualitativamente por medio de parámetros previamente establecidos y seleccionando la mejor variante en función de su importancia (Instituto Nacional de la Ecología, sf). Siendo las etapas del método las siguientes:



1. Elaboración de una relación de factores ambientales, adecuados a las características del proyecto.
2. Clasificación de los factores ambientales por orden de importancia (sólo con criterios cualitativos).
3. Comparación de las diferentes variantes del proyecto, siempre de manera cualitativa, mediante el empleo de un factor o parámetro previamente establecido.
4. Identificar la mejor alternativa en función de su posición respecto a cada uno de los factores ambientales y de su importancia.

Este método es multidisciplinario, pero no se tienen en cuenta el carácter dinámico de los fenómenos ambientales y no se efectúa ninguna valoración cuantitativa.

#### **4.3.2 Método de la Universidad de Georgia**

El objeto de este método es evaluar los impactos ambientales de las diferentes variantes de un proyecto. El método se basa en el cálculo de un indicador medio del impacto y consiste en agregar valores a 56 componentes ambientales, ponderados por los coeficientes representativos de la importancia relativa de los componentes. Para cada componente se emplean dos valores, uno para la situación presente y otro para el futuro. Los valores relativos se asignan en base a indicadores y mediciones (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

Aunque esta ponderación es subjetiva, el método es insensible a las variaciones del peso de uno de los atributos. Además, permite evaluar situaciones en el presente y el futuro del proyecto de forma simultáneas, así como soluciones alternativas, sin embargo, no permite considerar la alternativa de "no hacer nada". Cabe resaltar que el método tiene la ventaja de facilitar la participación pública en la fase de determinación del peso de los componentes o atributos del ambiente (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

### **4.3.3 Método de Fisher-Davies**

Este método se enmarca en un proceso integrado de planificación donde se pretende evaluar los impactos ambientales antes y durante la realización de un proyecto. Constando de tres etapas usualmente:

1. La evaluación de la situación de referencia: evaluando de 1 a 5 de forma subjetiva según el criterio de un equipo evaluador multidisciplinario.
2. La matriz de compatibilidad: que relaciona los elementos considerados importantes en la etapa anterior y las acciones derivadas del proyecto. Se califica a su vez se realiza en forma similar a la matriz de Moore dando valores de 1 a 5 por cada casilla de interacción precedida de un signo + o – según sea el impacto positivo o negativo, Esta matriz debe hacerse para cada una de las alternativas.
3. La matriz de decisión: Reagrupa los valores atribuidos a los elementos importantes. En función de esta matriz se toman las decisiones, para cada uno de los procesos evaluados que conllevan a su respectivo impacto (Robles, 2018).

### **4.3.4 Método de Hill – Schechter (Costo – Beneficio)**

El análisis costo-beneficio, trata de evaluar y sopesar de forma global los beneficios y costos sociales, reduciéndolos a valores actuales, que se derivarán de una o varias opciones o alternativas.

Dicha evaluación de costes y beneficios se hace con ayuda de precios ficticios o asignados para aquellos bienes y servicios que no tienen un mercado que los fije, como es el caso de los bienes y servicios medioambientales. No obstante, se puede prescindir de ellos, si los costes y beneficios admiten directamente comparaciones que permiten obtener conclusiones, sin necesidad de valorarlos en unidades monetarias (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

Los precios asignados pueden ser meras estimaciones, por ejemplo, con base en encuestas sobre lo que una población estaría dispuesta a pagar por determinado servicio o por analogía con los precios de mercado de servicios similares, o bien pueden deducirse de un proceso matemático de optimización. A pesar de que existe abundante literatura sobre esta técnica de análisis coste-beneficio y de ser ampliamente utilizada, no hay unanimidad ni sobre los conceptos fundamentales, ni sobre la metodología a emplear, ni sobre la validez de las distintas clases de precios asignados (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

Entre las limitaciones de esta técnica de análisis se menciona que siempre proporciona un enfoque de equilibrio parcial y sólo da lugar a conclusiones válidas cuando el problema que se trata de analizar tenga una repercusión despreciable en la estructura de precios reales que rigen en la economía, pues en otro caso el análisis se habrá basado en unas relaciones de precios diferentes de las que podrían regir, caso de adoptarse, algunas de las alternativas estudiadas. Otro inconveniente del análisis coste-beneficio es que tiende inevitablemente a dar subestimaciones, sobre todo, de los costes sociales.

#### **4.4 Métodos basados en redes de interacciones**

Esta metodología se basa en la representación gráfica de la relación entre las actividades y los impactos ambientales, como ejemplo de este tipo de metodologías se presentan a continuación los métodos de Sorensen, Bereano, Banco Mundial, Evaluación de ciclo de vida y Odum:

##### **4.4.1 Método de Sorensen**

Es un método de identificación, cuyo objetivo es identificar y analizar de forma cualitativa los impactos ambientales asociados a diferentes usos alternativos del territorio. Estas alter-

nativas se descomponen en un cierto número de acciones elementales, basándose en las condiciones iniciales del área de estudio (impactos primarios o directos), determinando las condiciones finales una vez estudiados los efectos y proponiendo así soluciones acordes a la situación de conflicto (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

Este método hace uso de diversas tablas y gráficos, entre las que se mencionan las tablas cruzadas de usos-acciones y de acciones-condiciones iniciales, los gráficos de condiciones iniciales-condiciones finales y los gráficos de efectos múltiples-acciones correctivas.

El método del gráfico de efectos múltiples de Sorensen presenta la ventaja de ser dinámico, comparado con el de Leopold y es capaz de analizar las diferentes interacciones entre los usos, acciones y efectos.

#### **4.4.2 Método Bereano**

Se basa en una matriz de evaluación de los impactos que trata de establecer una comparación de diferentes alternativas de estrategias tecnológicas y tiene como objetivo comparar estas alternativas tomando como base ciertos parámetros, por medio de un método de generación de parámetros, para ser capaz de seleccionar aquellos que reflejen los efectos más significativos que las distintas alternativas producirán sobre el medio ambiente (Instituto Nacional de la Ecología, sf).

#### **4.4.3 Evaluación de ciclo de vida**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) tiene como finalidad analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo (Leiva, 2016).

Según la norma UNE-EN ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), se define el Análisis de Ciclo de Vida como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, mediante:

- a) la recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio);
- b) la evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario;
- c) la interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

Las normas de referencia para la realización de un ACV, según Leiva son:

- a) Norma UNE-EN ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006)
- b) Norma UNE-EN ISO 14044 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices (ISO 14044:2006)

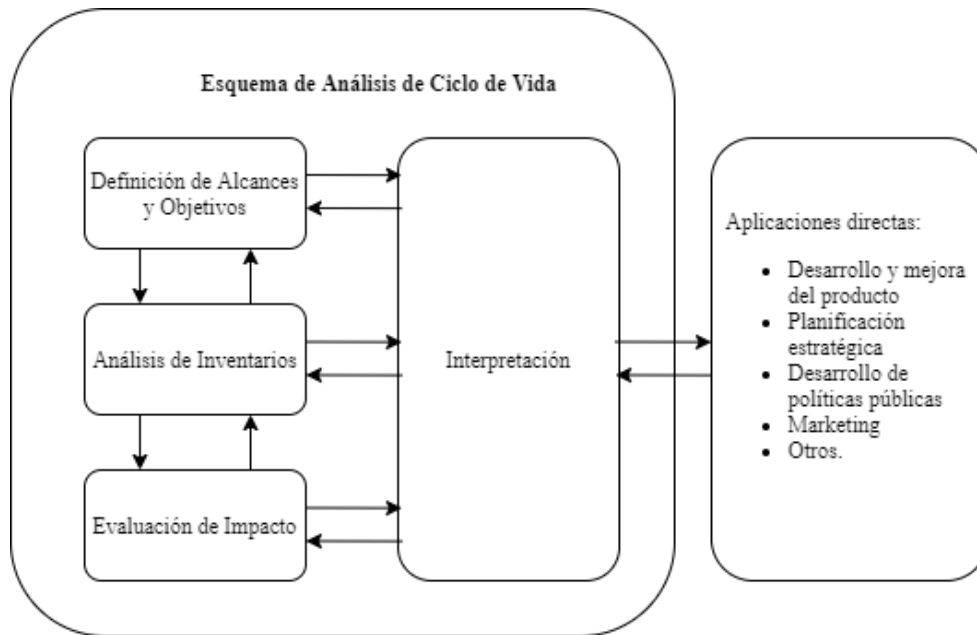
Aunque todos los ACV sigan las mismas etapas, el nivel de detalle no es el mismo en todos los casos, ya que esto depende de los objetivos que se deseen lograr. Por lo que se pueden diferenciar tres tipos de ACV, los cuales son:

- a) ACV conceptual: es el más sencillo de los ACV, que tiene por finalidad identificar los impactos potenciales más significativos por medio de un estudio cualitativo.
- b) ACV simplificado: este consiste en aplicar la metodología del ACV para llevar a cabo un análisis selectivo (tomando sólo en consideración datos genéricos y abarcando el

Ciclo de Vida de forma superficial), seguido de una simplificación (centrándose en las etapas más importantes) y un análisis de la fiabilidad de los resultados.

- c) ACV completo: es el más complejo de los tres tipos de ACV y consiste en realizar un análisis a detalle, tanto del inventario como de los impactos, de forma cualitativa y cuantitativa.

Según Moral Q., Couceiro M., y Sampedro R., de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044, el proceso de análisis de ciclo de vida de un proceso/producto consta de cuatro componentes principales (Ver Figura 4.1):



*Figura 4.1 Esquema de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*

FUENTE: (Moral Q., Couceiro M., y Sampedro R., 2015)

1. **Definición de Objetivos y Alcances**: consiste en definir y describir el producto, proceso o actividad. En esta etapa se debe establecer el contexto en el que se realizará la evaluación e identificación de los límites y efectos ambientales.

2. **Análisis de inventario:** en esta etapa se debe identificar y cuantificar el consumo de recursos y emisiones al medio ambiente (por ejemplo, las emisiones atmosféricas, residuos sólidos, vertidos de aguas residuales, etc.).
3. **Evaluación de Impacto:** se pretenden evaluar los posibles efectos humanos y ambientales sobre los recursos y las emisiones identificadas en el análisis de inventario.
4. **Interpretación:** es esta etapa se evaluarán los resultados del análisis de inventario y evaluación del impacto para seleccionar el producto, proceso o servicio con una clara comprensión de la incertidumbre y las hipótesis utilizadas para generar los resultados.

#### **4.4.4 Método del Banco Mundial**

Busca la fijación de objetivos y señalización de los puntos generales base para analizar las posibles consecuencias del proyecto, indicando la información precisa y el tipo de experiencia necesaria que se requiere para estudiar con profundidad los aspectos ambientales de los diferentes proyectos.

#### **4.4.5 Método de Odum**

En este método los impactos se miden en términos de fijación y flujo de energía entre los componentes de los ecosistemas. Se utiliza para establecer relaciones de causalidad y para discutir impactos indirectos.

Como fortaleza permite la identificación de los impactos y de sus interrelaciones, e indica acciones correctivas y mecanismos de control. Al estar combinado con un método gráfico permite identificar impactos indirectos de segundo y tercer orden. Por otro parte, no permite el cálculo del impacto ambiental.

## **4.5 Métodos de cantidades o cuantitativos**

Estas metodologías se apoyan en el uso de elementos numéricos absolutos, estadísticos y económicos para representar los impactos ambientales. Entre estos métodos se tiene:

### **4.5.1 Batelle–Columbus**

Este es un método cuantitativo y es considerado el primer esfuerzo serio de valoración y cuantificación de impactos. Parte de la definición de una lista de indicadores de impacto con 78 parámetros ambientales que se ordenan según 18 componentes ambientales agrupados en cuatro categorías ambientales, permitiendo así la evaluación sistemática de impactos ambientales mediante el empleo de indicadores homogéneos y brindando un sistema de alerta para identificar los impactos más significativos que deberán ser sometidos a un análisis de calidad más detallado.

El método de Batelle-Columbus según, Encinas M. y Gómez de Baluguera sigue el siguiente procedimiento:

*Paso 1: Elaboración del árbol de factores.*

Consiste en construir el árbol de factores susceptibles de ser afectados por el proyecto. El método parte de un árbol de factores genéricos que se divide en cuatro categorías ambientales. Estas categorías ambientales se clasifican a su vez en componentes ambientales, y cada una de los cuales está formada por parámetros o factores ambientales. En total, en este método, el árbol está formado por 78 factores ambientales. Si se requiere utilizar este método, el árbol debe ser adaptado al entorno del proyecto.



## *Paso 2: Asignación del peso relativo (PF) a los factores ambientales*

Dentro de un entorno no todos los factores contribuyen de la misma forma a la calidad ambiental. Hay factores que son considerados más importantes con respecto a otros, en función de su contribución positiva o negativa a la calidad ambiental del entorno. Por esta razón, se debe asignar un peso relativo a cada factor en función de la importancia que tienen dentro del entorno. Se considera que el entorno tiene una total de 1000 unidades de importancia relativa (UIP), a repartir entre los factores afectados. La ponderación de los factores del medio se lleva a cabo mediante encuestas tipo Delphi (Encinas M. y Gómez de Baluguera, 2011).

En el caso de un EsIA, para asignar el peso a los subfactores ambientales, la consulta tipo Delphi se haría de la siguiente forma:

- A. Selección de un panel de expertos que sea representativo de todos los subfactores que se van a ponderar.
- B. Se solicita a los panelistas que calculen el peso relativo de cada subfactor ambiental, siguiendo alguno de los métodos siguientes:
  - a) Matriz de comparación por pares
  - b) Ordenamiento por rangos
  - c) Ordenamiento por pesos
- C. Se repite el paso anterior cuantas veces sea necesario, dando a conocer los pesos obtenidos a los panelistas, hasta llegar a una convergencia de opiniones. Se pueden ir eliminando aquellos factores con los que ya se ha llegado a un consenso. Si hay factores con respuestas muy distintas, se pueden intercalar los 3 métodos.
- D. Con los pesos relativos de cada factor, se distribuyen las 1000 UIP de forma relativa.

### *Paso 3: Valoración de los impactos*

Este método valora los impactos ambientales calculando la cantidad de calidad ambiental que pierde o que gana cada uno de los factores considerados, es decir, restando la calidad ambiental del factor en la situación con y la calidad ambiental del factor en la situación sin, por medio de indicadores ambientales.

Se selecciona un indicador para cada factor identificándolo mediante un número y se mide el valor del indicador “sin” ( $Ind_{j \text{ sin}}$ ), además de estimar el valor del indicador en la situación “con” ( $Ind_{j \text{ con}}$ ). Estos valores estarán en las unidades en que se mida el indicador, ya sean unidades convencionales (concentración, nivel de ruido, etc.) o escalas (bueno, malo, regular).

Debido a que no siempre se tendrán unidades heterogéneas, los valores de cada indicador se deberán someter a un proceso de transformación para homogenizar todas las unidades. Para ello, se usan las funciones de transformación o curvas de valor ( $f$ ) que transforman los valores de los indicadores ( $Ind$ ) en unidades de calidad ambiental ( $CA$ ) que van siempre de 0 a 1 y que sí se pueden sumar.

Así, mediante la función de transformación del indicador elegido para medir el factor  $j$ , se transforma de “ $Ind_{j \text{ sin}}$ ” a “ $CA_{j \text{ sin}}$ ” y el “ $Ind_{j \text{ con}}$ ” en “ $CA_{j \text{ con}}$ ”. Por diferencia de los niveles de calidad ambiental en las situaciones con y sin, se obtiene el valor global de los impactos para cada factor:  $V_j = CA_{j \text{ con}} - CA_{j \text{ sin}}$

En la Tabla 4.11, se puede observar un ejemplo de la Matriz Factores y pesos, que se debe obtener como resultado del método Batelle-Columbus.

Tabla 4.11 Matriz de Factores y Pesos.

Factor	Peso	Indicador	Ind sin	Ind con		CA sin	CA con	V
F1								
Fj	PFj	N°	Indj sin	Indj con	f	CAj sin	CAj con	Vj = CAj con – CAj sin
Fm								
ENTORNO	1000							$V_p = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \times PF_j}{\sum_{j=1}^m PF_j}$

FUENTE: (Encinas M. y Gómez de Baluguera, 2011)

*Paso 4: Cálculo del valor del impacto total*

Y, por último, se calcula el impacto total del proyecto sobre el entorno como la suma del valor global de los impactos Vj, ponderada por el peso de los factores PF, como se muestra a continuación:

$$V_p = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \times PF_j}{\sum_{j=1}^m PF_j}$$

#### 4.5.2 Método de León

Se trata de un método cuantitativo en dónde se calcula el impacto ambiental de acuerdo con la calificación ambiental de los factores que son afectados. Este método no tiene en cuenta ningún criterio que pueda llevar a subjetividad por la interpretación o acomodo de alguna escala o rango interpretado, pero puede tener un sesgo a la hora de asignar los pesos relativos de los factores.

### **4.5.3 Método de cuantificación de valores estadísticos**

Consiste en la valoración de la calidad del paisaje por medio del establecimiento de criterios estéticos, primero se asignan atributos, características y criterios de valoración, se realiza el cálculo del valor estético y se toma la decisión.

### **4.5.4 Valoración monetaria**

Método desarrollado con el propósito de mostrar el impacto ambiental en términos monetarios. Dentro de esta metodología se incluye la EEA (Evaluación Económica Ambiental), que es la aplicación de un conjunto de herramientas económicas para complementar y mejorar la calidad de los procesos de evaluación y, que permite fortalecer la toma de decisiones.

Las ventajas de estos métodos es que permiten cuantificar en términos monetarios o absolutos, las afectaciones al ambiente. Los resultados que arrojan estos métodos son de fácil percepción para los tomadores de decisiones. Además, permite el cálculo del impacto ambiental, a través de valoración económica, o de análisis de probabilidad. Su desventaja es que se imposibilita su uso ante la escasez de datos.

## **4.6 Análisis multicriterio**

El análisis multicriterio nace de los problemas de toma de decisiones buscando evaluar diversos criterios que a menudo generan diferentes conflictos. A continuación, se presentan algunos de los métodos utilizados:

### **4.6.1 Método GAM - Matriz de logro de metas**

En este método se establecen metas, actividades, indicadores y porcentajes de cumplimiento, por lo que es útil para el seguimiento de los planes de manejo, contingencia y monitoreo. Busca reconocer la pluralidad de puntos de vista y pesos. La herramienta GAM realiza un

cálculo de puntuación en un gran número de proyectos, basado en un conjunto de criterios objetivos. Por esta razón, un equipo de priorización seguirá los siguientes pasos, según

CITIES ALLIANCE:

*Paso 1: Determinar los criterios pertinentes para la estrategia*

El punto más importante es el criterio elegido para la evaluación. El equipo de priorización discutirá y seleccionará los criterios relevantes para la estrategia, criterios que ayudan a alcanzar los objetivos estratégicos ya formulados. Estos podrían incluir el enfoque en el objetivo, la viabilidad técnica o financiera (disponibilidad de recursos) del proyecto, compromiso de los principales responsables de la toma de decisiones y coordinación con otros proyectos.

*Paso 2: Seleccionar los pesos y los indicadores de puntuación*

A todos los criterios se les puede dar la misma importancia, o peso, o pueden ser ponderados de manera diferencial. Por ejemplo, el equipo de priorización rellenará la Tabla 4.12 que se presenta. En la parte superior están los criterios. A continuación, se describen las características de cada criterio a medir, en tres niveles. Véase el ejemplo de la Tabla 4.13.

*Tabla 4.12 criterio de puntuación en GAM*

<b>Grupos</b>	<b>Peso</b>	<b>Proyecto 1</b>	<b>Proyecto 2</b>
<b>Nombre del proyecto</b>		<b>Puntaje</b>	<b>Puntaje</b>
<b>Criterio: Cobertura</b>			
100%			
75%			
50%			
<b>Criterio:</b>		<b>Puntaje</b>	<b>Puntaje</b>

FUENTE: (Cities Alliance, 2016)

Tabla 4.13 Ejemplo de criterios de puntuación

Proyecto que se evaluará	Puntaje	Puntaje
<b>Enfoque</b>		
El proyecto se centra directamente en el objetivo	4	
El proyecto ayudará a cumplir el objetivo, pero indirectamente	2	
El proyecto no se centra en el objetivo anterior	0	
<b>Adecuación</b>		
El proyecto es adecuado para lograr el objetivo	4	
Es marginal en el logro del objetivo	2	
No cumplirá el objetivo	0	
<b>Viabilidad de la aplicación</b>		
El proyecto es muy viable de ejecutar	4	
El proyecto es cuestionable en cuanto a su viabilidad	2	
Es poco probable que el proyecto sea viable	0	
<b>Disponibilidad de recursos</b>		
Puede aplicarse con los recursos existentes	4	
Requiere reunir recursos, lo que sería difícil	2	
No es posible reunir los recursos	0	
<b>Compromiso</b>		
Conseguirá el compromiso de los responsables de la toma de decisiones	4	
Será difícil conseguir el compromiso	2	
Ciertamente no se comprometerá	0	
<b>Integración</b>		
El proyecto tendrá beneficios positivos en el cumplimiento de otros objetivos prioritarios previstos	4	
El proyecto no tiene repercusiones en el cumplimiento de otros objetivos previstos	2	
El proyecto tendrá un impacto negativo en el cumplimiento de otros objetivos previstos	0	
<b>Otros criterios*</b>		
<b>*Nota: si se utilizan otros criterios, la puntuación global debe ser ajustada</b>		

FUENTE: (Cities Alliance, 2016)

### *Paso 3: Rellenar el GAM*

Usando los resultados del paso 2, el equipo de priorización rellenará el GAM en la Tabla 4.14.

*Tabla 4.14 Criterios, puntuaciones y pesos del GAM*

<b>Criterios / peso</b>	<b>Proyectos / puntuaciones x pesos</b>	
Total		

FUENTE: (Cities Alliance, 2016)

### *Paso 4: Concluir la evaluación*

El equipo de priorización discutirá los resultados, aplicando el sentido común. ¿Los resultados parecen tener sentido? Si, no, ¿por qué no? Tal vez algunos de los criterios o ponderaciones no tienen sentido. Basándose en estas discusiones pueden intentar ajustar las ponderaciones y ver qué pasa. Si se decide comúnmente, las ponderaciones podrían ser cambiadas. Pero en términos generales, los resultados deben combinarse con herramientas adicionales de priorización.

Ventajas:

1. El GAM es un instrumento muy visible y transparente para seleccionar proyectos prioritarios, que permite una amplia participación de los interesados en los grupos temáticos.

2. Dado que los criterios utilizados para elegir los proyectos son decididos de manera transparente por las personas involucradas, los interesados no tienen la sensación de que los proyectos se hayan elegido de manera indiscriminada.

Desventajas:

1. Requiere tiempo y conocimientos técnicos (para utilizar las hojas de cálculo) a fin de integrar los resultados del establecimiento de prioridades de diversas personas y diversos grupos de trabajo.
2. Aun así, da lugar a un sesgo subjetivo, ya que el resultado final podría a veces dar lugar a decisiones que no son apoyadas por la comunidad (o por los responsables de la toma de decisiones). Es posible que haya que reajustar los criterios, o que se deban utilizar también otros instrumentos de priorización.

#### **4.6.2 Método de teoría de la utilidad multiatributo (MAUT)**

Se basa en tres etapas. La primera es la identificación de las entidades (alternativas, objetos) para ser evaluados. La segunda consiste en la identificación y estructuración de los atributos ambientales y su estructura de valores con los objetivos generales. La tercera son los atributos que se escalan para cuantificar las compensaciones. La ventaja de este método de evaluación es que incorpora los valores de los intereses clave involucrados.

El primer paso en el análisis es determinar las alternativas disponibles y sus atributos más destacados. Por ejemplo, en el caso de las viviendas, estas alternativas podrían ser viviendas disponibles en una región específica. Obsérvese que las alternativas no tienen por qué ser necesariamente objetos, pero podrían ser casi todo, siempre que se trate de un problema de decisión en cuestión. A continuación, deben elegirse los atributos salientes sobre los que se



juzgarán las alternativas. El conjunto de atributos tiene que ser completo, operativo, descomponible, no redundante y mínimo. Completo significa que todos los aspectos importantes del problema de la decisión tienen que ser cubiertos. El término operativo se utiliza para indicar que los atributos deben tener la capacidad de ser utilizados de manera significativa en el análisis. Descomponible se refiere a la simplificación de los aspectos del proceso de evaluación mediante su descomposición en partes. No redundante significa que no debe haber doble recuento de aspectos. Por último, el número de atributos debe ser lo más reducido posible para evitar factores como el aburrimiento, la fatiga y la confusión. La identificación de los atributos correctos es un paso muy importante del procedimiento. Lamentablemente, esos atributos no se entregan simplemente a los investigadores en un sobre al comienzo del estudio. Requiere una búsqueda minuciosa de los aspectos más importantes para el problema de decisión en particular. Los instrumentos para encontrar los atributos más importantes pueden ser, por ejemplo, entrevistas personales con expertos, entrevistas de grupos de discusión con expertos, una búsqueda bibliográfica y métodos como las redes de planes de decisión y el método de la cuadrícula de repertorio.

Después de evaluar todas las alternativas en todos los atributos destacados, la importancia de cada una de las se determinan los atributos y se calculan los pesos. Una serie de técnicas para determinar la importancia de los atributos. Los métodos más conocidos son la clasificación, la clasificación directa, la estimación de la relación y el método de los pesos de oscilación. Con la clasificación, se pide que clasifique todos los atributos en orden de importancia. Un ejemplo de clasificación directa es dividir 100 puntos sobre los atributos de manera que el número de puntos refleje la importancia relativa de los atributos. Para el método de estimación de la proporción, primero se determina el atributo menos importante.

A continuación, se pregunta cuán importante es cada atributo cuando relacionado con el menos importante. Por último, para la ponderación del peso, se cuestiona cuánto contribuye un atributo al valor global de las alternativas en relación con otros atributos. Por lo general, con este método se proporciona una elección entre perfiles que reflejan los peores y mejores niveles de cada atributo. Se pide indicar cuál de las diferencias entre el peor y el mejor nivel (llamado columpios) que más contribuye al valor total. Entonces, la medida en que las oscilaciones de valor difieren entre los atributos se evalúa dejando asignar una puntuación a la importancia relativa del rango cuando se compara con el rango más importante. Por ejemplo, un perfil que consiste en una vivienda con dos habitaciones y un patio trasero de 5 m (los peores niveles) se compara con un perfil que consiste en una vivienda con cinco habitaciones y un patio trasero de 15 m (los mejores niveles). El demandado primero indica que el cambio de dos a cinco habitaciones es más importante que el cambio desde un patio trasero de 5-15 m de longitud. A continuación, el encuestado indica que este columpio es cuatro veces menos importante que el columpio de dos a cinco habitaciones.

Una vez que se han recogido las puntuaciones de la importancia de los atributos, éstas se transforman en ponderaciones dividiendo, para cada encuestado, la calificación de cada atributo por la suma de todas las calificaciones.

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i}$$

Donde  $w'_i$  es el peso de la proporción no normalizada y  $w_i$  el peso normalizado. De esta manera se obtienen pesos individuales para cada atributo que suman 1.0, como es convencional en la teoría de la utilidad de los atributos múltiples (Jansen, 2011).

### **4.6.3 Lógica difusa**

La lógica difusa es una herramienta para la clasificación de impacto ecológico, diseño de indicadores ambientales, ingeniería industrial verde, y evaluación de modelos ambientales. Hace que la evaluación de alternativas se consiga midiendo el grado en que se logran los objetivos establecidos. Se basa en cinco pasos:

1. Selección de las propiedades de cada impacto ambiental.
2. Asignación de un parámetro no dimensional para cada propiedad.
3. Definición de una función de evaluación para cada propiedad o de importancia difusa.
4. Se grafican las funciones y finalmente se realiza un
5. Análisis de correlación.

Estos métodos permiten incluir las dimensiones sociales, ambientales, técnicas, económicas y financieras. Son útiles cuando se pueden establecer criterios de priorización de acuerdo a requerimientos normativos y objetivos de calidad de ciertos componentes del ambiente. Además, estos métodos permiten el cálculo del impacto ambiental.

Su desventaja es de especial cuidado en la asignación de pesos. Otra limitante es que los tomadores de decisiones pueden no estar dispuestos a revelar todas sus preferencias personales, por temor a socavar su negociación. El éxito de estos métodos está en la definición de propiedades e intervalos, eso es lo humano del modelo y lo que puede errar.

### **4.6.4 Criterios relevantes VIA**

Este método consiste en obtener un valor numérico para cada impacto que provocará un proyecto, al ponderar su evaluación a través de diversos indicadores, que se utilizan en evaluaciones de impacto de carácter cualitativo, con la diferencia que el valor de impacto ambiental

(VIA) los integra en un valor complejo que representara globalmente la relevancia del impacto. Los indicadores que conforman el índice de VIA para cada impacto ambiental son:

- i. Riesgo (probabilidad de que el impacto se produzca durante la vida del proyecto).

Para determinar el riesgo generalmente se utiliza la siguiente formula:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{t_r}\right)^n$$

Donde:

R: riesgo

n: duración o vida útil del proyecto

$t_r$ : período de retorno del evento

En algunos casos, si existen datos estadísticos, se emplea esa información. En otros casos puede ser muy difícil o innecesario precisar el riesgo y, por tanto, simplemente éste se establece según el criterio del especialista en términos de: alto, medio, bajo y nulo. Lógicamente que cuando el riesgo que ocurra el impacto es cero, ello significa que no es necesario continuar evaluando el impacto en el sitio bajo análisis (Cywiak, s.f).

- ii. Intensidad (Cuantificación de la fuerza o vigor con que se manifiesta el impacto)

Generalmente es el indicador que muestra el valor del cambio. Para ello es necesario buscar una función que permita valorarlo, la cual se acostumbra a llamar función de transformación o función de valor. Esta función permite, por ejemplo, expresar la pérdida de la calidad del agua en términos de la reducción de mg/l de oxígeno disuelto, o de disminución de pH desde

7 a 5.5 y así sucesivamente. Es frecuente el uso de fórmulas y modelos para predecir los cambios.

iii. Extensión (medida del ámbito espacial o superficie en que ocurre la afectación)

En general se expresa en términos de superficie, pero también puede hacerse como porcentaje de la superficie afectada sobre la total del proyecto. En otros casos, por ejemplo, en proyectos a desarrollar en corredores o derechos de paso, puede ser más práctico valorarlos en términos de longitud o de porcentaje de la longitud total. Finalmente, en otros casos, cuando no sea fácil cuantificarla, el especialista puede establecer diferencias cualitativas de la extensión al calificarla como: regional, general en el proyecto, local o puntual.

iv. Duración (Período de tiempo durante el cual se ejercen las acciones que generan el impacto)

Se mide en el número de años que dura la acción que genera el impacto. Los intervalos que se usan en este caso normalmente son: desde permanentemente (durante toda la vida del Proyecto), hasta más de 10 años, de 5 a 10 años, de 2 a 5 años y desde menos de 2 hasta instantánea. En algunos casos se incluyen consideraciones especiales para valorar mejor el indicador, como el carácter de continuidad o intermitencia del impacto; por ejemplo, si hay un riesgo permanente de que ocurra, pero sólo en un período o fracción de tiempo. En algunos casos especiales puede ser importante valorar el tiempo que tarda en manifestarse un impacto desde el momento en que se inicia la acción generadora, dado que, si éste es largo, hay más posibilidades de prevenirlo tomando en cuenta las medidas necesarias. En este caso, frecuentemente se establecen las categorías siguientes; impacto inmediato a la acción generadora o hasta 1 mes después; ocurrencia rápida, cuando demora entre 1 mes a 1 año en manifestarse;

media, entre 1 a 2 años; y tardía cuando requiera más de 2 años. Si este criterio se maneja como indicador individual, se identifica como Desarrollo.

- v. Reversibilidad (expresión de la capacidad del medio para retornar a una condición similar a la original).

Evidentemente, una vez que cesa la acción generadora del impacto y se produce un nuevo equilibrio, es posible cuantificar criterios o atributos que permitan comparar las condiciones antecedentes del medio con las posteriores a la alteración, pero como la evaluación tiene un carácter predictivo, la comparación normalmente se lleva a cabo a través de la revisión bibliográfica o experiencia del especialista en casos similares que muestren la mayor o menor capacidad de recuperación del ambiente. En algunos casos se emplean criterios de valoración, simples o complejos, que se correlacionan en alguna medida con la reversibilidad, por ejemplo, condiciones edáficas, clima, biodiversidad original del medio afectado, etc. Por otra parte, en algunos casos se conoce la mayor o menor efectividad de las medidas que pueden aplicarse luego de la manifestación del impacto, de manera que cuando existen medidas correctivas se habla de que el impacto es reversible, y en el otro extremo, se considera irreversible cuando no hay medida, por lo menos económicamente factible, capaz de facilitar el retorno del medio una condición similar a la original.

Para la elaboración de la fórmula se consideran los siguientes aspectos:

#### I. Escala de valores

Inicialmente se resolvió escoger una escala del 1 al 10, asignando el mínimo valor (1) cuando el criterio bajo análisis no sufría casi ningún cambio y el máximo (10) cuando se esperaba que éste fuese radical. Sin embargo, repetidos análisis de sensibilidad mostraron que no era necesario utilizar toda la escala de valores, sino que bastaba emplear sólo algunos de éstos,

de modo que se tomó la costumbre de usar sólo las cantidades 2, 5, y 10 para reportar cambios bajos o escasos, medios y altos respectivamente. Más recientemente se ha visto la tendencia a emplear también el valor de 7, adicionalmente a los ya citados.

## II. Peso por asignar a cada indicador

Desde la primera evaluación que utilizó el método, se reconoció que no necesariamente todos los indicadores tenían igual importancia. Por ello quedó claro que el valor de impacto no debía resultar de un promedio simple de los valores asignados a cada indicador, sino de una ponderación de estos. En consecuencia, a fin de determinar el peso de cada uno, se utilizó entre los diferentes especialistas participantes en la evaluación la técnica de consenso del Método Delphi, para seleccionar los ponderados o pesos.

Para determinar el valor del impacto ambiental se utiliza la siguiente ecuación:

$$VIA = Mi^{wm} * Pi^{wp} * Ri^{wpr}$$

Donde:

VIA: valor del impacto ambiental

Mi: magnitud asignada

Pi: posibilidad de ocurrencia o riesgo

Ri: reversibilidad

wm: peso con que se pondera la magnitud

wp: peso con que se pondera la posibilidad de ocurrencia

wpr: peso con que se pondera la reversibilidad

La magnitud se calcula de la siguiente ecuación:

$$Mi = (Ii * w_I + Ei * w_E + Di * w_D)$$

Donde:

Ii: intensidad

Ei: extensión

Di: duración

$w_I$ : peso con que se pondera la intensidad

$w_E$ : peso con que se pondera la extensión

$w_D$ : peso con se pondera la duración

Para mayor simplicidad, se generalizó el uso de la fórmula lineal, tal como se expresa a continuación:

$$VIA = (Pi * w_p) + (Ii * w_I) + (Ei * w_E) + (Di * w_D) + (Ri * w_R)$$

Algunos valores asignados a pesos, que se recomiendan en la metodología, se muestran a continuación:

$w_I$ : 0.40

$w_E$ : 0.40

$w_D$ : 0.20

$w_M$ : 0.61

$w_P$ : 0.22

$w_R$ : 0.17

Las escalas de medición de cada uno de los criterios, según la metodología, se representan a continuación, en la Tabla 4.15:



Tabla 4.15 Escalas de medición por criterio.

<b>Criterio</b>	<b>Rango de criterio</b>	<b>Valoración</b>
Intensidad	Alta	7 - 9
	Media	4 - 6
	Baja	1 - 3
Duración	Plazo largo >10 años	10
	Plazo mediano 5-10 años	5
	Plazo corto 1-5 años	2
Extensión	Generalizado	10
	Local	5
	Muy local	2
Reversibilidad	Irreversible/baja o irrecuperable >50 años	10
	Parcialmente reversible/media	5
	Reversible/alta	2
Posibilidad de ocurrencia	Alta	10
	Media	5
	Baja	2

vi. Severidad de los impactos

Se define como el nivel de impacto ocasionado sobre los factores ambientales, permitiendo conocer si el impacto es leve, moderado, severo o crítico; para en función de ello, precisar si el proyecto es viable, si está en etapa de construcción; y orientar la aplicación de un plan de manejo ambiental adecuado y optimizar, prevenir, controlar, mitigar, las acciones producidas por el proyecto, si este ya se encuentra implementado. La severidad (S) de cada impacto es directamente proporcional a la multiplicación de la Magnitud por el Valor de Índice Ambiental (VIA) de cada impacto, conforme la siguiente fórmula:

$$S = M \times VIA$$

Para clasificar los impactos se ha definido una escala de valores, la cual indica la severidad; la misma que se ha realizado considerando los procedimientos de la escala que tiene un valor

mínimo (0) y un máximo (10), que han sido utilizados para la calificación de los impactos identificados. En función de ello, se desprende que los impactos positivos más altos tendrán un valor de 100 cuando se trate de un impacto: alto, regional, a largo plazo e irreversible a largo plazo; o menor a 100 cuando se trate de un impacto de similares características, pero de carácter “perjudicial o negativo”. Esta clasificación se presenta en la Tabla 4.16:

*Tabla 4.16 Escala de Valoración de Incidencia de los Impactos*

<b>Severidad del impacto</b>	<b>Escala</b>
Representativo (Impacto Beneficioso o positivo)	0-100
Leve	0-5.9
Moderado	6.0-15.9
Severo	16.0-39.9
Critico (Impacto adverso)	40.0-100

FUENTE: (Greenleaf Ambiental Company Cia, sf)

Por lo tanto, de acuerdo con el puntaje obtenido un impacto puede ubicarse en alguna de las siguientes categorías:

1. Impacto Leve: La carencia del impacto, o la recuperación inmediata tras el cese de la acción. No se necesita aplicar prácticas mitigadoras.
2. Impacto Moderado: La recuperación de las condiciones iniciales requiere cierto tiempo. Se precisan prácticas de mitigación simples.
3. Impacto Severo: La magnitud del impacto exige, para la recuperación de las condiciones, la adecuación de prácticas específicas de mitigación. La recuperación necesita un período de tiempo dilatado.
4. Impacto Crítico: La magnitud del impacto es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales sin posibilidad de su recuperación, incluso con la adopción de prácticas de mitigación.

5. Impacto Representativo: Se refiere a los impactos con carácter positivo que no producen pérdidas, al contrario, traen beneficios ambientales, sociales, económicos, técnicos (Greenleaf Ambiental Company Cia, sf).

Entre las desventajas de este método se tienen:

1. No analiza la situación sin proyecto.
2. No incorpora directamente las medidas de control ambiental.
3. No analiza los encadenamientos de efectos.
4. Negligencia por parte de algunos evaluadores en una definición clara de la localización geográfica específica de ocurrencia del impacto dentro del área de influencia del proyecto. Es importante señalar tanto la fuente de la acción generadora, como el sitio donde se manifiesta el impacto, siendo que éstos pueden o no coincidir. De esta manera se pueden precisar, tanto las medidas requeridas como los controles y seguimientos a llevar a cabo.
5. No pondera los impactos entre sí, lo cual conduce a que se le dé igual atención a aquellos impactos que hayan obtenido puntajes similares, cuando en la realidad se tiene que unos son más importantes que otros.

Este es el método de mayor aceptación por parte de las Compañías Asesoras ya que posee un esquema de trabajo generalizado, así como un procedimiento estandarizado y sencillo a seguir. No se quiere decir en ningún momento que este es el mejor método. Cada método tiene sus ventajas y desventajas. Lo importante es saber visualizar los posibles impactos a todo nivel y seguidamente analizar cada impacto de la forma más objetiva posible, tomando en cuenta los alcances y las desventajas del método escogido y evaluando el impacto que se encuentre con valores dudosos, con ayuda de un comité multidisciplinario (Cywiak, s.f).

# **CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA TÉCNICO-AMBIENTAL DE VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE LA DESTILACIÓN SIMPLE DE SOLVENTES UTILIZADOS PARA EL LAVADO DE EQUIPO, EN LA FABRICACIÓN DE PINTURAS BASE SOLVENTE**

Para la selección de las tecnologías de valorización se deben considerar los aspectos técnicos de cada una de ellas, como lo son la disponibilidad de la tecnología, el nivel de desarrollo y complejidad de este; además de los requerimientos de espacio, insumos y equipo, teniendo en cuenta los impactos positivos o negativos sobre el medio ambiente y los aspectos económicos.

## **5.1 Selección de la alternativa de valorización**

Entre las tecnologías mencionadas en capítulos previos, existen muchas que representan un costo alto de inversión, de operación o que necesitan adicionalmente un método de disposición final. Tecnologías como las mencionadas en la valorización energética, como pirólisis, gasificación y plasma, no están disponibles en el país o no se encuentran tan desarrolladas como para anticipar futuros efectos negativos al medio ambiente. En el caso de la valorización de materia prima para uso secundario, no se conoce ninguna capaz de reutilizar este tipo de residuos para dichos fines fuera del rubro de pinturas base solvente debido a su naturaleza química, al igual que para su uso como control de control de contaminantes. En cambio, alternativas como la valorización directa nos permiten tratar los residuos de forma in situ, sin representar un alto costo de inversión debido a que mucho de los insumos y equipos necesarios ya son parte del

proceso productivo de la fabricación de pinturas base solvente; contribuyendo así a una economía circular, no solo disminuyendo el volumen de residuos peligrosos generados, sino también el uso de materia prima virgen o primaria. Otra alternativa a considerar es el coprocesamiento debido a su alto potencial de recuperación de energía y reducción del volumen de contaminantes, para luego incorporarse en la fabricación de productos como el cemento. Esta alternativa es versátil con respecto al tipo de residuos a tratar y tiene un bajo requerimiento de superficie terrestre comparado con otros tipos de valorización. Es por estas razones, las únicas alternativas de valorización a considerar en la presente investigación serán el coprocesamiento y la valorización directa.

## **5.2 Evaluación de impacto ambiental de las tecnologías seleccionadas**

A pesar de que existen diversas metodologías de evaluación de impacto ambiental, no todas son capaces de evaluar todas las etapas de diferentes tipos de proyecto. La elección del método dependerá de la información recopilada, la experticia de los evaluadores y de la profundidad de la evaluación.

Debido a las dimensiones de las alternativas seleccionadas es conveniente usar un análisis multicriterio que permita la toma de decisión evaluando diversos criterios que a menudo generan conflicto. Uno de los métodos que cumple estos requisitos es el de Criterios Relevantes Integrados (VIA), ya que puede utilizarse en forma complementaria de otros contribuyendo a hacer más explícitos los criterios aplicados para la valorización.

Es relativamente fácil de aplicar y adaptar a distintas situaciones con mayor o menor cantidad de información o con métodos computarizados.

El método permite variar las valoraciones o ponderaciones a fin de analizar la sensibilidad o robustez del procedimiento a los criterios empleados, además de obtener resultados unitarios, parciales y globales, facilitando la comparación de alternativas y la identificación de áreas sensibles.

## **5.2.1 EIA de coprocesamiento**

### **5.2.1.1 Descripción de la alternativa de coprocesamiento**

Este proceso comienza con la recepción de los residuos en la planta de coprocesamiento, donde son analizados para determinar si estos son aptos o no para ser coprocesados. Luego de ser analizados, se separan para dar un tratamiento previo como trituración y mezcla.

Los residuos pueden ser utilizados de formas diferentes, ya sea como materia prima para la fabricación de cemento o como combustible para los hornos de las cementeras. Si es escogido para materia prima, este entrará al horno junto con piedra caliza y arcilla.

Por otro lado, si es utilizado como combustible, este será depositado en el horno con el aceite y el carbón. En ambos casos, los residuos serán destruido por las altas temperaturas del horno de cemento.

### **5.2.1.2 Descripción de componentes ambientales en el área de influencia del proyecto**

A continuación, en la Tabla 5.1 se presentan los componentes ambientales de mayor relevancia y se especifican de qué forma afectan a cada factor ambiental, así como también se hace una pequeña descripción de su afectación a cada uno.

Tabla 5.1 Componentes ambientales en el área de influencia del proyecto - Coprocesamiento.

Componente ambiental		Factor Ambiental	Descripción
Físico	Aire	Calidad del aire	Presencia de vapores orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero.
		Ruido	Incremento de los niveles de presión sonora
	Paisaje	Pasaje	Alteración del pasaje natural
Socioeconómico	Social	Salud y seguridad	Salud ocupacional y riesgos laborales a las personas que trabajan en el proceso de valorización
	Económico	Dinamización económica	Reducción de uso de materias primas vírgenes o primarias
		Servicios	Manejo de desechos

### 5.2.1.3 Matrices de identificación y evaluación de impactos

En las matrices de identificación y evaluación de impactos, las celdas sombreadas corresponden a los factores que se ven afectados por las actividades del proyecto. En la evaluación del criterio *impacto*, el signo negativo indica una afectación perjudicial y el signo positivo, una mejora ambiental en el factor evaluado. En el caso de la calidad de vida, como se muestra en la Tabla 5.2, se ve afectada positivamente con la recepción, análisis de la muestra y pretratamiento de los residuos, debido a que es necesario contratar personal calificado. El factor económico también es impactado de manera positiva por la prestación de servicios de disposición de residuos y a la recuperación del valor energético y material; por otro lado, la salud y seguridad ocupacional se ve afectada negativamente por los riesgos inherentes al proceso, entre los que se pueden destacar la exposición a vapores tóxicos y/o partículas volátiles que pueden causar, disminución de las funciones pulmonares, irritación de ojos y vías respiratorias. El factor medio físico también se ve impactado de forma negativa por las actividades de pretratamiento e incineración de residuos en altos hornos.

Tabla 5.2 Evaluación del criterio impacto de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				+	-		
Análisis de la muestra de residuos				+	-		
Pretratamiento de residuos	-	-	-	+	-		
Incineración de residuos en altos hornos		-			-	+	+

La evaluación del criterio de *intensidad*, de acuerdo con el valor que alcance su impacto pueden clasificarse como alto, medio y bajo, según la Tabla 5.3.

En este caso, como se puede observar en la Tabla 5.4, la calidad de vida tiene asignado el valor de dos (lo que implica un impacto bajo) puesto que a pesar de que se necesita personal para las actividades de recepción y análisis, el número de personas requeridas es bajo. Y para las actividades de pretratamiento e incineración el personal necesario es el mismo que se requiere para el proceso productivo de cemento. El ruido por el contrario tiene una evaluación alta por los niveles sonoros producidos por la maquinaria en las actividades de pretratamiento e incineración es alto.



Tabla 5.3 Evaluación del criterio intensidad de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2	4		
Análisis de la muestra de residuos				2	3		
Pretratamiento de residuos	8	9	7	2	8		
Incineración de residuos en altos hornos		9			8	9	9

Tabla 5.4 Rango de criterio para evaluación de la intensidad de la alternativa de coprocesamiento.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Intensidad	Alta	7 - 9
	Media	4 - 6
	Baja	1 - 3

Para la evaluación del criterio de extensión, la Tabla 5.5 muestra el valor asignado según la evaluación. Por ejemplo, el medio físico tiene una valoración local dado que las actividades afectan tanto la planta como sus alrededores y el factor social cultural fue evaluada de manera muy local porque sus actividades impactan a las personas involucradas directamente.

En cambio, el factor económico resultó ser generalizado ya que los servicios de coprocesamiento tienen un alto impacto porque muchas empresas llegan a utilizarlo.

La Tabla 5.6 indica la valoración por rango de criterio, el número dos indica un impacto muy focalizado (o muy local), en cambio el número cinco denota un impacto en un área local de

donde ocurre la actividad, por último, el número diez significa que el impacto afecta a un área demasiado grande.

*Tabla 5.5 Evaluación del criterio extensión de la alternativa de coprocesamiento.*

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2	2		
Análisis de la muestra de residuos				2	2		
Pretratamiento de residuos	5	5	5	2	2		
Incineración de residuos en altos hornos		5			2	10	10

*Tabla 5.6 Rango de criterio para evaluación de la extensión de la alternativa de coprocesamiento.*

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Extensión	Generalizado	10
	Local	5
	Muy local	2

La duración de la mayoría de los impactos resulto ser baja, debido a que casi la mayoría dura mientras el proyecto este activo.

Como se puede observar en la Tabla 5.7, únicamente el paisaje se vería afectado años después aun cuando la planta de coprocesamiento detuviera sus operaciones. El rango de valores utilizado para evaluar este criterio se presenta en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7 Evaluación del criterio duración de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2	2		
Análisis de la muestra de residuos				2	2		
Pretratamiento de residuos	2	2	5	2	2		
Incineración de residuos en altos hornos		2			2	2	2

Tabla 5.8 Rango de criterio para evaluación de la duración de la alternativa de coprocesamiento.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Duración	Plazo largo >10 años	10
	Plazo mediano 5-10 años	5
	Plazo corto 1-5 años	2

En la Tabla 5.9 se aprecia que la mayoría de los factores presentan una reversibilidad alta, dado que las afectaciones a los diferentes factores por actividad evaluada se pueden corregir una vez que se finalice el proyecto.

La afectación al paisaje resulto parcialmente reversible debido a que el daño causado sobre este, no se resuelve, si se finalizan las operaciones de la planta de coprocesamiento. Mientras que el daño a la salud es irreversible, como por ejemplo un daño auditivo o una quemadura producto de algún incidente que pueda ocurrir en las actividades de incineración de los residuos.

Tabla 5.9 Evaluación del criterio reversibilidad de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2	2		
Análisis de la muestra de residuos				2	2		
Pretratamiento de residuos	2	2	5	2	10		
Incineración de residuos en altos hornos		2			10	2	2

La Tabla 5.10 establece el rango del criterio de reversibilidad de acuerdo con la valoración que se obtenga.

Tabla 5.10 Rango de criterio para evaluación de la reversibilidad de la alternativa de coprocesamiento.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Reversibilidad	Irreversible/baja o irrecuperable >50 años	10
	Parcialmente reversible/media	5
	Reversible/alta	2

La Tabla 5.11 muestra la posibilidad de ocurrencia de un evento. Para caso del ruido su ocurrencia es alta (valor de diez) ya que al encender la maquinaria este siempre volverá a ocurrir, para el factor pretratamiento su posibilidad será media (valor de cinco) al afectar a la salud y seguridad ya sea por la vibración de los equipos o el ruido generado, en cambio la ocurrencia del análisis de la muestra de residuos para perjudicar la salud y seguridad es baja (valor de dos) ya que es muy poco probable que ocurran accidentes.

El rango de valores utilizado para su evaluación se muestra en la Tabla 5.12.

*Tabla 5.11 Evaluación del criterio posibilidad de ocurrencia de la alternativa de coprocesamiento.*

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES					
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				10	2	
Análisis de la muestra de residuos				10	2	
Pretratamiento de residuos	10	10	10	10	5	
Incineración de residuos en altos hornos		10			5	10

*Tabla 5.12 Rango de criterio para evaluación de la posibilidad de ocurrencia de la alternativa de coprocesamiento.*

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Posibilidad de ocurrencia	Alta	10
	Media	5
	Baja	2

Los resultados obtenidos para la magnitud de cada actividad se presentan en la Tabla 5.13 y se realizaron a partir de los criterios de intensidad, extensión y duración, con sus respectivos pesos. De los cuales la mayoría resultaron numéricamente bajos, en especial la calidad de vida dado que la extensión y la intensidad obtuvieron el valor más bajo.

Tabla 5.13 Cálculo de la magnitud de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2	2.8		
Análisis de la muestra de residuos				2	2.4		
Pretratamiento de residuos	5.6	6	5.8	2	4.4		
Incineración de residuos en altos hornos		6			4.4	8	8

En la Tabla 5.14 el valor del VIA se determinó a partir de la magnitud, posibilidad de ocurrencia y reversibilidad, en conjunto con sus respectivos pesos con que se ponderan. El valor numérico más bajo corresponde a la salud y seguridad ocupacional en la actividad de análisis de muestra. Mientras que el nivel más alto se obtuvo para el factor económico en la actividad de incineración debido a que la magnitud también obtuvo un valor alto en dicha actividad.

Tabla 5.14 Cálculo del valor del impacto ambiental de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				2.8	2.5		
Análisis de la muestra de residuos				2.8	2.2		
Pretratamiento de residuos	5.3	5.6	6.4	2.8	5.2		
Incineración de residuos en altos hornos		5.6			5.2	6.6	6.6

Como puede observarse en la Tabla 5.15, se obtuvo como único impacto moderado la salud y seguridad ocupacional en la actividad de recepción de residuos en planta. Además, se obtuvieron cuatro impactos leves, seis impactos severos, y se generaron 2 impactos críticos, a los que hay que prestarles especial atención, estos corresponden al factor económico en la actividad de incineración de residuos en altos hornos, por lo que es necesario la adopción de prácticas de mitigación.

Tabla 5.15 Cálculo de la severidad de la alternativa de coprocesamiento.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES						
	MEDIO FÍSICO			SOCIO ECONOMICO			
	AIRE		PAISAJE	SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
	Calidad de aire	Ruido	Paisaje	Calidad de vida	Salud y seguridad	Servicios	Dinamización económica
Recepción de residuos en planta				5.7	6.9		
Análisis de la muestra de residuos				5.7	5.4		
Pretratamiento de residuos	29.9	33.4	37.0	5.7	22.9		
Incineración de residuos en altos hornos		33.4			22.9	53.1	53.1

La Tabla 5.16, nos permite clasificar la severidad de los impactos de acuerdo con el puntaje que alcancen. Un impacto puede ser leve, moderado, severo y crítico.

Tabla 5.16 Escala de valoración de incidencia de impactos utilizada en la evaluación de impacto ambiental para la alternativa de coprocesamiento.

Severidad del impacto	Escala
Leve	0-5.9
Moderado	6.0-15.9
Severo	16.0-39.9
Crítico (Impacto adverso)	40.0-100

FUENTE: (Greenleaf Ambiental Company Cia, sf)

## **5.2.2 EIA de la valorización directa**

### **5.2.2.1 Descripción de alternativa de valorización directa**

Como se detalló en capítulos anteriores, una de las salidas del proceso productivo son los lodos provenientes del proceso de destilación simple de solventes obtenidos del lavado de equipo.

Estos lodos deben ser recolectados y llevados a la planta de producción para su preparación y para su posterior adición a la pintura terminada. En la etapa de preparación, estos serán colocados en un carro de preparación junto con la proporción adecuada de solvente para mantener sus propiedades reológicas.

Esta proporción debe calcularse tomando en cuenta la cantidad y el tipo de solvente dentro la formulación. Una vez preparados, se deben añadir durante mezcla constante a la pintura terminada para su completa incorporación.

Cabe resaltar que para la valorización directa solo podrán utilizarse aquellos lodos que posean un tiempo de reposo menor a dos días luego del proceso de destilación y solo podrán incorporarse a pinturas completadas que posean tonalidades oscuras como es el caso del negro y gris, además de esto se deben realizar las pruebas de compatibilidad necesarias ya que es una nueva alternativa de valorización y los cambios que puede ocasionar en las propiedades de la pintura no han sido estudiados hasta la fecha.

### **5.2.2.2 Descripción de componentes ambientales en el área de influencia del proyecto**

En la Tabla 5.17 se presentan aquellos componentes ambientales de mayor relevancia para el caso de la valorización directa.



Tabla 5.17 Componentes ambientales en el área de influencia del proyecto – Valorización directa.

Componente ambiental		Factor Ambiental	Descripción
Físico	Aire	Calidad del aire	Presencia de vapores orgánicos
		Ruido	Incremento de los niveles de presión sonora
Socioeconómico	Social	Salud y seguridad	Salud ocupacional y riesgos laborales a las personas que trabajan en el proceso de valorización
	Económico	Dinamización económica	Reducción de uso de materias primas vírgenes
Manejo de desechos			

### 5.2.2.3 Matrices de identificación y evaluación de impactos

Para la evaluación de los criterios las celdas sombreadas corresponden a los impactos de mayor relevancia de acuerdo con las actividades a los que corresponden. Los impactos tanto positivos como negativos de cada actividad se presentan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18 Evaluación del criterio impacto de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				-	
Transporte interno de lodos				-	
Preparación de los lodos	-	-		-	
Pruebas de compatibilidad	-		+	-	
Incorporación de lodos a pintura terminada	-	-		-	+

En la evaluación del criterio de intensidad, los valores obtenidos para cada factor y sus actividades correspondientes se muestra en la Tabla 5.19. En el caso de la salud y seguridad ocupacional, los impactos resultaron de intensidad media debido a que el personal encargado de las actividades de valorización directa está expuesto a una serie de riesgos, sin embargo, estos pueden minimizarse con el uso de equipo de protección personal adecuado. Por otra parte, la calidad de vida resulto ser de intensidad baja, porque aun cuando se generará empleo para el desarrollo de las actividades del proceso, el personal que se requerirá será mínimo. El único factor que resulto ser de intensidad alta fue el económico, específicamente hablando de la dinamización de la economía, dado que el hecho de incorporar los residuos al proceso productivo resulta ser un impacto positivo muy significativo para la empresa, ya que los orienta a una economía circular, reduciendo sus costes de tratamiento de residuos y reducción de materias primas vírgenes o primarias.

*Tabla 5.19 Evaluación del criterio intensidad de la alternativa de valorización directa.*

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				6	
Transporte interno de lodos				6	
Preparación de los lodos	4	2		6	
Pruebas de compatibilidad	3		1	6	
Incorporación de lodos a pintura terminada	4	2		6	9

De acuerdo con la Tabla 5.20, la intensidad se clasifica de acuerdo con la valoración asignada como: alta, media y baja. Siendo la intensidad alta, la que mayor atención requiere si su impacto se clasifica como negativo.

*Tabla 5.20 Rango de criterio para evaluación de la intensidad de la alternativa de valorización directa.*

<b>Criterio</b>	<b>Rango de criterio</b>	<b>Valoración</b>
Intensidad	Alta	7 - 9
	Media	4 - 6
	Baja	1 - 3

Para la evaluación del criterio extensión y tomando como base los rangos de valores presentados en la Tabla 5.22, se obtiene que todas las actividades son valoradas como muy locales (Ver Tabla 5.21). Esto se debe a que esta alternativa de realización se hace dentro de la planta de producción.

*Tabla 5.21 Evaluación del criterio extensión de la alternativa de valorización directa.*

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				2	
Transporte interno de lodos				2	
Preparación de los lodos	2	2		2	
Pruebas de compatibilidad	2		2	2	
Incorporación de lodos a pintura terminada	2	2		2	2

Tabla 5.22 Rango de criterio para evaluación de la extensión de la alternativa de valorización directa.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Extensión	Generalizado	10
	Local	5
	Muy local	2

En la evaluación del criterio de duración, como se presenta en la Tabla 5.23, solo la dinamización económica representa un impacto de larga duración, ya que se promueven nuevas tecnologías, potenciando el uso de los recursos a largo plazo.

Por otra parte, el factor social cultural resulto ser de mediana duración, debido a que algunas de las repercusiones a la salud podrían persistir en el tiempo; mientras que el medio físico se vería afectado a un corto plazo, es decir menor a cinco años, ya que su afectación no sobrepasaría este tiempo en caso de que la fábrica cierre operaciones. La Tabla 5.24 presenta la clasificación del criterio de duración.

Tabla 5.23 Evaluación del criterio duración de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				5	
Transporte interno de lodos				5	
Preparación de los lodos	2	2		5	
Pruebas de compatibilidad	2		5	5	
Incorporación de lodos a pintura terminada	2	2		5	10

Tabla 5.24 Rango de criterio para evaluación de la duración de la alternativa de valorización directa.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Duración	Plazo largo >10 años	10
	Plazo mediano 5-10 años	5
	Plazo corto 1-5 años	2

En la Tabla 5.25 se presenta la evaluación del criterio de reversibilidad. Para la dinamización económica se muestra una reversibilidad alta dado que es directamente proporcional a la operación de la planta. Para el factor salud y seguridad se observa una reversibilidad media, ya que la exposición a estos deja daños a mediano plazo si no se toman las medidas adecuadas, en cambio, para el factor del ruido tiene una reversibilidad alta dado que una vez se terminen las operaciones, el impacto ya no sigue afectando.

Tabla 5.25 Evaluación del criterio reversibilidad de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				5	
Transporte interno de lodos				5	
Preparación de los lodos	5	2		5	
Pruebas de compatibilidad	5		5	5	
Incorporación de lodos a pintura terminada	5	2		5	2

La Tabla 5.26 muestra la clasificación del criterio de reversibilidad de acuerdo con el valor que se obtenga en la evaluación.

Tabla 5.26 Rango de criterio para evaluación de la reversibilidad de la alternativa de valorización directa.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Reversibilidad	Irreversible/baja o irrecuperable >50 años	10
	Parcialmente reversible/media	5
	Reversible/alta	2

En la evaluación de la *posibilidad de ocurrencia*, según la Tabla 5.27, se obtuvo un valor medio para el factor aire dado que, si bien el uso de solventes contribuye a las emisiones de VOC, su afectación no es representativa comparada con otras etapas del proceso productivo. Por otro lado, el aumento en la calidad de vida tiene una ocurrencia alta ya que la contratación de personal es inevitable para realizar el proceso de valorización. La salud y seguridad presentan una posibilidad baja ya que, si se toman las medidas preventivas necesarias, la posibilidad de repercusiones a la salud disminuye.

Tabla 5.27 Evaluación del criterio posibilidad de ocurrencia de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				2	
Transporte interno de lodos				2	
Preparación de los lodos	5	5		2	
Pruebas de compatibilidad	5		10	2	
Incorporación de lodos a pintura terminada	5	5		2	5

Los rangos de valores utilizados para este criterio se presentan en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28 Rango de criterio para evaluación de la posibilidad de ocurrencia de la alternativa de valorización directa.

Criterio	Rango de criterio	Valoración
Posibilidad de ocurrencia	Alta	10
	Media	5
	Baja	2

Para el calcular el valor de la *magnitud* que se muestra en la Tabla 5.29, se realizó a partir de los criterios de intensidad, extensión y duración, junto con sus respectivos pesos. De los cuales la mayoría resultaron numéricamente bajos, en especial el ruido y la calidad de vida dado que, en la evaluación de la extensión y la intensidad, se obtuvieron valores bajos.

Por el contrario, el factor que obtuvo la evaluación más alta es el económico, pero dado a que es un impacto positivo, el valor numérico es una buena representación. No se puede concluir de la misma forma para el factor salud y seguridad ya que obtuvieron una calificación relativamente alta pero su impacto resulta ser negativo.

Tabla 5.29 Cálculo de la magnitud de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				4.2	
Transporte interno de lodos				4.2	
Preparación de los lodos	2.8	2		4.2	
Pruebas de compatibilidad	2.4		2.2	4.2	
Incorporación de lodos a pintura terminada	2.8	2		4.2	6.4

Para la Tabla 5.30 el valor del VIA se calculó a partir de la magnitud, posibilidad de ocurrencia y reversibilidad, en conjunto con sus respectivos pesos con que se ponderan. El valor numérico más bajo corresponde al factor del ruido en las actividades de preparación de muestras e incorporación de lodos a la pintura terminada. Mientras que el nivel más alto se obtuvo para el factor económico en la actividad de Incorporación de lodos a pintura terminada debido a que la magnitud también obtuvo el valor más alto en dicha actividad.

Tabla 5.30 Cálculo del valor del impacto ambiental de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				3.8	
Transporte interno de lodos				3.8	
Preparación de los lodos	3.5	2.3		3.8	
Pruebas de compatibilidad	3.2		3.4	3.8	
Incorporación de lodos a pintura terminada	3.5	2.3		3.8	4.8

Para el caso de la *severidad*, se relacionaron los valores de magnitud y VIA de cada actividad. Como resultado de esto, se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 5.31, donde se evidencia que en el factor de salud y seguridad todos los impactos son clasificados como severos para todas las actividades implicadas, por lo cual es necesario implementar medidas prácticas para su mitigación.

En el caso del factor económico, este cae en el rango crítico, que corresponde a la actividad de Incorporación de lodos a pintura terminada pero su impacto es positivo debido al posible ahorro



por la disminución de materias primas vírgenes o primarias y a los costos de tratamiento de los residuos ex situ. Las demás actividades del proyecto fueron categorizadas como leves y moderadas.

Tabla 5.31 Cálculo de la severidad de la alternativa de valorización directa.

ACTIVIDAD	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES				
	MEDIO FÍSICO		SOCIO ECONOMICO		
	AIRE		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO
	Calidad de aire	Ruido	Calidad de vida	Salud y seguridad	Dinamización económica
Recolección de lodos				16.2	
Transporte interno de lodos				16.2	
Preparación de los lodos	9.8	4.7		16.2	
Pruebas de compatibilidad	7.7		7.5	16.2	
Incorporación de lodos a pintura terminada	9.8	4.7		16.2	30.4

La Tabla 5.32, muestra la clasificación de la severidad de los impactos de acuerdo con el puntaje que se ha determinado para cada actividad. Según esta escala los impactos pueden ser leves, moderados, severos y críticos. Cabe resaltar, que algunos impactos pueden ser minimizados adaptando medidas de mitigación, como equipo de protección personal.

Tabla 5.32 Escala de valoración de incidencia de impactos utilizada en la evaluación de impacto ambiental para la alternativa de valorización directa.

Severidad del impacto	Escala
Leve	0-5.9
Moderado	6.0-15.9
Severo	16.0-39.9
Crítico (Impacto adverso)	40.0-100

FUENTE: (Greenleaf Ambiental Company Cia, sf)

### 5.3 Comparación de alternativas seleccionadas

Luego de haber enunciado la evaluación de impacto ambiental para las dos alternativas de valorización, considerando los criterios de intensidad, extensión, duración, reversibilidad y posibilidad de ocurrencia, se obtuvieron los valores cuantitativos de la magnitud, el valor de impacto ambiental (VIA), para finalmente evaluar la severidad de cada factor ambiental evaluado. En la Tabla 5.33 se presenta la comparación de los impactos positivos y negativos, obtenidos por cada factor según su nivel de severidad. Como se puede observar para el medio físico, no hay ninguna afectación que sea considerada positiva en ambas alternativas. Por el contrario, todos los impactos asociados al factor económico son positivos, ya que ambas dinamizan en cierto grado la economía, al mismo tiempo que se da un tratamiento a los residuos.

El factor social-cultural se ve afectado en ambos sentidos ya que, aunque interfiere en la calidad de vida de forma positiva por la contratación de personal capacitado, se afecta en la salud y seguridad ocupacional de los trabajadores por los riesgos asociados a ambos procesos.

*Tabla 5.33 Factores y componentes ambientales afectados por cada alternativa de valorización.*

Alternativa de valorización	Severidad del impacto	FACTORES Y COMPONENTES AMBIENTALES					
		MEDIO FÍSICO		SOCIAL-CULTURAL		ECONOMICO	
		"+"	" -"	"+"	" -"	"+"	" -"
Coprocesamiento	Leve	No se ve afectado	0	3	1	0	No se ve afectado
	Moderado		0	0	1	0	
	Severo		4	0	2	0	
	Critico		0	0	0	2	
Valorización directa	Leve	No se ve afectado	2	0	0	0	No se ve afectado
	Moderado		3	1	0	0	
	Severo		0	0	5	0	
	Critico		0	0	0	1	

Teniendo en cuenta todos los impactos significativos se realizará la comparación de ambas alternativas de forma cualitativa tomando en cuenta los requerimientos técnicos de cada alternativa y sus impactos ambientales.

Para esto, en la Tabla 5.34 se presentan la cantidad de impactos según la severidad para cada alternativa, diferenciando entre positivos y negativos.

*Tabla 5.34: Cantidad de impactos según severidad para cada alternativa de valorización.*

Alternativa de valorización	Coprocesamiento		Valorización directa	
	"Impacto +"	"Impacto -"	"Impacto +"	"Impacto -"
Leve	3	1	0	2
Moderado	0	1	1	3
Severo	0	6	0	5
Critico (Impacto adverso)	2	0	1	0
Total	5	8	2	10

Para la selección de la mejor alternativa se realizó una escala ponderada desarrollada por el equipo a cargo de esta investigación, que ha sido denominada “Escala CPR de comparación de alternativas”.

En primer lugar, se establece un rango de valoración para los requerimientos técnicos, entre los cuales se consideran los siguientes:

- a) Transporte: Se refiere a la necesidad de movilizar los residuos del lugar donde se generan.
- b) Adquisición de equipos: Se refiere a la necesidad de adquisición de equipo en caso la empresa generadora decidiera realizarlo ella misma.
- c) Uso de espacio: Espacio necesario para realizar la valorización.

- d) Adquisición de personal: Contratación de personal capacitado para operar el equipo necesario para la valorización.
- e) Tiempo: Se refiere al tiempo necesario para procesar una muestra de lodos.
- f) Adquisición de EPP: Necesidad de adquisición de equipo de protección personal para minimizar los riesgos a la salud del personal.

Los valores por asignarse a cada requerimiento se seleccionarán de acuerdo a la Tabla 5.35.

*Tabla 5.35 Requerimientos técnicos de las alternativas de valorización*

Requerimientos técnicos	Descripción	Valoración
Transporte	Necesita	1
	No necesita	2
Adquisición de equipo	Necesita	1
	No necesita	2
Uso de espacio	Poco	3
	Considerable	2
	Grande	1
Adquisición de personal	Necesita	1
	No necesita	2
Tiempo	Corto	3
	Mediano	2
	Largo	1
Adquisición de EPP	Necesita	1
	No necesita	2

Además, se asignará un peso a los impactos según su nivel de severidad según la Tabla 5.36.

*Tabla 5.36 Pesos relativos de los impactos según su severidad.*

Impactos	Peso relativo
Leves	0.25
Moderados	0.50
Severos	0.75
Críticos	1.00

La fórmula por utilizar para calcular el valor del CPR de la escala es la siguiente:

$$CPR = \sum \text{Requerimientos técnicos} + \sum (\text{cantidad de impactos según su severidad} * \text{peso relativo})$$

Donde debe respetarse el signo de los impactos, es decir que los impactos negativos se deben restar en la sumatoria. La alternativa con la puntuación más alta será la que deberá seleccionarse.

Tabla 5.37 Comparación de alternativas por medio de escala CPR.

Tipo de valorización	Requerimientos técnicos						Impactos								TOTAL
	Trasporte	Adquisición de equipo	Uso de espacio	Personal	Tiempo	EPP	leves (+)	leves (-)	moderados (+)	moderados (-)	severos (+)	severos (-)	críticos (+)	críticos (-)	
Coprocesamiento	1	2	2	2	1	1	3	1	0	1	0	6	2	0	6.50
Valorización directa	2	2	3	1	3	1	0	2	1	3	0	5	1	0	7.75

Como se observa en la Tabla 5.37, la alternativa de coprocesamiento requiere que los residuos generados sean transportados hasta el lugar de su valorización por lo que se le asigna el valor de 1 para el requerimiento transporte, mientras que la valorización directa se le asigna el valor de 2 debido a que todo el proceso de valorización de residuos se lleva a cabo de forma in situ, esto quiere decir que se realiza en el sitio de su generación.

Para ambas alternativas de valorización, no se considera necesario la adquisición de equipo por lo que se asigna un valor de 2, ya que la valorización directa utilizará el mismo equipo empleado para la fabricación de pinturas y en el caso del coprocesamiento, la planta de coprocesamiento ya cuenta con el equipo necesario, que es el mismo utilizado para tratar una gran diversidad de residuos.

En cuanto al espacio necesario para realizar la valorización, al coprocesamiento se asignó el valor de 2, ya que en primer lugar se debe almacenar y recolectar una cantidad considerable de lodos para minimizar los costos de transporte de los residuos. El espacio utilizado para esta actividad puede presentarse como un costo de oportunidad para la empresa generadora, debido a que el espacio empleado para el almacenamiento podría ser aprovechado para la fabricación de pintura base solvente. A la valorización directa, se le asignó el valor de 3 en el requerimiento de espacio ya que los residuos se van valorizando de forma casi inmediata, evitando el uso innecesario de espacio de almacenamiento. Pero si se consideran para ambas alternativas la adquisición de personal capacitado, para el correcto manejo de los equipos y los residuos.

El tiempo empleado para coprocesar una muestra de lodos es relativamente mayor al tiempo invertido en el proceso de valorización directa si se considera el tiempo de transporte y de almacenamiento. Por otro lado, la adquisición de equipo de protección personal o EPP en ambos casos es necesario para minimizar los riesgos asociados a cada proceso como lo pueden ser: caídas, ruido, vibraciones, atrapamientos, avalanchas, derrames, inhalación de vapores, ambiente pulvigeno, golpes, dermatitis y daños al sistema respiratorio.

Para los impactos ambientales en el caso del coprocesamiento, como puede observarse en las Tablas 57 y 61, se obtuvieron 3 impactos leves positivos en la calidad de vida y 1 impactos leve negativo en la salud y seguridad ocupacional, 1 moderado negativo en la seguridad y salud ocupacional, 6 impactos severos negativos ocasionados por las actividades de pretratamiento e incineración de residuos y 2 críticos positivos para el factor económico, específicamente en servicios y dinamización económica. Al hacer el cálculo del CPR se obtiene un valor de 6.50. En cambio, para la valorización directa tenemos 2 impactos leves negativos en el factor ruido, 1 moderado positivo en la calidad de vida y 3 afectaciones negativas a la calidad del aire, 5

severos negativos en la seguridad y salud ocupacional y un crítico positivo en la dinamización económica. Obteniendo un Valor de CPR para la valorización directa de 7.75, la cual es 1.25 puntos arriba que el valor obtenido para el coprocesamiento.

A continuación, en la Tabla 5.38, se presenta un resumen comparativo de los factores más significativos de ambas alternativas de valorización.

*Tabla 5.38 Resumen comparativo de alternativas de valorización.*

<b>Resumen comparativo</b>		
<b>Factor afectado</b>	<b>Coprocesamiento</b>	<b>Valorización directa</b>
Socio- cultural (calidad de vida y salud y seguridad ocupacional)	En la evaluación se obtuvieron 2 impactos severos, 1 impacto moderado y 1 leve, todos estos negativos. Entre los riesgos a la salud se tienen: explosivos, caídas, ruido, vibraciones, atrapamientos, avalanchas, derrames, inhalación de vapores, ambiente pulvigeno, golpes, dermatitis; todos los riesgos mencionados son más probables que sucedan, y son de mayor intensidad en comparación con los asociados en la valorización directa.	En la evaluación resultaron 5 impactos severos negativos, asociados a la salud y seguridad ocupacional de los empleados para todas las actividades del proyecto. Entre los principales riesgos se tienen: caídas, inhalación de vapores, derrames, golpes y dermatitis.
Medio físico (medio ambiente)	Se obtuvieron 4 impactos severos. Sus afectaciones son directamente a la calidad del aire y paisaje. Debido al ruido, vibraciones y el ambiente pulvigeno que se genera. Por ejemplo, para el caso de la vegetación, la deposición de partículas sobre las hojas interfiere su proceso de fotosíntesis y modifica incluso la eco-fisiología de las plantas verdes.	Se obtuvieron 2 impactos leves y 3 moderados, todos ellos negativos, asociados a la calidad del aire, debido a los vapores que se generan en las actividades de preparación de lodos e incorporación de lodos a la pintura terminada. Esta afectación puede mitigarse si se emplean tanques cerrados para evitar la evaporación excesiva de solventes.
Factor económico (Servicio y dinamización económica)	Dependiendo de las características de los residuos a tratar así es el costo de su coprocesamiento, y aunque contribuye a la dinamización económica, en este caso, la presente alternativa representa una inversión significativa para la empresa generadora, ya que además del costo de la valorización de residuos se debe asumir los costos de los análisis previos y el transporte de los lodos a la planta de coprocesamiento.	Económicamente hablando, la valorización directa es una muy buena alternativa, dado que la empresa generadora además de evitarse los costos asociados al proceso de coprocesamiento y traslado de los residuos, aprovechara al máximo sus materias primas o vírgenes, dinamizando la economía al mismo tiempo que asume su responsabilidad con el medio ambiente.

Por las razones anteriores queda evidenciado que la mejor alternativa para este tipo de residuos es la valorización directa, ya tiene la ventaja de que no se debe incurrir a costos adicionales, la valorización se realiza en el lugar de generación de los residuos y se utilizaran los mismos equipos empleados en la fabricación de pintura base solvente. Los impactos negativos que son categorizados como severos y moderados como lo son calidad de aire y salud y seguridad ocupacional, pueden ser mitigados con el adecuado uso de equipo de protección personal y tanques cerrados enchaquetados para evitar la evaporación de solventes.



## CONCLUSIONES

1. De acuerdo con la investigación bibliográfica de los antecedentes de la valorización de residuos peligrosos en El Salvador, se determinó que a la fecha las empresas líderes en la disposición de residuos peligrosos son Geocycle El Salvador, S. A. de C. V. y Holcim El Salvador, S. A. de C. V. ambas poseen permisos ambientales para la gestión de desechos peligrosos y el coprocesamiento en hornos cementeros.
2. Se determinó que los residuos generados en el proceso productivo de pinturas base solvente pueden ser comunes o peligrosos. Entre los residuos comunes se incluyen envases que no contienen productos químicos, papel, cartón, plásticos y madera. Por otro lado, entre los residuos peligrosos se encuentran los fondos o lodos provenientes de la destilación simple de solventes, envases o empaques vacíos de materia prima, productos “fuera de especificaciones” y derrames.
3. Se identificaron diferentes tecnologías de valorización de residuos peligrosos, sin embargo, de acuerdo con el proceso productivo, naturaleza de los lodos y disponibilidad de las tecnologías en el país, las únicas alternativas viables para la valorización de lodos provenientes de la destilación simple de solventes utilizados en el lavado de equipo son el coprocesamiento y la valorización directa.
4. De acuerdo a la información recopilada de las alternativas de valorización seleccionadas, se optó por realizar una evaluación de impacto ambiental a través de la metodología “criterios relevantes integrados (VIA)”. En el coprocesamiento los impactos ambientales potenciales que se identificaron fueron en calidad de aire, ruido, paisaje, salud y seguridad ocupacional, y el componente económico debido a servicios y dinamización econó-

mica, por las actividades de recepción de residuos en planta, análisis de muestras, pretratamiento de residuos e incineración de estos en altos hornos. Para la valorización directa los potenciales impactos ambientales fueron: calidad de aire, ruido, calidad de vida, salud y seguridad ocupacional y dinamización económica por las actividades de recolección, transporte interno, preparación de lodos, pruebas de compatibilidad de estos y su incorporación en la pintura terminada.

5. Luego de realizar el análisis técnico-ambiental y comparar las alternativas de valorización que aplican a los lodos procedente de la destilación simple de solventes utilizados para el lavado de equipo en la fabricación de pinturas base solvente, se determinó que la mejor alternativa es la “Valorización directa”.

## RECOMENDACIONES

1. Para evitar la mala disposición de los lodos provenientes de la destilación simple de solventes utilizados en el lavado de equipo en la fabricación de pintura base solvente, que son considerados peligrosos por sus características inflamables y su contenido de metales pesado, es importante buscar alternativas de valorización que sean técnica y ambientalmente viables como la valorización directa.
2. Para este tipo de valorización, se debe tener en cuenta que los lodos deben ser tratados en el menor tiempo posible, además de planificar la producción de forma en que solo entre un tipo de resina al proceso de destilación e incorporarlos a productos terminados con características similares de preferencia tonalidades oscuras para evitar problemas en las propiedades físicas de la pintura como incompatibilidad o separación de fases, interferencia en el color, problemas en el secado, entre otros.
3. También se debe tener en cuenta las actualizaciones de las leyes, normas y reglamentos referentes a la valorización de residuos peligrosos, ya que pueden limitar el uso de algunas tecnologías. Además, se recomienda hacer pruebas prácticas o simulaciones de los diferentes tipos de valorización para recabar información más detallada y realizar una evaluación de impacto ambiental más exhaustivo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allnex Group. (2018). Recuperado el 20 de julio de 2020. Coating Additives. *Product guide - Worldwide*. Frankfurt, Alemania. Obtenido de Allnex Group: [www.allnex.com](http://www.allnex.com)
- Ariaza, A., y Bustos, C. (2013). *Análisis sobre la prestación del servicio de manejo de residuos peligrosos hospitalarios en ciudades de Bogotá*. Bogota, Colombia.
- Awad, G., Vilorio Villegas, M.I., Cadavid, L. (2015). *Metodología para la evaluación de impacto ambiental aplicada al ciclo de vida de proyectos de infraestructura en Colombia*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 28, no. 2, pp. 121-156. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín., DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.2941>
- Cities Alliance. (2016). Recuperado el 25 de julio de 2020. Estados Unidos. Obtenido de <http://city-development.org>
- Comisión Nacional Del Medio Ambiente Región Metropolitana. (1999). Recuperación de Solventes. *Guía para el control y la prevención de la contaminación industrial*. Santiago, Chile.
- Coprocesamiento.org*. (s.f.). Recuperado el 25 de junio de 2020. México. Coprocesamiento es una buena opción. Obtenido de: <https://coprocesamiento.org>
- Costa, G., Della, V., Ribeiro, M., Oliveira, A., Monrós, G., & Labrincha, J. L. (2007). Synthesis of black ceramic pigments from secondary raw materials. *Dyes and Pigments*, 137-144. Netherlands
- Cywiak, L. N. (s.f). *Diferentes Métodos utilizados en la Evaluación de Impacto*. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Dhiraj Sud, G. M. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions A review. *Bioresource Technology vol 99*, 6017-6027. Longowal, India. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.064
- Dominion Colour Corporation. (2013). *Industrial use of solid or liquid coloured premix containing C.I. Pigment Yellow 34 and C.I. Pigment Red 104 with other plastic compounds during the conversion into plastic or plasticised articles for non-consumer use*. Maastricht, Netherlands: Dominion Colour Corporation.
- Dries Huygens, H. G. (2018). Agronomic efficiency of selected phosphorus fertilisers derived from secondary raw materials for European agriculture. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 4-10. Belgium. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0527-1>

- Durson, D., & Sengul, F. (2006). Waste minimization study in a solvent based paint manufacturing plant. *Resources, Conservation and Recycling*. 47(4), 316–331. DOI: <http://dx.doi.org/10.14710/wastech.8.1.18-21>
- Environment, Health and Safety Online. Recuperado el 13 de mayo de 2020. *The EPA TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Characteristic Wastes (D-codes)*. Obtenido de <http://www.ehso.com>
- Encinas M., M. D., y Gómez de Baluguera, Z. (2011). Ingeniería Química y del Medio Ambiente. *Evaluación de Impacto Ambiental. Aspectos Teóricos*. Araba, España: Escuela Universitaria de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz. ISBN: 978-84-615-1146-4
- Environmental Protection Agency. (1989). Preliminary Data Summary for the Solvent Recycling Industry. (págs. EPA 440/1–89/102.). Washington, D.C., Estados Unidos: Office of Water Regulations and Standards, Office of Water Regulations and Standards, Office of Water.
- Espinoza, G. (2001). *Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental*. Santiago, Chile: Banco Interamericano de Desarrollo BID.
- Fernández-Vitoria, V. C. (1993). *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. (No. PA 333.72 C66.). Madrid, España: MUNDI-PRENSA.
- Frick, N. H., & Gruber, G. W. (1989). Solvent Waste Minimization by the Coatings Industry. *Solvent Waste Reduction Alternatives* (págs. (Cap. 4) 48-50). Cincinnati, Estados Unidos: EPA- U.S. Environmental Protection Agency.
- Geocycle. (2020). *Geocycle*. El Salvador. Obtenido de <https://www.geocycle.com>
- Grau, A., y Farré, O. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid, España.
- Greenleaf Ambiental Company Cia. (sf). *Estudio de impacto ambiental definitivo (EIAD) para la construcción y operación de la subestación El Inga 500/230/120 kW*. Ecuador.
- GTZ-Holcim. (2006). Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento. Alemania: Holcim Group Support Ltd y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Houshamand, A., Disfani, M., Dias, R., Oates, G., & Arulrajah, A. (2013). End-of-Life Options for Waste Paint In Australia. Victoria, Australia : Swinburne University of Technology.
- Huygens, D. (2018). Agronomic efficiency of selected phosphorus fertilisers derived from secondary raw materials for European agriculture. *Agronomy for Sustainable Development* , 4-10. Francia.

- Instituto Nacional de la Ecología. (sf). *Estudio Metodológico de las Tecnologías de Evaluación de Impacto Ambiental*. México DF: Libros INE. Recuperado el 18 de agosto de 2020 de: <https://docplayer.es/7015383-Instituto-nacional-de-ecologia-libros-ine.html>
- Jansen, S. J. (2011). *The Measurement and Analysis of Housing. Preference and Choice*. Delft, Netherlands: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-90-481-8893-2
- Leiva, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. España: Escuela de Organización Industrial. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental.
- Lingen, Z., & Zhenming, X. (2016). A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 23-26. Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.004>
- Lohani, B., Evans, J., Ludwig, H., Everitt, R., Carpenter, R. A., & Tu, S. (1997). *Environmental Impact Assessment for Developing Countries in Asia. Volume 1 - Overview*. 356 pp. Filipinas: Asian Development Bank.
- López M., M. E. (2001). *Evaluación de Impacto Ambiental. Metodología y Alcances. El Método de MEL-ENEL*. San José, Costa Rica: Instituto Centroamericano de Administración Pública (ICAP)
- López, R. (2017). *Cuantificación de endrin por cromatografía de gases con detector de captura de electrones, en agua para consumo humano del municipio de San Luis Talpa*. San Luis Talpa, El Salvador. Trabajo de grado para optar al título de Licenciatura en Ciencias Químicas. Universidad de El Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv>
- MARN. (2000). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos*. San Salvador, El Salvador. Recuperado el 17 de mayo del 2020 de: <http://cidoc.marn.gob.sv/documentos/reglamento-especial-de-sustancias-residuos-y-desechos-peligrosos/>
- MARN. (2012). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Ley del medio ambiente*. El Salvador. Recuperado el 5 de julio del 2020 de: <http://cidoc.marn.gob.sv/documentos/ley-del-medio-ambiente-actualizacion-2012/>
- MARN. (2012). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo en El Salvador*. El Salvador: PNUD - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado el 22 de mayo del 2020 de: <http://cidoc.marn.gob.sv/documentos/plan-nacional-de-implementacion-del-convenio-de-estocolmo/>
- Md. Juned K. Ahmed, M. A. (2018). A review on potential usage of industrial waste materials for binding heavy metal ions from aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 40-45. Estados Unidos.

- Mihalache, J. (2015). *Propuesta de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo Basado en la Resolución CD333, Acompañado de un Plan de Manejo Ambiental en la Empresa DISTHER CÍA. LTDA*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.014>
- Mikael C. F. Karlsson, R. Á.-M. (2019). Characterization of paint formulated using secondary TiO<sub>2</sub> pigments recovered from waste paint. *Journal of Coatings Technology and Research*, 607-614. Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0132-x>
- Miller, G., Peden, J., & Lindsey, T. (2006). Paint wastes and identified reduction options. *Hazardous Waste Research and Information Center*. Champaign, Illinois, Estados Unidos.
- Moller, R. (2010). Principios de Desarrollo Sostenible para América Latina . *Ingeniería de Recursos Naturales del Ambiente*, 101-110. ISSN: 1692-9918. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2311/231116434012>
- Moral Q., A., Couceiro M., L., y Sampedro R., Á. (2015). El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de Evaluación de Impacto Ambiental en las secciones de firme. *Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*. Brasil. ISSN: 1696-8085. Obtenido de: <http://www.uax.es/publicacion/el-analisis-del-ciclo-de-vida-como-herramienta-de-evaluacionambiental.pdf>
- Nassos, G. P., & Avlonas, N. (2020). The Circular Economy Through Energy Recovery. En G. P. Nassos, & N. Avlonas, *Practical Sustainability Strategies: How to Gain a Competitive Advantage, 2nd Edition* (págs. 177-186). Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Nelson, D. (2012). Alkyds and Polyesters. En ASTM-International, *Paint and Coating Testing Manual* (págs. 65-71). West Conshohocken, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL12187M>
- Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration* . Unión Europea: Joint Research Center. DOI: 10.2760/761437
- Noll, K., Haas, C., & Patterson, J. (1986). Recovery, Recycle and Reuse. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1163-1168. Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1080/00022470.1986.10466165>
- Oyarzún, J. M. (2015). *Pigment Processing. Physico-Chemical Principles*. Hanover, Alemania: Vincentz Network GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-74860-033-6

- Partidário, P. J., & Vergragt, P. J. (2000). Shaping sustainable technology development in the coatings chain Defining boundaries, environmental problems and main players. *Journal of Cleaner Production*, 8(3), 201–214. Netherlands. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00004-4)
- Pastakia, C. M., & Jensen, A. (1998). The rapid impact assessment matrix (Riam) For EIA. *Environmental Impact Assessment Review*, 461–482. Reino Unido. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00018-3)
- PNUMA. (1992). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, *Convenio de Basilea*. Obtenido de: <https://www.basel.int>
- Pyssa, J. (2019). Recovery and treatment of hazardous waste. Modern management of hazardous waste in Poland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (págs. 1-12). Krakow, Poland. DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012022
- Rajeswari, T., & Sailaja, N. (2014). *Impact of heavy metals on environmental pollution*. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, 3, 175-181. India.
- Ramirez, L. H. (s.f.). Técnicas de prevención en la generación de suelos contaminados. Andalucía, España: Consejería de medio ambiente, Junta de Andalucía. ISBN: 84-89650-73-X
- Robles, M. A. (2018). *Evaluación de las metodologías y la situación actual de la prevención de riesgos ambientales y de la seguridad en la industria*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina. Obtenido de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe>
- Sánchez, L. E. (2006). *Evaluación de Impacto Ambiental. Conceptos y métodos*. São Paulo, Brasil: Oficinas de textos. ISBN: 978-85-7975-090-8
- Schnall, M. J. (2012). Driers and Metallic Soaps. En ASTM-International, *Paints and Coating Testing Manual* (págs. 38-46). West Conshohocken, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL12185M>
- Shay, G. D. (2012). Thickeners and Rheology Modifiers. En ASTM-International, *Paint and Coating Testing Manual* (págs. 341-372). West Conshohoken, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL12213M>
- Shukla, S., Ganguly, R., & Hussain, C. M. (2020). En The Handbook of Environmental Remediation, *Hazardous Wastes-Types and sources* (págs. 24-52). India.



- Siete, C., Calderón, A., y López, V. (2016). Recuperado el 5 de mayo de 2020. *Estudio Comparativo de la Aplicación de Zeolita Activada y Carbón Activado en el Tratamiento de Agua Residuales de la Fabricación de Pinturas Base Agua*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad de El Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv>
- Silva, O. J. (s.f.). *360 en concreto*. (A. GROUP, Editor) Recuperado el 25 de junio de 2020. Colombia. Obtenido de A. GROUP: <https://cutt.ly/biFZti0>
- Surya Gold Cement. (2020). Recuperado el 7 de julio de 2020. *Surya Gold Cement*. India. Obtenido de The Manufacturing Process: <https://bit.ly/31vYoFA>
- UBA. (2001). *Draft of a German Report for the creation of a BREF-document "Waste Incineration"*. Dessau, Alemania: Umweltbundesamt. Obtenido de: <http://files.gamta.lt>
- UNEP. (2011). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, *Convenio de Basilea "Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento"*. Cartagena, Colombia. Obtenido de: <http://www.basel.int>
- Vallero, D. A. (2019). Hazardous Waste. En *Waste* (págs. 585-630). Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00031-1>
- Yuhas, S., & Montemayor, R. (2012). Solvents. En ASTM-International, *Paint and Coating Testing Manual* (págs. 149-184). West Conshohoken, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL12180M>
- Zarsa, L. F. (s.f.). *Aqualia*. Recuperado el 12 de julio de 2020. España. Obtenido de <https://www.iagua.es>

# **ANEXOS**

## **ANEXO A - MEMORIA DE CÁLCULO**

## ANEXO A-1. MEMORIA DE CÁLCULO PARA LA ALTERNATIVA DE COPROCESAMIENTO

### A. Cálculo de la Magnitud

Para el cálculo de la magnitud tanto para la alternativa de coprocesamiento, se utilizó la siguiente fórmula:

$$M_i = (I_i * w_I + E_i * w_E + D_i * w_D)$$

Donde:

$I_i$ : intensidad

$E_i$ : extensión

$D_i$ : duración

$w_I$ : peso con que se pondera la intensidad

$w_E$ : peso con que se pondera la extensión

$w_D$ : peso con que se pondera la duración

Donde los valores de los pesos relativos son los siguientes:

$$w_I = 0.4 \quad w_E = 0.4 \quad w_D = 0.2$$

#### a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (8 * 0.4 + 5 * 0.4 + 2 * 0.2) = 5.6$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (9 * 0.4 + 5 * 0.4 + 2 * 0.2) = 6$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (9 * 0.4 + 5 * 0.4 + 2 * 0.2) = 6$$

b) Cálculo para el factor paisaje:

Factor paisaje en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (7 * 0.4 + 5 * 0.4 + 5 * 0.2) = 5.8$$

c) Cálculo para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$M_i = (2 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2$$

Factor calidad de vida en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$M_i = (2 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2$$

Factor calidad de vida en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (2 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$M_i = (4 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2.8$$

Factor salud y seguridad en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$M_i = (3 * 0.4 + 2 * 0.4 + * 0.2) = 2.4$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$M_i = (8 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 4.4$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$M_i = (8 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 4.4$$

d) Cálculo para el factor económico:

Factor servicios en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$M_i = (9 * 0.4 + 10 * 0.4 + 2 * 0.2) = 8$$

Factor dinamización de la economía en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$M_i = (9 * 0.4 + 10 * 0.4 + 2 * 0.2) = 8$$

B. Cálculo del VIA

Para calcular el valor del impacto ambiental (VIA) se utilizó la siguiente formula:

$$VIA = M_i^{wm} * P_i^{wm} * R_i^{wm}$$

Donde:

M<sub>i</sub>: magnitud asignada

P<sub>i</sub>: posibilidad de ocurrencia o riesgo

R<sub>i</sub>: reversibilidad

W<sub>m</sub>: peso con que se pondera la magnitud

Wp: peso con que se pondera la posibilidad de ocurrencia

Wr: peso con que se pondera la reversibilidad

Donde los pesos a utilizar son los siguientes:

$$w_m = 0.61 \quad w_p = 0.22 \quad w_r = 0.17$$

a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (5.6^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 5.3$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (6^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 5.6$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (6^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 5.6$$

b) Cálculo Para el factor paisaje:

Factor paisaje en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (5.8^{0.61} * 10^{0.22} * 5^{0.17}) = 6.4$$

c) Cálculo Para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$VIA = (2^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.8$$

Factor calidad de vida en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$VIA = (2^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.8$$

Factor calidad de vida en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (2^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.8$$

Factor salud y seguridad en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$VIA = (2.8^{0.61} * 2^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.5$$

Factor salud y seguridad en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$VIA = (2.4^{0.61} * 2^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$VIA = (4.4^{0.61} * 5^{0.22} * 10^{0.17}) = 5.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$VIA = (4.4^{0.61} * 5^{0.22} * 10^{0.17}) = 5.2$$

d) Cálculo para el factor económico:

Factor servicios en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$VIA = (8^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 6.6$$

Factor dinamización de la economía en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$VIA = (8^{0.61} * 10^{0.22} * 2^{0.17}) = 6.6$$



### C. Cálculo de la Severidad

Para calcular la severidad, se utilizó la siguiente formula:

$$S = M * VIA$$

a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 5.6 * 5.3 = 29.9$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 6 * 5.6 = 33.4$$

Factor ruido en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 6 * 5.6 = 33.4$$

b) Cálculo para el factor paisaje:

Factor paisaje en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 5.8 * 6.4 = 37.0$$

c) Cálculo para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$S = 2 * 2.8 = 5.7$$

Factor calidad de vida en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$S = 2 * 2.8 = 5.7$$

Factor calidad de vida en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 2 * 2.8 = 5.7$$

Factor salud y seguridad en la actividad de recepción de residuos en planta:

$$S = 2.8 * 2.5 = 6.9$$

Factor salud y seguridad en la actividad de análisis de la muestra de residuos:

$$S = 2.4 * 2.2 = 5.4$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pretratamiento de residuos:

$$S = 4.4 * 5.2 = 22.9$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$S = 4.4 * 5.2 = 22.9$$

d) Cálculo para el factor económico:

Factor servicios en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$S = 8 * 6.6 = 53.1$$

Factor dinamización de la economía en la actividad de incineración de residuos en altos hornos:

$$S = 8 * 6.6 = 53.1$$

## ANEXO A-2. MEMORIA DE CÁLCULO PARA LA VALORIZACIÓN DIRECTA

### A. Cálculo de la Magnitud

Para el cálculo de la magnitud tanto para la alternativa de valorización directa, se utilizó la misma fórmula:

$$M_i = (I_i * w_I + E_i * w_E + D_i * w_D)$$

#### a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de preparación de los lodos:

$$M_i = (4 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2.8$$

Factor calidad de aire en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$M_i = (3 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2.4$$

Factor calidad de aire en la actividad de incorporación de lodos a pintura:

$$M_i = (4 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2.8$$

Factor ruido en la actividad de preparación de los lodos:

$$M_i = (2 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2$$

Factor ruido en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$M_i = (2 * 0.4 + 2 * 0.4 + 2 * 0.2) = 2$$

b) Cálculo para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$M_i = (1 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 2.2$$

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de lodos:

$$M_i = (6 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 4.2$$

Factor calidad de vida en la actividad de transporte interno de lodos:

$$M_i = (6 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 4.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de preparación de los lodos:

$$M_i = (6 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 4.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$M_i = (6 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 4.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$M_i = (6 * 0.4 + 2 * 0.4 + 5 * 0.2) = 4.2$$

c) Cálculo para el factor económico:

Factor dinamización de la economía en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$M_i = (9 * 0.4 + 2 * 0.4 + 10 * 0.2) = 6.4$$

## B. Cálculo del VIA

Para calcular el valor del impacto ambiental (VIA) se utilizó la siguiente formula:

$$VIA = M_i^{w_m} * P_i^{w_p} * R_i^{w_g}$$

Donde:

$M_i$ : magnitud asignada

$P_i$ : posibilidad de ocurrencia o riesgo

$R_i$ : reversibilidad

$w_m$ : peso con que se pondera la magnitud

$w_p$ : peso con que se pondera la posibilidad de ocurrencia

$w_g$ : peso con que se pondera la reversibilidad

Donde los pesos a utilizar son los siguientes:

$$w_m = 0.61 \quad w_p = 0.22 \quad w_g = 0.17$$

a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de preparación de los lodos:

$$VIA = (2.8^{0.61} * 5^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.5$$

Factor calidad de aire en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$VIA = (2.4^{0.61} * 5^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.2$$

Factor calidad de aire en la actividad de incorporación de lodos a pintura:

$$VIA = (2.8^{0.61} * 5^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.5$$

Factor ruido en la actividad de preparación de los lodos:

$$VIA = (2^{0.61} * 5^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.3$$

Factor ruido en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$VIA = (2^{0.61} * 5^{0.22} * 2^{0.17}) = 2.3$$

b) Cálculo para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$VIA = (2.2^{0.61} * 10^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.4$$

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de lodos:

$$VIA = (4.2^{0.61} * 2^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.8$$

Factor calidad de vida en la actividad de transporte interno de lodos:

$$VIA = (4.2^{0.61} * 2^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.8$$

Factor salud y seguridad en la actividad de preparación de los lodos:

$$VIA = (4.2^{0.61} * 2^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.8$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$VIA = (4.2^{0.61} * 2^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.8$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$VIA = (4.2^{0.61} * 2^{0.22} * 5^{0.17}) = 3.8$$

c) Cálculo para el factor económico:

Factor dinamización de la economía en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$VIA = (6.4^{0.61} * 5^{0.22} * 2^{0.17}) = 4.8$$

C. Cálculo de la Severidad

Para calcular la severidad, se utilizó la siguiente formula:

$$S = M * VIA$$

a) Cálculo para el factor Aire:

Factor calidad de aire en la actividad de preparación de los lodos:

$$S = 2.8 * 3.5 = 9.8$$

Factor calidad de aire en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$S = 2.4 * 3.2 = 7.7$$

Factor calidad de aire en la actividad de incorporación de lodos a pintura:

$$S = 2.8 * 3.5 = 9.8$$

Factor ruido en la actividad de preparación de los lodos:

$$S = 2 * 2.3 = 4.7$$

Factor ruido en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$S = 2 * 2.3 = 4.7$$

b) Cálculo para el factor sociocultural:

Factor calidad de vida en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$S = 2.2 * 3.4 = 7.5$$

Factor calidad de vida en la actividad de recepción de lodos:

$$S = 4.2 * 3.8 = 16.2$$

Factor calidad de vida en la actividad de transporte interno de lodos:

$$S = 4.2 * 3.8 = 16.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de preparación de los lodos:

$$S = 4.2 * 3.8 = 16.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de pruebas de compatibilidad:

$$S = 4.2 * 3.8 = 16.2$$

Factor salud y seguridad en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$S = 4.2 * 3.8 = 16.2$$



c) Cálculo para el factor económico:

Factor dinamización de la economía en la actividad de incorporación de lodos a pintura terminada:

$$S = 6.4 * 4.8 = 30.4$$

### ANEXO A-3. MEMORIA DE CÁLCULO DE CPR PARA COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

Fórmula CPR:

$$CPR = CPR1 + CPR2$$

$$CPR1 = \sum \text{Requerimientos técnicos}$$

$$CPR1 = Rtr + Req + Res + Rpc + Rti + Repp$$

$$CPR2 = \sum (\text{cantidad de impactos según su severidad} * \text{peso relativo})$$

$$CPR2 = (Il * Wl) + (Im * Wm) + (Is * Ws) + (Ic * Wc)$$

Donde:

Rtr: Requerimiento de transporte

Req: Requerimiento de equipo

Res: Requerimiento de espacio

Rpc: Requerimiento de personal capacitado

Rti: Requerimiento de tiempo

Repp: Requerimiento de equipo de protección personal

Il: Impactos leves

Im: Impactos moderados

Is: Impactos severos

Ic: Impactos críticos

Wl: peso con que se pondera los impactos leves = 0.25

Wm: peso con que se pondera los impactos moderados = 0.50

Ws: peso con que se pondera los impactos severos = 0.75

Wc: peso con que se pondera los impactos críticos = 1.00

#### A. Cálculo de CPR para el coprocesamiento

Sustituyendo los valores:

$$CPR1 = 1 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1$$

$$CPR2 = (3 * 0.25) + (-1 * 0.25) + (-1 * 0.50) + (-6 * 0.75) + (2 * 1.00)$$

$$CPR = CPR1 + CPR2 = 6.50$$

#### B. Cálculo de CPR para la valorización directa

Sustituyendo los valores:

$$CPR1 = 2 + 2 + 3 + 1 + 3 + 1$$

$$CPR2 = (-2 * 0.25) + (1 * 0.50) + (-3 * 0.50) + (-5 * 0.75) + (1 * 1.00)$$

$$CPR = CPR1 + CPR2 = 7.75$$