



GOBIERNO DEL
PARAGUAY | **MADES**

Manual Técnico para la

Gestión ambientalmente racional de **residuos y productos que** **contienen COP y mercurio**

Dirigido a profesionales y operadores



Manual Técnico para la Gestión ambientalmente racional de **residuos y productos que contienen COP y mercurio**

Dirigido a profesionales y operadores

Contenido

5	SIGLAS Y ABREVIATURAS
9	PRÓLOGO
11	1. INTRODUCCIÓN
11	1. 1. Propósito del Manual
12	1. 2. Organización
15	2. MARCO DE REFERENCIA
15	2. 1. Conceptos relacionados con residuos peligrosos, COP y mercurio.
29	2. 2. Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)
34	2. 3. Mercurio (Hg)
35	2. 4. Situación de los COP y mercurio en Paraguay
39	2. 5. Género y medio ambiente
55	3. MARCO JURÍDICO DE PARAGUAY APLICABLE A COP Y HG
55	3. 1. Acuerdos ambientales multilaterales ratificados por Paraguay y sus instrumentos normativos nacionales
58	3. 2. Normas jurídicas nacionales vinculadas directamente a los COP y Hg en Paraguay
65	4. GESTIÓN AMBIENTALMENTE RACIONAL DE RESIDUOS CON COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES O CONTAMINADOS CON ELLOS
66	4. 1. Prevención y minimización de residuos
68	4. 2. Proceso de decisión para eliminación de residuos COP
69	4. 3. Identificación de COP en productos, matrices ambientales y residuos
71	4. 4. Minimización de residuos peligrosos
73	4. 5. Acondicionamiento, almacenamiento y transporte de residuos peligrosos
77	4. 6. Tratamiento y eliminación ambientalmente racional de residuos peligrosos
97	5. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES (MTD) Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES (MPA) PARA LA GESTIÓN DE COP
98	5. 1. Medidas generales de prevención relativas a las MTD/MPA
98	5. 2. Contaminantes orgánicos persistentes de producción no intencional
99	5. 3. MTD/MPA de la incineración de residuos
106	5. 4. Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA) para la gestión de PFOS
121	6. DIRECTRICES TÉCNICAS PARA LA GESTIÓN AMBIENTALMENTE RACIONAL (GAR) DE DESECHOS CONSISTENTES EN MERCURIO O COMPUESTOS
121	6. 1. Ámbito de aplicación
122	6. 2. Prevención y reducción al mínimo de los residuos de procesos
127	6. 3. Mejores técnicas disponibles (MTD) para fuentes de liberación de mercurio
135	6. 4. Fabricación de cemento
138	6. 5. Prevención y reducción al mínimo de los desechos de productos que contienen mercurio y compuestos de mercurio
147	6. 6. Costos asociados a la gestión de Hg y productos con mercurio añadido
148	6. 7. Almacenamiento de mercurio
157	7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES
159	REFERENCIAS
163	ANEXOS

Figuras

- 17 **Figura 1.** Clasificación de residuos peligrosos, por corriente de residuos o por componente peligroso.
- 21 **Figura 2.** Principios clave de la economía circular.
- 22 **Figura 3.** Ciclo de vida de productos con enfoque de economía circular.
- 23 **Figura 4.** Principios de la responsabilidad extendida del productor.
- 25 **Figura 5.** Jerarquía en la gestión de residuos.
- 31 **Figura 6.** Estructuras de la dibenzo-p-dioxina y dibenzofurano.
- 66 **Figura 7.** Programa para la gestión de COP.
- 67 **Figura 8.** Esquema de minimización de residuos.
- 68 **Figura 9.** Flujo de decisión para la eliminación ambientalmente racional de residuos COP.
- 74 **Figura 10.** Criterios para el almacenamiento de residuos peligrosos.
- 87 **Figura 11.** Diseño de un vertedero especialmente diseñado o relleno de seguridad.
- 108 **Figura 12.** Alternativas de PFOS.
- 111 **Figura 13.** Tipos de Espumas Clase B.
- 112 **Figura 14.** Consideraciones del ciclo de vida de las espumas tipo AFFF.
- 125 **Figura 15.** Sistemas de control de la contaminación del aire.
- 142 **Figura 16.** Diagrama de recuperación del mercurio a partir de desechos sólidos.
- 144 **Figura 17.** Tratamiento de residuos de tubos fluorescentes.

Tablas

- 12 **Tabla 1.** Organización del documento.
- 15 **Tabla 2.** Clasificación de residuos.
- 16 **Tabla 3.** Características de peligrosidad según el Anexo III del Convenio de Basilea.
- 17 **Tabla 4.** Primer Grupo. Categorías de los desechos, por corriente de desecho.
- 18 **Tabla 5.** Segundo Grupo. Categorías de los desechos por sus constituyentes.
- 19 **Tabla 6.** Clasificación de los residuos peligrosos de acuerdo con normativas nacionales.
- 20 **Tabla 7.** Residuos peligrosos en Paraguay por sector de generación.
- 22 **Tabla 8.** Descripción de los residuos en el ciclo de vida de un producto.
- 24 **Tabla 9.** Principios fundamentales de la gestión ambientalmente racional.
- 27 **Tabla 10.** Categorización de actores involucrados en la gestión de residuos peligrosos.
- 30 **Tabla 11.** Listado de Contaminantes Orgánicos Persistentes del Convenio de Estocolmo.
- 33 **Tabla 12.** Ejemplos de PFOS y sustancias relacionadas.
- 34 **Tabla 13.** Ejemplos de PFOA y compuestos relacionados.
- 36 **Tabla 14.** Inventario de compuestos orgánicos persistentes en Paraguay (2015).
- 37 **Tabla 15.** Resumen de resultados del inventario nacional de mercurio.
- 38 **Tabla 16.** Fuentes de emisión de mercurio presentes en el país.
- 42 **Tabla 17.** Brechas de género en materia ambiental identificadas en América Latina y El Caribe y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- 46 **Tabla 18.** Resultados del muestreo de cabello comparados con el estándar de referencia de la OMS de 1 ppm y la concentración propuesta de mercurio de 0,58 ppm.
- 56 **Tabla 19.** Descripción de acuerdos multilaterales ratificados y sus instrumentos normativos.
- 58 **Tabla 20.** Normas jurídicas nacionales vinculadas directamente a los COP y Hg en Paraguay.
- 70 **Tabla 21.** Características de los laboratorios de nivel 1, 2 y 3.
- 78 **Tabla 22.** Tratamientos fisicoquímicos.
- 84 **Tabla 23.** Capacidad y costo de capital de diferentes plantas de incineración.
- 88 **Tabla 24.** Definiciones provisionales de bajo contenido de COP.
- 102 **Tabla 25.** Comparación de los sistemas de control de PCDD/PCDF.
- 110 **Tabla 26.** Precios de determinados productos químicos polifluorados básicos de laboratorio.
- 127 **Tabla 27.** Eficacia de los dispositivos de eliminación del polvo expresada en concentraciones medias de polvo por hora.
- 133 **Tabla 28.** Medidas de control y eficacias de reducción en la incineración de desechos municipales, médicos y peligrosos en relación con los gases de chimenea.
- 147 **Tabla 29.** Costos de gestión de residuos peligrosos con mercurio del Condado de Boulder.
- 147 **Tabla 30.** Costos por reciclado de baterías recargables en EE. UU.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADES)

Rolando de Barros Barreto Acha

Ministro del Ambiente y Desarrollo Sostenible

Lilian Portillo

Directora de Planificación Estratégica

Christian Ismael Ferrer Bauzá

Director General de Control de Calidad Ambiental y Recursos Naturales

Gustavo Rodríguez

Director de Calidad Ambiental

Federico Schroeder

Jefe del Departamento de Sustancias Químicas. Punto Focal Titular del Proyecto Soluciones libres de mercurio y COP

Ovidio Espinola

Técnico del Departamento de Sustancias Químicas. Punto Focal Alternativo del Proyecto Soluciones libres de mercurio y COP

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL (ONUDI)

Lamia Benabbas

Oficial de Desarrollo Industrial

Yolanda Pandelo

Asistente

CENTRO COORDINADOR CONVENIO DE BASILEA–CENTRO COORDINADOR CONVENIO DE ESTOCOLMO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (BCCC-SCRC)

Gabriela Medina

Directora

Belén Correa

Asistente Técnica

PROYECTO SOLUCIONES LIBRES DE MERCURIO Y COP PARA LA GESTIÓN AMBIENTALMENTE RACIONAL DE LOS DESECHOS EN PARAGUAY

Claudia Florentín

Coordinadora Nacional

Karen González

Asistente Técnica

AUTORES

Investigación para el Desarrollo

Alberto Capra

Fernando Britéz

Mauricio Rodas

Rocio Ramírez

COAUTORES

Víctor Javier Gutiérrez Avedoy

Alma Delia Nava Montes

REVISORES TÉCNICOS

Belén Correa

Claudia Florentín

Karen González

Ovidio Espinola

Marcia Suazo

CORRECCIÓN DE ESTILO

Ricardo Larramendia

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Sofía Argüello

Este documento se ha elaborado, diseñado, diagramado e impreso en el marco del Proyecto Soluciones libres de mercurio y COP (Proyecto ONUDI N° 200228 – GEF ID 10682), liderado por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), con el apoyo del Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social (MSPyBS), Ministerio del Interior, Administración Nacional de Electricidad (ANDE), Organización Paraguaya de Cooperación Intermunicipal (OPACI), Centro Coordinador Convenio de Basilea-Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe/Laboratorio Tecnológico Uruguay (LATU) y el Centro de Estudios Ambientales y Sociales (CEAMSO), con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM).

Los contenidos presentados en esta publicación no reflejan necesariamente las opiniones o políticas de ONUDI, MADES ni del BCCC-SCRC. Asimismo, las opiniones expresadas no deben considerarse como posiciones oficiales del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), que ha brindado apoyo financiero para la elaboración de este documento.

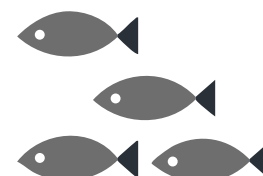
Este informe estará disponible en los sitios web del MADES y del BCCC- SCRC, y puede ser libremente utilizado para fines educativos y no comerciales, siempre que se cite adecuadamente la fuente.

MADES/ONUDI/BCCC-SCRC/FMAM. Manual técnico para la gestión integral de residuos y productos que contienen Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) y mercurio. 2025. Asunción, Paraguay. 164p.

Primera edición

Tiraje: 1000 ejemplares

Agosto, 2025.



Siglas y abreviaturas

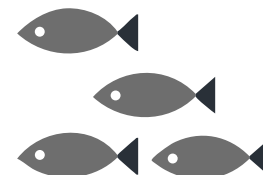
AFFF	Espuma formadora de película acuosa
AMM	Acuerdos Ambientales Multilaterales
Art.	Artículo
AIEPP	Asociación de Instituciones Educativas Privadas de Paraguay
BCD	Descomposición catalizada por bases
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BRI	Instituto de Investigación de la Biodiversidad
BRE	Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo
CAPEX	Costo de capital
CBD	Convención de Diversidad Biológica
CC/AC	Control y aseguramiento de calidad
CCCB-CRCE/ BCCC-SCRC	Centro Coordinador del Convenio de Basilea, Centro Regional del Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe en Uruguay
CaCO₃	Carbonato de calcio
CAO	Óxido de calcio
CEAMSO	Centro de Estudios Ambientales y Sociales
CFCs	Clorofluorocarbonos
CFP	Consentimiento Fundamentado Previo
CHD	Hidrodecloración catalítica (siglas en inglés)
CIP	Centro de Importadores del Paraguay
CISPy	Cámara de Industrias Sustentables del Paraguay
CLD	Convención de Lucha contra la Desertificación
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COMPASA	Compañía de Petróleo y Asfalto S.A.
CONADERNA	Comisión Nacional de Defensa de los Recursos Naturales
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
CORESA	Compañía Recicladora S.A.
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
DINAVISA	Dirección Nacional de Vigilancia Sanitaria
DNIT	Dirección Nacional de Ingresos Tributarios
ECD	Detector de captura de electrones
EQT	Equivalente de Toxicidad
EPA	Agencia de Medio Ambiente de los Estados Unidos (siglas en inglés)
E/S	Estabilización/Solidificación

AFFF	Espuma formadora de película acuosa
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (siglas en inglés)
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GAR	Gestión Ambientalmente Racional
GCF	Fondo Verde para el Clima (siglas en inglés)
GEF	Fondo Mundial para el Medio Ambiente (siglas en inglés)
GIRS	Gestión Integral de Residuos Sólidos
GIRSU	Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos
GIZ	Agencia Alemana de Cooperación Técnica
GPCR	Reducción química en fase gaseosa
HCl	Ácido clorhídrico
Hg	Mercurio
HRGC	Cromatografía de gases capilar (siglas en inglés)
IPEN	Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (siglas en inglés)
LED	Diodo emisor de luz
LMRS	Espectrometría de masas de baja resolución (siglas en inglés)
MADES	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MAPE	Minería Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala
MEC	Ministerio de Educación y Ciencias
MEF	Ministerio de Economía y Finanzas
MERCOSUR	Mercado Común del Sur
MIC	Ministerio de Industria y Comercio
MOPC	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
MTD/MPA	Mejores Técnicas Disponibles/Mejores Prácticas Ambientales
MSPyBS	Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud.
ONA	Organismo Nacional de Acreditación
ONG	Organización No Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ONUDI	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
OPEX	Costo de operación
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PBB	Bifenilos Polibromados
PCB	Bifenilos Policlorados
PCT	Terfenilos Policlorados
PCDD	Dioxinas (policloro dibenzo-p-dioxinas)
PCDF	Furanos (policloro dibenzofuranos)
PFAA	Ácidos perfluoroalquilados
PFAS	Sustancias Perfluoroalquiladas
PFBSF	Sulfonilfluoruro de perfluorobutano

AFFF	Espuma formadora de película acuosa
PFCA	Ácidos perfluoroalcano carboxílico
PFOA	Ácido perfluorooctanoico
PFOS	Ácido Sulfónico de Perfluorooctano
PNA	Plan Nacional de Aplicación
PNGIRP	Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Peligrosos
PNGIRSU	Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PVC	Cloruro de polivinilo
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
RP	Residuos peligrosos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RCS	Reducción Catalítica Selectiva
SGA	Sistema de gestión ambiental
SENAVE	Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Vegetal y de Semillas
SERMAT	Servicios de Ingeniería y Materiales S.A.
UIP	Unión Industrial del Paraguay
UCA	Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
UNA	Universidad Nacional de Asunción
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza (siglas en inglés)

Unidades de medida

g	Gramos
kg	Kilogramo
Ha	Hectáreas
µg	Microgramo
mg	Miligramo
µg/kg	Microgramo por kilogramo
mg/kg	Miligramo por kilogramo
ppb	Partes por mil millones
ppm	Partes por millón
t	Toneladas



PRÓLOGO

El Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) reafirma su compromiso con el fortalecimiento de las capacidades nacionales en materia de gestión ambiental, especialmente frente los desafíos que representa el manejo seguro y eficiente de productos y residuos con contenido de sustancias peligrosas, como el mercurio y los compuestos orgánicos persistentes (COP).

Conscientes de los impactos negativos que estos compuestos pueden causar en la salud humana y el ambiente, este **Manual técnico para la gestión ambientalmente racional de productos y residuos que contienen Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) y mercurio**, se concibe como una herramienta estratégica y práctica, destinada a orientar a todos los distintos actores involucrados en la cadena de gestión de residuos peligrosos.

Este documento promueve la adopción de tecnologías más limpias, el uso de las mejores técnicas disponibles (MTD) y la implementación de mejores prácticas ambientales (MPA), en concordancia con la legislación nacional e internacional vigente. Asimismo, busca contribuir al diseño de medidas preventivas, correctivas y de mitigación que deberán incorporarse en los estudios de impacto ambiental y sus correspondientes planes de gestión, en cumplimiento con la Ley N.º 294 y el Decreto N.º 453.

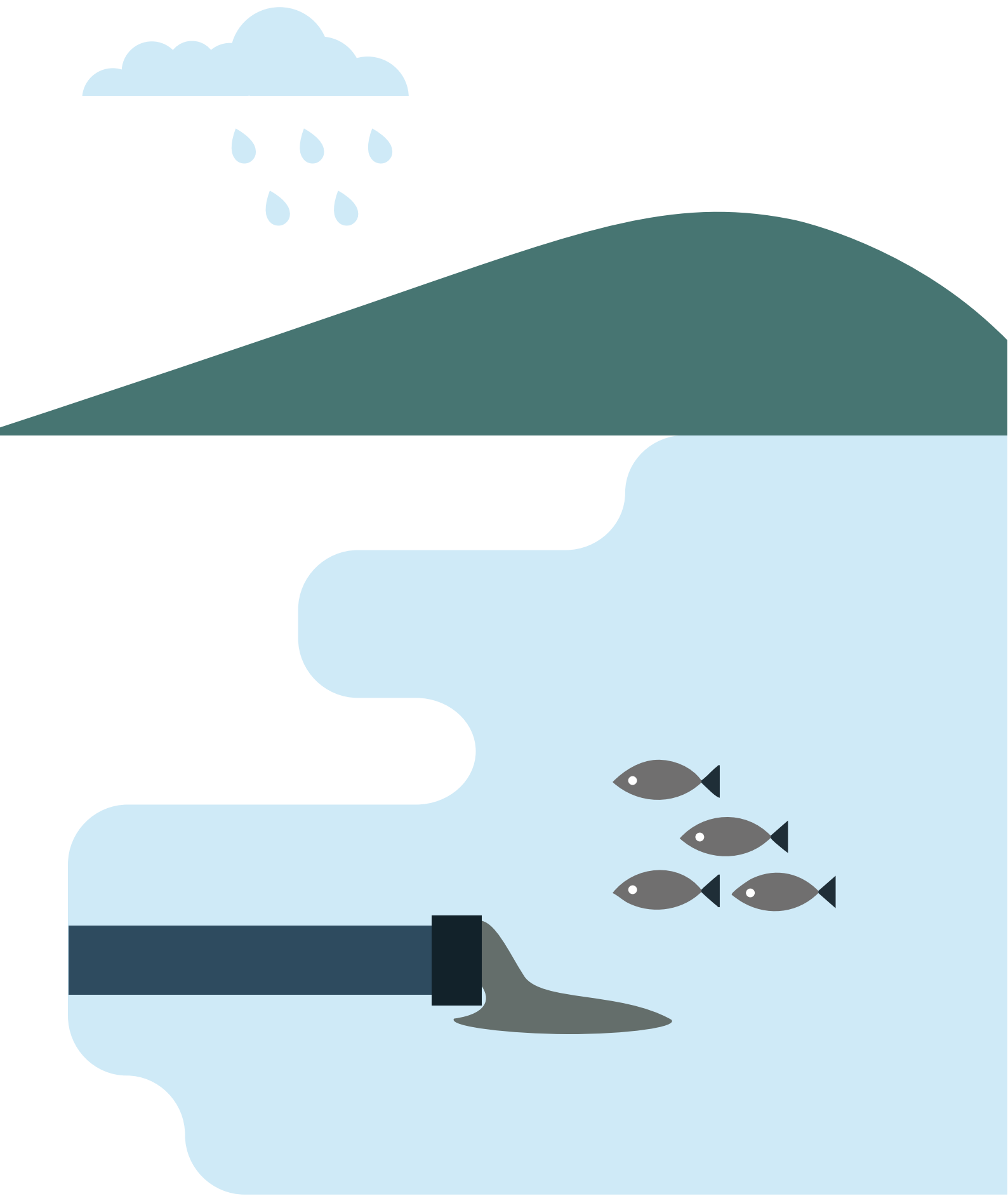
El manual también responde al marco de compromisos internacionales asumidos por el país, como parte del **Convenio de Basilea**, el **Convenio de Estocolmo** y el **Convenio de Minamata**, reforzando así la determinación del Paraguay de avanzar hacia una gestión de residuos más segura, eficiente y sostenible.

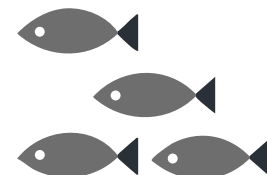
Invitamos a profesionales del sector público y privado, gestores ambientales, técnicos municipales, operadores de plantas de tratamiento, académicos y consultores, a utilizar este documento como una referencia permanente en el diseño, ejecución y evaluación de acciones orientadas a la reducción del riesgo ambiental asociado a estos compuestos peligrosos.

Desde el MADES, mantenemos nuestro compromiso de trabajar de forma articulada y participativa para proteger el ambiente y la salud de la población, impulsando un modelo desarrollo nacional sostenible, inclusivo y resiliente para el Paraguay.

Rolando de Barros Barreto, Ministro

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES)
República del Paraguay





1. Introducción

1.1. Propósito del Manual

El objetivo del Manual Técnico es proporcionar una guía técnica y comprensiva que fortalezca las capacidades de los profesionales y operadores vinculados con la gestión ambientalmente racional de productos y residuos que contienen mercurio (Hg) y contaminantes orgánicos persistentes (COP), en particular generados de forma no intencional, como las dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF), y el ácido sulfónico de perfluorooctano (PFOS) y sus sales, de uso industrial.

El manual proporcionará los elementos necesarios para fortalecer las capacidades nacionales en la gestión de residuos y de productos que pueden contener sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables, promoviendo la adopción de tecnologías y metodologías de tratamiento eficientes que prevengan o minimicen los impactos ambientales y mejoren la salud pública, con base en normativas nacionales e internacionales vigentes.

Asimismo, el presente manual pretende ser un referente para el diseño de medidas protectoras, correctoras o de mitigación de los impactos negativos, de los proyectos relacionados con la gestión ambientalmente racional de productos y residuos que contienen mercurio (Hg) y Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), para ser incluidas en los "Planes de Gestión Ambiental" de los estudios de impacto ambiental (Artículo 3, inciso e, de la Ley N.º 294/1993¹ y el Decreto N.º 453/1994².

El manual está dirigido al siguiente **público objetivo**:

- Los **profesionales gestores de residuos, consultores y personal técnico** "responsables" de trámites ambientales que necesitan una comprensión profunda del marco normativo, de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA) disponibles para diseñar, implementar y supervisar actividades industriales y de servicios que requieran sistemas de gestión integral de residuos sólidos urbanos y peligrosos, así como en el manejo adecuado de productos con mercurio y compuestos orgánicos persistentes.
- Los **operadores de instalaciones de reciclaje y de tratamiento de residuos**, que requieren capacitación para la implementación de prácticas

¹ República del Paraguay (1993). Ley N.º 294/1993 de Evaluación de Impacto Ambiental. <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2025/03/ley-294-1993-Evaluacion-de-impacto-ambiental.pdf>

² Presidencia de la República del Paraguay. Decreto N.º 453 por el cual se reglamenta la Ley N.º 294/1993 "de Evaluación de Impacto Ambiental" y su modificatoria, la Ley N.º 345/1994, y se deroga el Decreto N.º 14.281/1996. <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2025/03/Decreto-453-reglamenta-la-ley-294-y-ley-345.pdf>

de gestión ambientalmente racional de residuos sólidos y peligrosos, con un enfoque en la sostenibilidad ambiental y de conformidad con las normativas nacionales e internacionales.

Ámbito de aplicación:

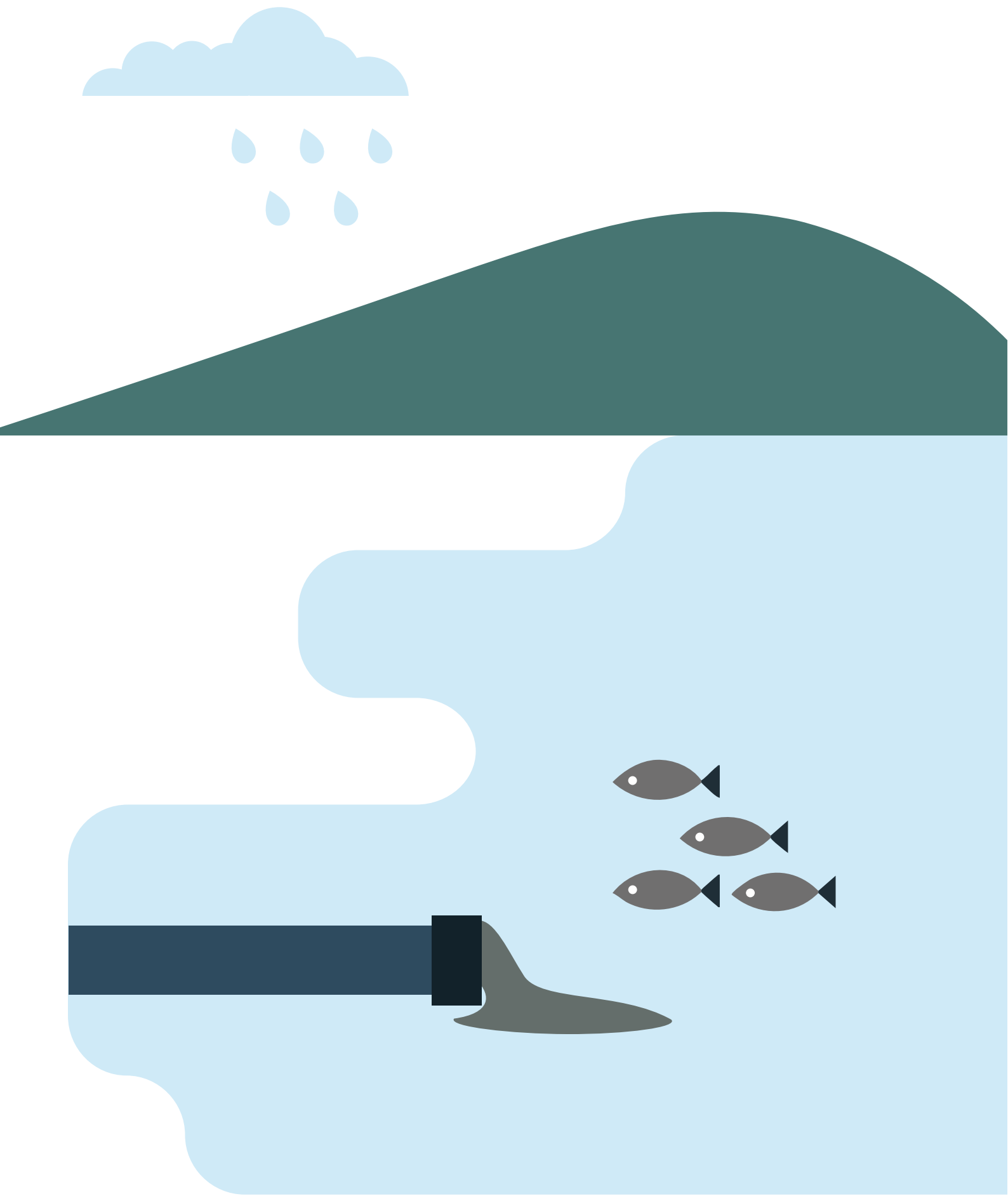
- **Industria:** procesos industriales que generan residuos peligrosos y no peligrosos, con un enfoque en la minimización de la generación de residuos y la maximización de la recuperación de materiales.
- **Residuos post-consumo:** residuos generados por el consumo doméstico y comercial, incluyendo aquellos que contienen COP y Hg, con estrategias para su correcta segregación, tratamiento y disposición final adecuada.
- **Productos:** producción, importación, consumo, ciclo de vida y manejo de estas sustancias de uso industrial y de los productos que las contienen.

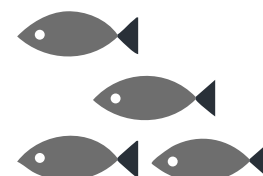
1. 2. Organización

El Manual Técnico se estructura de acuerdo con lo señalado en la Tabla 1.

Tabla 1. Organización del documento.

Capítulo	Abordaje de los temas
1- Introducción	Antecedentes y propósito del Manual.
2- Marco de referencia	Conceptos básicos relacionados con los residuos peligrosos, los compuestos orgánicos persistentes (COP) y el mercurio (Hg).
3- Instrumentos jurídicos	Marco jurídico nacional e internacional vinculado a un manejo racional de los residuos peligrosos, COP y Hg.
4- Prevención y minimización de residuos peligrosos (RP)	Principales estrategias utilizadas para prevenir y minimizar la generación y presencia de residuos peligrosos en el medio ambiente.
5- Directrices técnicas para COP	Directrices técnicas generales para la gestión ambientalmente racional (GAR) de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos.
6- Directrices técnicas para Hg	Directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional (GAR) de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos.





2. Marco de referencia

2.1. Conceptos relacionados con residuos peligrosos, COP y mercurio.

2.1.1. Clasificación de residuos

Los residuos pueden ser clasificados utilizando diferentes criterios. Así tenemos, por ejemplo: estado, origen, tipo de tratamiento al que serán sometidos o potenciales efectos derivados del manejo. En este documento la clasificación se da por los potenciales efectos derivados del manejo (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de residuos.

Clasificación	Definición
Residuo	Es todo material resultante de los procesos de producción, transformación y utilización, que sea susceptible de ser tratado, reutilizado, reciclado o recuperado, en las condiciones tecnológicas y económicas del momento, por la extracción de su parte reutilizable, Art. 40° de la Ley N.º 3956/09 (Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay).
Residuo no peligroso (residuos urbanos o municipales)	Residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas y que se generan en casa, habitación, mercados, centros comerciales, parque y jardines, entre otros.
Residuos peligrosos	Son aquellos residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos, pudiendo generar efectos adversos para la salud o el ambiente. Se generan en procesos industriales, hospitales, clínicas, talleres mecánicos e incluso en casas, habitación (productos de limpieza y desinfección, pinturas, insecticidas, entre otros).

2.1.2. Residuos urbanos

Para la gestión de los residuos sólidos municipales, Paraguay cuenta con la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ley 3956/2009) y su Decreto Reglamentario (7391/2017). Conforme con la citada Ley, el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) es la autoridad responsable de su aplicación. Entre sus responsabilidades se incluyen: orientar a las entidades municipales en la elaboración de planes y programas en

materia de gestión de los residuos sólidos municipales, así como también expedir las respectivas licencias, y la fiscalización ambiental en el desarrollo de los planes y los programas correspondientes (MADES-PNUD-FMAM, 2020).

Asimismo, según la Ley Orgánica Municipal 3966/2010, es competencia de los municipios la prestación del servicio público de aseo y la presentación de proyectos de gestión integral de los residuos sólidos para su evaluación, análisis, aprobación o rechazo (MADES-PNUD-FMAM, 2020).

De acuerdo con los resultados de un estudio realizado en el 2022 para la Municipalidad de Asunción, se encontró un índice de generación de residuos sólidos urbanos (RSU) igual a 1,22 kg/hab-día. Este valor contiene a los dos estratos (domiciliarios y no domiciliarios), con sus respectivos subestratos. El dato de generación de residuos domiciliarios fue de 0,83 kg/hab-día (Municipalidad de Asunción, 2022).

De acuerdo con MADES-PNUD-FMAM (2020), la generación de los residuos sólidos urbanos, para el país, se establece en 1,2 kg/persona/día, con una variación de entre 0,5 y 1,5 kg/persona/día, con un estimado al 2020 de 4.465 t/ para zonas urbanas con aproximadamente el 50% de la población con acceso al servicio de recolección en estas zonas, lo que representa el 47,5% de residuos recolectados (Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos, 2018) y que son transportados a vertederos habilitados; el resto pasa a la quema, a baldíos, a cursos de aguas.

2.1.3. Residuos peligrosos

En Paraguay, los Residuos peligrosos se definen en el Decreto N.º 7391 de 2017, en su Artículo 3º Fracción 41, como: las sustancias o elementos previstos en la Ley 567/1995 "Que aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transitorios de los desechos peligrosos y su eliminación", resultantes de los procesos industriales y productos que han sido adquiridos y/o desechados, y que, por sus características explosivas, inflamables, oxidantes, tóxicas, infecciosas, radioactivas, corrosivas, etc., pueden causar riesgos presentes o futuros a la calidad de vida de las personas o afectar el suelo, la flora, la fauna, contaminar el aire o las aguas de manera tal que dañen la salud humana o ambiental del país.

Partiendo de esta definición, se considerarán como residuos peligrosos a aquellos que contienen alguna de las características señaladas en la Tabla 3:

Tabla 3. Características de peligrosidad según el Anexo III del Convenio de Basilea.

Característica peligrosa	Descripción	Efectos potenciales
Corrosividad	Capacidad de deteriorar materiales, tejidos y equipos.	Corrosión de equipos, lesiones en piel y mucosas, movilización de metales tóxicos.
Reactividad	Inestabilidad y tendencia a reacciones violentas.	Explosiones, generación de gases tóxicos, incendios.
Explosividad	Capacidad de producir una reacción explosiva.	Destrucción, incendios, ondas de choque.
Toxicidad	Capacidad de causar daño a la salud humana.	Muerte, enfermedades, lesiones.
Inflamabilidad	Capacidad de arder fácilmente.	Incendios, quemaduras.
Riesgo biológico	Presencia de agentes patógenos.	Enfermedades infecciosas.
Radiactividad	Emisión de radiaciones ionizantes.	Cáncer, mutaciones genéticas.

Fuente: UNEP/BRS (2014).

2.1.4. Clasificación de residuos peligrosos en Paraguay que contienen o pueden contener COP o Hg.

Partiendo de la definición nacional de los residuos peligrosos, su clasificación se da de acuerdo con los lineamientos del Convenio de Basilea, que, en su Anexo I, clasifica los desechos peligrosos en dos grupos: el primer grupo (Clases Y1–Y18) se basa en el origen de las corrientes de desechos, mientras que el segundo grupo (Clases Y19–Y45) se enfoca en el componente peligroso, independientemente de la fuente del desecho. Se clarifica que en Paraguay el concepto de residuo se nombra como residuo mientras que el Convenio de Basilea lo refiere en su traducción al español como desecho, por lo que se podrán estar manejando indistintamente los dos términos. En la Figura 1 y en las Tablas 4 y 5 se pueden observar las categorías por corriente de desecho y por sus constituyentes.

Figura 1. Clasificación de residuos peligrosos, por corriente de residuos o por componente peligroso.

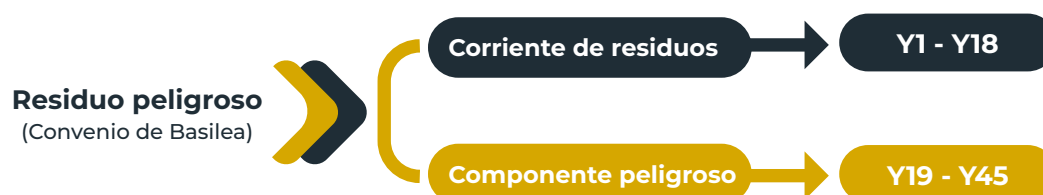


Tabla 4. Primer Grupo. Categorías de los desechos, por corriente de desecho.

Descripción	Clave
Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas	Y1
Desechos resultantes de la producción y la preparación de productos farmacéuticos	Y2
Desechos de medicamentos y productos farmacéuticos.	Y3
Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos	Y4
Desechos resultantes de la fabricación, la preparación y la utilización de productos químicos para la preservación de la madera	Y5
Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos.	Y6
Desechos que contengan cianuros, resultantes del tratamiento térmico y las operaciones de temple.	Y7
Desechos de aceites minerales no aptos para el uso al cual estaban destinados	Y8
Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua, o de hidrocarburos y agua.	Y9
Sustancias y artículos de desecho que contengan o estén contaminados por bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB)	Y10
Residuos alquitranados resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico	Y11
Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices	Y12
Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de resinas, látex, plastificantes o colas y adhesivos.	Y13

Descripción	Clave
Sustancias químicas de desecho, no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanza, y cuyos efectos en el ser humano o el medioambiente no se conozcan.	Y14
Desechos de carácter explosivo que no estén sometidos a una legislación diferente	Y15
Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de productos químicos y materiales para fines fotográficos.	Y16
Desechos resultantes del tratamiento de superficie de metales y plásticos.	Y17
Residuos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos industriales.	Y18

Fuente: UNEP/BRS. (2014)

Tabla 5. Segundo Grupo. Categorías de los desechos por sus constituyentes.

Descripción	Clave
Metales carbonilos	Y19
Berilio, compuestos de berilio	Y20
Compuestos de cromo hexavalente	Y21
Compuestos de cobre	Y22
Compuestos de zinc	Y23
Arsénico, compuestos de arsénico	Y24
Selenio, compuestos de selenio	Y25
Cadmio, compuestos de cadmio	Y26
Antimonio, compuestos de antimonio	Y27
Telurio, compuestos de telurio	Y28
Mercurio, compuestos de mercurio	Y29
Talio, compuestos de talio	Y30
Plomo, compuestos de plomo	Y31
Compuestos inorgánicos de flúor, con exclusión del fluoruro cálcico	Y32
Cianuros inorgánicos	Y33
Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida	Y34
Soluciones básicas o bases en forma sólida	Y35
Asbesto (polvo y fibras)	Y36
Compuestos orgánicos de fósforo	Y37
Cianuros orgánicos	Y38
Fenoles, compuestos fenólicos, con inclusión de clorofenoles	Y39
Éteres	Y40
Solventes orgánicos halogenados	Y41
Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados	Y42
Cualquier sustancia del grupo de los dibenzofuranos policlorados	Y43
Cualquier sustancia del grupo de las dibenzoparadioxinas policloradas	Y44
Compuestos órgano-halogenados, que no sean las sustancias mencionadas en el presente anexo (por ejemplo, Y39, Y41, Y42, Y43, Y44).	Y45

Fuente: UNEP/BRS (2014).

De igual manera, en la legislación paraguaya se establecen algunos listados que clasifican a los residuos peligrosos, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de los residuos peligrosos de acuerdo con normativas nacionales.

Ordenamiento legal	Residuo peligroso	
Decreto N.º 7391/17, Art. 88. Establece una clasificación de los residuos peligrosos generados en cada habitación, unidad habitacional o similares que están sujetos a un plan de manejo.	Aceites lubricantes usados.	
	Disolventes orgánicos usados.	
	Acumuladores de vehículos automotores que contienen plomo.	
	Baterías eléctricas a base de mercurio o de níquel-cadmio.	
	Lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio.	
	Aditivos que contengan mercurio, cadmio o plomo.	
	Medicamentos, implementos e instrumentos médicos de uso domiciliario.	
	Productos químicos de uso domisanitario (ej.: insecticidas, plaguicidas, herbicidas, soluciones ácidas y alcalinas, etc.).	
	Pinturas y solventes usados.	
Ley N.º 3361/07, Art. 53. Define a los residuos peligrosos como los enlistados a la derecha.	Aparatos eléctricos y electrónicos de uso doméstico.	
	Reactivos y sustancias de laboratorios.	
	Medicamentos vencidos.	
	Reactivos vencidos.	
	Envases que contuvieron sustancias químicas.	
	Placas radiográficas.	
	Líquido fijador.	
	Termómetros rotos.	
	Amalgamas.	
Resolución MADES N.º 355/20, Art. 1.º Aprueba el Plan Nacional de Gestión de Residuos Peligrosos (PN-GIRP)	Residuos del Sector Agroquímico	Plaguicidas
		Insecticidas
		Fungicidas
		Herbicidas
		Abonos
	Residuos del Sector Post-consumo	Automóviles
		Camiones
		Autobuses
		Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)
		Pilas y baterías
		Maquinaria pesada de construcción

Fuente: MADES/PNUD/FMAM (2020).

2.1.5. Inventario de residuos peligrosos en Paraguay

En la Tabla 7, con base en el Inventario Nacional de Residuos Peligrosos, se presenta un resumen de los principales residuos peligrosos (RP) identificados en el Paraguay. Las cifras consideradas provienen de la revisión de los reportes nacionales, comentarios de un grupo de trabajo de residuos, de recabar información y estimar cantidades de generación de RP; asimismo, algunos datos se obtuvieron con base en la experiencia, los actores clave entrevistados y los extraídos de inventarios previos; la cuarta columna corresponde a la clasificación asignada con respecto al Convenio de Basilea.

Tabla 7. Residuos peligrosos en Paraguay por sector de generación.

Sector de generación/ fuente	Residuo (subsector)	Residuos peligrosos (t/año)	Porcentaje (%)	Corriente de residuo ⁽⁵⁾
Pinturas y solventes	Producción ⁽¹⁾	26.489	32,0	Y6, Y12, Y17
Agroquímicos	Producción ⁽¹⁾	252	0,3	Y4
	Envases	3.600	4,3	Y4
Metales	Escorias	N/D		Y7, Y17
	Polvos de fundición	N/D		
Talleres/ transporte	Aceites lubricantes usados ⁽²⁾	6.596	8,0	Y8, Y9
	Estopas ⁽²⁾	10	0,0	Y9
	Envases	658	0,8	
	Filtros automotrices aceite, combustible y aire ⁽²⁾	2.033	2,5	Y8, Y9
	Neumáticos ⁽²⁾	19.833	23,9	
	Baterías ⁽²⁾	2.334	2,8	Y31
Servicios	Salud ⁽²⁾	1.966	2,4	Y1, Y3
	Energía ⁽⁶⁾	171	0,2	Y8, Y10
Curtiembres	Producción de pieles y sus manufacturas	7.489	9,0	
Químicos	Producción de farmacéuticos, sustancias químicas, medicinales y productos botánicos ⁽¹⁾	46	0,1	Y2, Y3, Y4
	Producción de sustancias químicas básicas, excepto abonos y compuestos de nitrógeno ⁽¹⁾	218	0,3	Y6
	Producción de otros productos químicos n.c.p. ⁽¹⁾	297	0,4	Y5, Y6, Y12, Y13
Post-consumo por la sociedad	Electrónicos	3.359	4,1	Y10, Y24, Y26, Y29, Y31
	Mercurio ⁽³⁾	15	0,0	Y29
	Plásticos	N/D	0,0	
Compuestos Orgánicos Persistentes (COP) ⁽⁴⁾		7.480	9,0	Y10
Total		82.846	100	

(1) Calculados con datos del Ministerio de Industria y Comercio del 2018, estimados al 2016.

(2) Calculados con datos de la Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos, con datos del 2016.

(3) Extraído de la Evaluación Inicial del Convenio de Minamata, 2017 (año base 2014).

(4) Extraído del Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo, Paraguay 2017, este valor es el total de PFOS, HBCD, PBDE y Plaguicidas COP inventariados en 2015.

(5) Extraídos de la Tabla 2.1 y 2.2 Corriente de Residuo del Convenio de Basilea.

(6) Calculado con datos de la ANDE.

N/D No disponible actualmente.

Fuente: MADES/PNUD/FMAM, 2020.

La producción de pinturas y solventes es la fuente más importante de residuos en Paraguay con 26.489 t, seguido de la industria de curtiembres con 7.489 t, los COP con 7.480 t y aceites lubricantes usados con 6.596 t. El mercurio, aunque su generación no es significativa en comparación con otros residuos (15 t), por su toxicidad se considera crítico (MADES/PNUD/FMAM, 2020).

2.1.6. Gestión integral de residuos peligrosos

Para minimizar los riesgos de los residuos peligrosos se necesita un sistema de gestión ambiental que reduzca su generación, peligrosidad y asegure un manejo adecuado en todas las etapas. Un análisis del ciclo de vida de los productos es fundamental para desarrollar un modelo de gestión de residuos eficaz. Este análisis abarca todas las etapas, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto (Tabla 8) (Martínez, 2005). En la actualidad el ciclo de vida de los productos debe visualizarse desde el punto de vista de la economía circular, en la cual los materiales biológicos renovables que consumimos pueden ser aprovechados en cada etapa de su ciclo de vida evitando el desperdicio. Este ciclo se repite en la industria mediante la reparación, remanufactura, reutilización y reciclaje de los productos de consumo, con lo cual se minimiza la pérdida de materiales y energía y se alarga su vida, con lo que se detonan encadenamientos productivos que son fuente de ingresos y de empleos bajos en emisiones de carbono e incluyentes, a la vez que evita la generación de residuos y su disposición final³.

Los principios clave de la economía circular se muestran en la Figura 2 y el ciclo de vida de los productos bajo ese enfoque en la Figura 3.

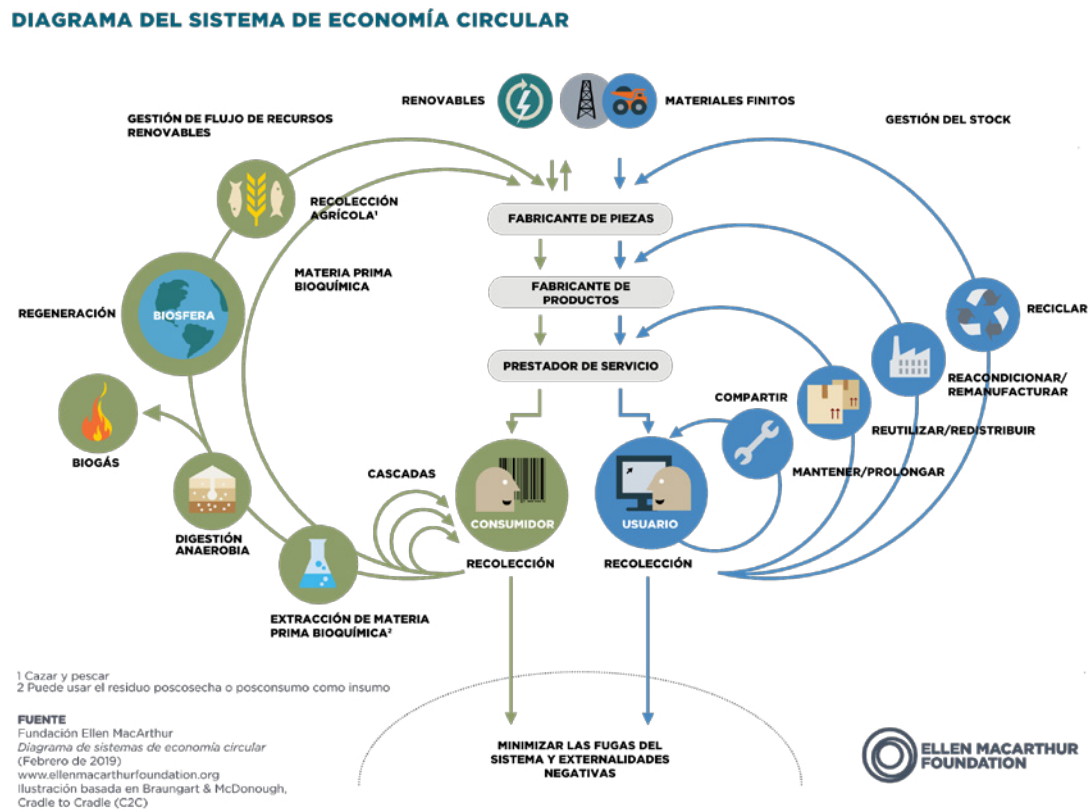
Los principios clave de la economía circular son (Figura 2):

Figura 2. Principios clave de la economía circular.



³ Cristina Cortinas, 2025, Manejo integral de los residuos y economía circular en México y el mundo. Presentación en el Diplomado "Protección de la naturaleza, cambio climático y derechos humanos" de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Figura 3. Ciclo de vida de productos con enfoque de economía circular.



Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2019).

En cada una de las fases típicas del ciclo de vida de un producto se generan residuos, como se muestra en la Tabla 8, por lo que es importante considerar, desde la extracción o diseño, criterios de durabilidad, de factibilidad de reciclaje y reaprovechamiento para reducir el uso de materias primas, los impactos en el cambio climático y la generación de sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables.

Tabla 8. Descripción de los residuos en el ciclo de vida de un producto.

Etapa		Generación de residuos
Producto	Extracción de materias primas	Estériles, descartes, insumos descartados, residuos varios.
	Producción	Productos fuera de especificación, envases vacíos, derrames, insumos descartados, residuos varios.
	Transporte, almacenamiento y venta	Residuos generados en accidentes, derrames, productos alterados y vencidos.
Residuo	Consumo	Envases, insumos agotados, producto descartado luego de su uso.
	Reciclado	Residuos derivados del reciclado.
	Tratamiento	Residuos derivados del tratamiento.
	Disposición final	

Fuente: Martínez (2005).

2.1.7. Principio de responsabilidad extendida del productor (REP)

Un ejemplo de principio rector que integran en general las políticas de gestión de residuos peligrosos en el marco del desarrollo sostenible es la **Responsabilidad Extendida del Productor (REP)**. El concepto de la REP establece que los generadores de residuos peligrosos son responsables de su gestión integral, incluyendo los costos asociados a la prevención, tratamiento y disposición final. Este principio busca internalizar los costos ambientales en todo el ciclo de vida, como se resumen en la Figura 4.

Figura 4. Principios de la responsabilidad extendida del productor.



2.1.8. Gestión ambientalmente racional de los residuos

Según el PNUMA (2004), la "gestión ambientalmente racional" (GAR) se define en el Convenio de Basilea como la adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los desechos peligrosos u otros desechos se gestionen de forma que se proteja la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos que puedan derivar de dichos desechos. Los principios fundamentales de la GAR se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Principios fundamentales de la gestión ambientalmente racional.

Prevención y minimización de residuos.	Se centra en evitar y reducir la cantidad de residuos generados desde la fuente mediante el diseño de productos y procesos adecuados.
El principio del ciclo de vida integrado	Por el cual las sustancias y los productos deben diseñarse y gestionarse de forma que se produzca un impacto ambiental mínimo durante su generación, uso, recuperación y eliminación o disposición final.
El principio precautorio	Por el cual se adoptan medidas preventivas, considerando los costos y beneficios de la acción y la inacción, cuando existe una base científica, para creer que la liberación al medio ambiente de sustancias, residuos o energía es probable que cause daño a la salud humana o al medio ambiente.
El principio de control integrado de la contaminación	Requiere que la gestión de los residuos peligrosos se base en una estrategia que tenga en cuenta el potencial de efectos sinérgicos entre medios y múltiples medios.
El principio de normalización	Que exige el establecimiento de normas para la gestión ambientalmente racional de los residuos peligrosos en todas las etapas de su procesamiento, tratamiento, eliminación y recuperación.
El principio de autosuficiencia	Por el cual los países deben garantizar que la eliminación de los desechos generados dentro de su territorio se realice allí por medios compatibles con una gestión ambientalmente racional, reconociendo que la gestión de algunos desechos fuera de los territorios nacionales también puede ser ambientalmente racional.
El principio de proximidad	Por el cual la eliminación de residuos peligrosos debe tener lugar lo más cerca posible de su punto de generación, reconociendo que una gestión económica y ambientalmente racional de algunos de estos se logrará en instalaciones especializadas ubicadas a mayores distancias del punto de generación.
El principio de mínimo movimiento transfronterizo	Por el cual los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos deben reducirse a un mínimo compatible con una gestión eficiente y ambientalmente racional.
El principio de que quien contamina paga	Según el cual el contaminador potencial debe actuar para prevenir la contaminación y quienes la causan deben pagar para remediar las consecuencias de esa contaminación.
El principio de soberanía	Cada país deberá tener en cuenta las condiciones políticas, sociales y económicas al establecer una estructura nacional de gestión de residuos. Un país puede, por ejemplo, prohibir la importación de residuos peligrosos a su territorio de conformidad con su legislación ambiental nacional.
El principio de participación pública	En virtud del cual los Estados deben garantizar que en todas las etapas de gestión de los residuos se tenga participación pública y que se tenga acceso a la información relativa a la gestión de desechos peligrosos.

En complemento a lo anterior, se deben aplicar estrategias de:

- Reutilización y reciclaje: Promueve la reutilización de productos y materiales y el reciclaje de residuos para reincorporarlos a la cadena productiva, disminuyendo así la demanda de materias primas nuevas.
- Tratamiento seguro de residuos: Implica implementar tecnologías y métodos de tratamiento de residuos para neutralizar sus peligros antes de su disposición final, asegurando que no representen un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.
- Disposición final adecuada: Garantiza que los residuos que no pueden ser reutilizados o reciclados sean dispuestos de manera segura, por ejemplo, en rellenos sanitarios diseñados adecuadamente.
- Educación y capacitación: Promover la formación y sensibilización de todos los actores involucrados en la gestión de residuos, desde los generadores hasta los operadores, para asegurar prácticas sostenibles y responsables.

2.1.9. Principios de jerarquía en la gestión de residuos

La jerarquía de gestión de residuos peligrosos forma parte del marco estratégico para la aplicación del Convenio de Basilea correspondiente a 2012 – 2021, el cual fue aprobado en la décima reunión de la Conferencia de las Partes (COP10) del Convenio de Basilea, de acuerdo con la Decisión BC-10/2.

Las jerarquías en la gestión obviamente tendrán como primera prioridad prevenir la generación de residuos en la fuente, dejando la alternativa de disposición final como última opción de manejo (ver Figura 5).

Figura 5. Jerarquía en la gestión de residuos.



Fuente: Modificado del documento emitido por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, 2007.

Prevención: Reducir la generación de residuos a través de diseños que utilicen menos materia prima, con materiales más durables y amigables con el medio ambiente y el ser humano.

Reúso: Que los materiales o productos permitan su reúso. En el caso de sustancias como los COP y Hg no se recomienda realizar esta práctica.

Reciclaje: Cabe señalar que el reciclaje de materiales que contienen o podrían contener COP y mercurio (Hg) no es recomendado debido a los serios riesgos que plantea para la salud humana y el medio ambiente. Durante los procesos de reciclaje, estas sustancias químicas pueden liberar contaminantes peligrosos, provocando impactos negativos irreversibles. Los compuestos como los COP y el Hg, presentes en plásticos, aparatos electrónicos y diversos desechos industriales, son altamente persistentes en el ambiente y tienen la capacidad de bioacumularse en organismos vivos, aumentando su toxicidad a lo largo de la cadena alimentaria.

El Convenio de Basilea, el Convenio de Estocolmo y el Convenio de Minamata instan a una gestión ambientalmente racional de estos materiales, recomendando su tratamiento especializado o eliminación final segura en lugar de su reciclaje. Los métodos de reciclaje convencionales no están diseñados para manejar estos compuestos tóxicos, lo que podría provocar su dispersión en el entorno, exponiendo tanto a los trabajadores como a las comunidades cercanas a riesgos graves e inaceptables.

Valorización energética. Tratamiento térmico: El tratamiento involucrará procesos de transformación ambientalmente aceptables, que tienen como objetivo reducir el volumen y la peligrosidad de los residuos. La incineración con recuperación de energía es una opción válida para el tratamiento de los COP, siempre y cuando se tengan las condiciones adecuadas para eliminar la generación de dioxinas y furanos y otros contaminantes y compuestos tóxicos.

Disposición final: Involucra la práctica de disponer residuos en el terreno mediante la modalidad de relleno de seguridad, diseñado y operado para minimizar los riesgos de contaminación ambiental. Dadas las características de los residuos peligrosos, esta modalidad involucra el almacenamiento de largo plazo de los residuos dispuestos. Es por esta razón que se debe lograr un sistema en el que se asegure que los residuos que ingresan a disposición final sean el mínimo imprescindible, teniendo en cuenta aspectos tecnológicos y económicos.

2.1.10. Actores y roles involucrados en la gestión de residuos peligrosos

Para poder identificar el problema que representan los residuos peligrosos y definir estrategias para su abordaje, es esencial tener en cuenta los actores involucrados en forma directa e indirecta en la gestión de estos. Para ello será necesario identificar y conocer a los distintos actores, sus roles e interrelaciones. Esto permitirá definir estrategias de organización, integración, coordinación y fortalecimiento de todos los grupos de interés, asegurando el adecuado desarrollo de una gestión ambiental de residuos.

En la Tabla 10 se exponen la categorización de actores involucrados y los principales aspectos de su participación en la gestión de residuos peligrosos en el Paraguay.

Tabla 10. Categorización de actores involucrados en la gestión de residuos peligrosos.

Categoría	Rol	Actores involucrados
Generadores	Comprende a todas aquellas personas físicas y jurídicas que por su actividad generan residuos peligrosos.	→ Centro de Importadores del Paraguay (CIP) → Unión Industrial Paraguaya (UIP) → Todas las industrias generadoras de residuos
Operadores del sistema de residuos peligrosos	Aquellos actores formales que participan de la gestión de los residuos una vez que estos salen de la órbita del generador.	→ Soluciones Ecológicas S.A. (reciclaje de papel, cartón, plástico y vidrio) → Compañía de Petróleo y Asfalto S.A. (COMPASA) (gestión de aceites minerales usados) → El Farol S.A. (almacenamiento temporal de residuos peligrosos, entre otros.) → Compañía Recicladora S.A. (CORESA) (reciclaje de plásticos) → Servicios de Ingeniería y Materiales S.A. (SERMAT S.A.) – Taky Ambiental S.A. (gestión de residuos hospitalarios, industriales, entre otros) → Brassur S.A. (reciclaje de chatarra)
Sector informal del sistema de residuos	Población de clasificadores, que por razones socioeconómicas se sustentan a través de los materiales que pueden recolectar de los residuos. Reviste particular importancia la recolección de RAEE.	→ Gancheros → Recicladores
Autoridades locales y nacionales	Responsables por definir y ejecutar las políticas públicas que permitan asegurar una adecuada calidad de vida a la población y el desarrollo sostenible del país.	→ MADES → Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) → Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social (MSPyBS) → Ministerio de Industria y Comercio (MIC) → Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Vegetal y de Semillas (SENAVE) → Comisión Nacional de Defensa de los Recursos Naturales (CONADERNA) → Dirección General de Estudios Económicos (MEF) → Dirección Nacional de Ingresos Tributarios (MEF) → Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA – MSPyBS) → Dirección Nacional de Vigilancia de la Salud (DINAVISIA).
Sector académico y educadores	La formación de una masa crítica capacitada para el abordaje de la problemática vinculada a los residuos peligrosos. Adicionalmente, la participación del sector académico puede facilitar la comprensión por parte de la ciudadanía de las alternativas de gestión de residuos peligrosos y mejorar la confianza sobre los distintos sistemas.	→ Ministerio de Educación y Ciencias (MEC) (institución pública) → Asociación de Instituciones Educativas Privadas del Paraguay (AIEPP) → Universidad Nacional de Asunción (UNA) → Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción (UCA)

Categoría	Rol	Actores involucrados
Sociedad civil organizada	Juega un rol esencial en la implantación de un sistema de gestión de residuos y en particular en la aceptación de la instalación de la infraestructura para el tratamiento y disposición final.	→ Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, siglas en inglés) → Fundación Moisés Bertoni → Gestión Ambiental, el Centro de Estudios Ambientales y Sociales (CEAMSO)
Comunicadores	Aportan a la construcción de la opinión pública.	→ Canales de aire, emisoras radiales y diarios.
Asociaciones empresariales	Interlocutores para una diversa gama de generadores de sector productivo, comercial y de servicios.	→ Cámara de Industrias Sustentables del Paraguay (CISPy)
Organismos internacionales de cooperación técnica y financiera	Fortalecimiento de las capacidades nacionales y locales para la gestión ambiental. Apoyo en la movilización de recursos financieros para el sector público y privado.	→ Organización Mundial de la Salud (OMS) → Organización Panamericana de la Salud (OMS-OPS) → Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación → Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) → Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) → Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ) → Centro Coordinador del Convenio de Basilea, Centro Regional del Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe en Uruguay (BCCC-SCRC) → Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). → Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Banco Mundial (BM)

Fuente: Adaptada de Martínez, J. 2005. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, Fundamentos, Tomo 1. Centro Coordinador del Convenio de Basilea – Centro Regional Convenio de Estocolmo América Latina y El Caribe.

2.2. Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)

El Convenio de Estocolmo, que fue adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios el 22 de mayo de 2001 en Estocolmo (Suecia), entró en vigor el 17 de mayo de 2004. El gobierno de Paraguay firmó el Convenio en mayo del 2001 y lo ratificó el 17 de mayo de 2004.

En el 2008, Paraguay presentó su primer Plan Nacional de Aplicación (PNA) o Plan Nacional de Implementación (PNI) como se maneja dentro del Convenio de Estocolmo, el cual actualizó en el año 2017. Este Plan es el instrumento que permite realizar acciones orientadas a reducir o eliminar del ambiente, de procesos y productos, los contaminantes orgánicos persistentes (COP), a través de estrategias a corto, mediano y largo plazo que consideran, entre otras, acciones tecnológicas, legales, de capacitación y de participación social.

En un inicio se identificaron 12 sustancias que, por su persistencia, bioacumulación, toxicidad y su capacidad de transporte a largas distancias y en diferentes medios causaban efectos adversos en humanos y ecosistemas, mismas que se clasificaron en 3 categorías:

- **Plaguicidas:** aldrin, clordano, DDT, dieldrin, endrin, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno;
- **Sustancias industriales:** hexaclorobenceno, bifenilos clorados (PCBs); y
- **Subproductos no intencionales:** hexaclorobenceno; dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos clorados (PCDD/PCDF) y PCBs.

A la fecha, en las distintas conferencias de las Partes que se han realizado, se han incorporado al Convenio un total de 37 contaminantes orgánicos persistentes (33 Anexo A; 2 Anexo B y 7 Anexo C). En la última Conferencia de las Partes realizada en mayo de 2025, se incorporaron tres nuevos COP: parafinas cloradas C14-C17, el ácido perfluorocarboxílico de cadena larga y los cloropirifos (Tabla 11).

Los COP persisten en el medio ambiente durante largos periodos, son capaces de transportarse a larga distancia, bioacumularse en tejidos humanos y animales, biomagnificarse en las cadenas alimentarias y tener impactos potencialmente significativos en la salud humana y el medio ambiente. La exposición a los COP puede causar graves problemas de salud, como ciertos tipos de cáncer, defectos congénitos, disfunción de los sistemas inmunitario y reproductivo, mayor susceptibilidad a enfermedades.

Existe una relación muy estrecha entre el Convenio de Estocolmo y el Convenio de Basilea, debido a que la gran mayoría de los COP identificados, al definirse como desechos o residuos y ser objeto de un movimiento transfronterizo, se caracterizarán como desechos peligrosos en virtud del Convenio de Basilea. El Convenio identifica claramente varios desechos de COP en su Anexo I (categorías de residuos que deben controlarse), en particular las sustancias y artículos de desecho que contienen o están contaminados con bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB), así como cualquier congénere de dibenzofurano policlorado y de dibenzoparadioxina policlorada⁴.

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación fue adoptado el 22 de marzo de 1989 en una Conferencia de Plenipotenciarios en Basilea, Suiza, y entró en vigor el 5 de mayo de 1992.⁵ Paraguay se suscribió al Convenio de Basilea el 28 de septiembre de 1995.

4 <https://chm.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx>. Consultado el 11 de marzo de 2025.

5 <https://www.baselint/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx>

De los COP enlistados por el Convenio de Estocolmo, Paraguay, de acuerdo con los inventarios realizados y a los resultados de su PNI, considera de atención prioritaria a los subproductos generados no intencionalmente como son las dioxinas y furanos, y los compuestos fluorados que se encuentran en diversos productos de uso comercial, y en las corrientes de residuos.

Tabla 11. Listado de Contaminantes Orgánicos Persistentes del Convenio de Estocolmo.

Anexo A*

Aldrin ●	Clordano ●	Clordecona ●
Decabromodifenil eter (mezcla comercial, c-decaBDE) ▲	Declorano Plus ▲	Dicofol ●
Dieldrin ●	Endrin ●	Heptacloro ●
Hexabromobifenilo ▲ ●	Hexabromociclododecano (HBCDD) ▲	Hexabromobifenilo eter and heptabromodifenilo eter ●
Hexaclorobenceno (HCB) ▲	Hexaclorobutadieno ▲	Alfa hexaclorociclohexano
Beta hexaclorociclohexano ●	Lindano ●	Metoxicloro ●
Mirex ●	Pentaclorobenceno ▲ ●	Pentaclorofenol and sus sales y este-res ●
Bifenilos clorados (PCB) ▲	Naftalenos policlorados ▲	Ácido perfluorooctanoico (PFOA), sus sales and PFOA-compuestos relacionados ▲
Ácido sulfónico perfluorohexano (PFHxS), sus sales and PFHxS-compuestos relacionados ▲	Parafinas cloradas de cadena corta (SCCPs) ▲	Endosulfan y sus isómeros ●
Tetrabromodifenilo eter and pentabromodifenilo eter ▲	Toxafeno ●	UV-328 ▲
Parafinas cloradas C14-C17 ▲	Ácido perfluoro carboxílico ▲	Cloropirifos ▲

Anexo B (con restricciones)*

DDT ●	Ácido sulfónico perfluorooctano (PFOS), sus sales y fluoruro sulfonil perfluorooctano (PFOSF) ▲ ●
-------	---

Anexo C (producción no intencional)*

Hexaclorobenceno (HCB) ■	Hexaclorobutadieno (HCBd) ■	Pentaclorobenceno ■	Bifenilos clorados (PCB) ■
p-dibenzo-dioxinas policloradas (PCDD) ■	Dibenzofuranos policlorados (PCDF) ■	Naftalenos policlorados ■	

● Pesticida

▲ Sustancias industriales

■ Producción no intencional

Fuente: Consultado el 11 de marzo de 2025: <https://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>

*Anexo A: Prohibirá y/o adoptará las medidas jurídicas y administrativas que sean necesarias para eliminar su producción y utilización de los productos químicos enumerados en el anexo y sus importaciones y exportaciones.

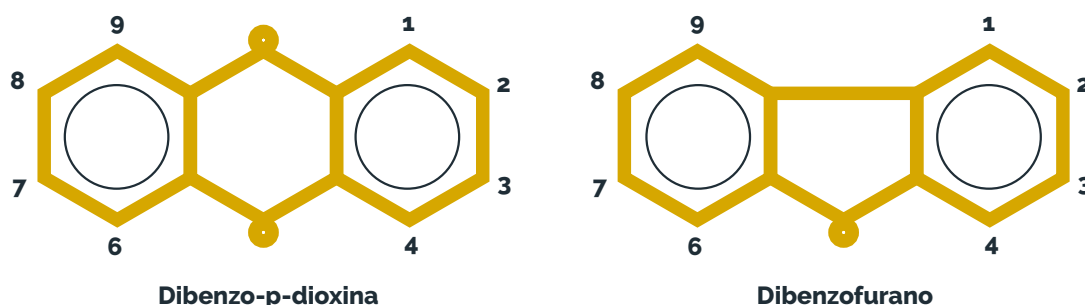
*Anexo B: Restringirá su producción y utilización de los productos químicos incluidos en el anexo B.

*Anexo C: Liberaciones derivadas de la producción no intencional.

2.2.1. Dioxinas y furanos

Las policloro dibenzo-p-dioxinas (PCDD) y las policloro dibenzofuranos (PCDF), o simplemente dioxinas y furanos, son dos clases similares de compuestos aromáticos tricíclicos que generalmente se forman como contaminantes o productos secundarios, que se producen de manera involuntaria a partir de procesos térmicos de combustión y/o en los procesos productivos asociados a una gran variedad de actividades que usan cloro o materiales con cloro. Estos productos pueden ser detectados en cantidades de trazas en el aire, agua, suelo, residuos y en los productos, permaneciendo intactos en el ambiente por largos periodos lo que les permite una amplia dispersión geográfica. Estas sustancias se acumulan en los tejidos grasos de los organismos vivos y son tóxicos a los humanos y a la vida silvestre (MADES/PNUD/FMAM, 2023). En la Figura 6 se pueden observar las estructuras de las dibenzo-p-dioxinas y del dibenzofurano.

Figura 6. Estructuras de la dibenzo-p-dioxina y dibenzofurano.



Fuente: Convenio de Basilea, 2017.

Las liberaciones de PCDD/PCDF solo podrían ocurrir cuando los cuatro elementos: cloro, carbono, oxígeno e hidrógeno estén presentes y reaccionen en conjunto bajo condiciones apropiadas.

Formación de los PCDD/PCDF

Se necesita carbono, oxígeno, hidrógeno y cloro, en su forma elemental, orgánica o inorgánica. En algún momento del proceso de síntesis, el carbono, ya sea que esté presente en un precursor o que sea generado por una reacción química, asumirá una estructura aromática.

Son dos las vías principales por las que se pueden sintetizar estos compuestos: a partir de precursores como los fenoles clorados o por síntesis de *novo* a partir de estructuras carbonáceas en cenizas volantes, carbón activado, hollín, moléculas más pequeñas, producto de una combustión incompleta, principalmente a temperaturas entre 200 y 450 °C, por lo que el enfriamiento de los gases postcombustión debe ser muy rápido. En condiciones de combustión deficiente, se pueden formar PCDD/PCDF durante el proceso mismo de combustión.

Los PCDD/PCDF también se destruyen cuando se incineran a temperatura suficiente, con tiempos adecuados de residencia y una buena mezcla de gases de combustión y materiales de desecho o combustibles de alimentación. Sin embargo, los gases de combustión también deben ser enfriados rápidamente en la zona de postcombustión, para minimizar la formación de nuevos PCDD/PCDF en esta fase (PNUMA, 2023).

Las buenas prácticas de combustión implican la gestión de "las tres Tes": **tiempo** de residencia, **temperatura** y **turbulencia**, y suficiente exceso de oxígeno que permita una oxidación completa.

En los procesos térmicos, entre las variables conocidas por su impacto en la formación térmica de PCDD/PCDF se encuentran las siguientes (PNUMA 2013):

- Tecnología: Los PCDD/PCDF pueden formarse por combustión deficiente o en cámaras de postcombustión y dispositivos de control de contaminación atmosférica mal operados. Las técnicas de combustión varían desde las más sencillas y rudimentarias, como la quema a cielo abierto, hasta las muy complejas y avanzadas, como la incineración con mejores técnicas disponibles.
- Temperatura: Se ha registrado la formación de PCDD/PCDF en zonas de postcombustión o dispositivos de control de contaminación atmosférica en el rango de 200 °C a 650 °C; por lo general se considera que el rango de mayor formación es de 200 °C a 450 °C, con el punto máximo en torno a los 300 °C.
- Metales: Es conocida la función catalizadora del cobre, hierro, zinc, aluminio, cromo y manganeso en la formación, cloración y dechloración de PCDD/PCDF.
- Azufre y nitrógeno: El azufre y algunos productos químicos que contienen nitrógeno inhiben la formación de PCDD/PCDF, pero pueden provocar la formación involuntaria de otras sustancias.
- El cloro debe estar presente en forma orgánica, inorgánica o elemental. Su presencia en cenizas volantes o en su forma elemental en la fase gaseosa puede ser de particular importancia.
- Los PCB también son precursores para la formación de PCDF.

Se considera que la formación de PCDD/PCDF en **procesos químicos** se encuentra favorecida por alguna o algunas de las siguientes condiciones:

- Temperaturas elevadas (>150 °C)
- Condiciones alcalinas
- Catalizadores metálicos
- Radiación ultravioleta (UV) u otros radicales iniciadores

En la producción de productos químicos que contienen cloro, la tendencia a la formación de PCDD/PCDF se ha registrado de la siguiente manera:

Clorofenoles > clorobencenos > alifáticos clorados > inorgánicos clorados.

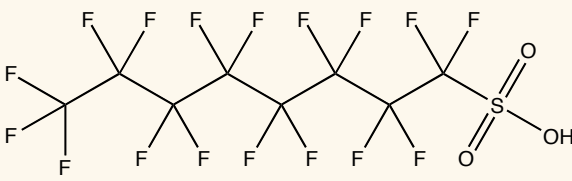
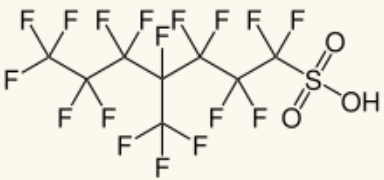
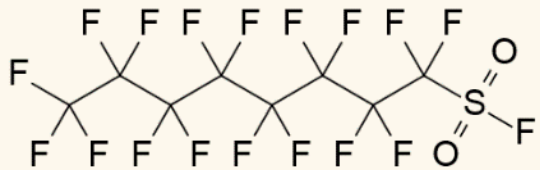
2.2.2. PFOS

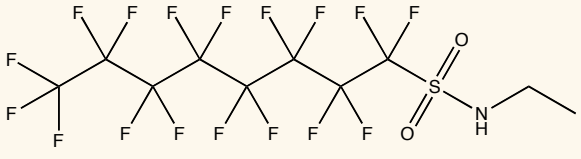
El PFOS, el PFOA y PFHxS se denominan sustancias perfluoroalquiladas o polifluoroalquiladas (PFAS) y pertenecen al grupo de los no polímeros del subgrupo de los ácidos perfluoroalquilados (PFAA). El PFOS pertenece al subgrupo de los ácidos perfluoroalcanos sulfónicos (PFSAS) y el ácido perfluorooctanoico (PFOA) pertenece al subgrupo de los ácidos perfluoroalcanos carboxílicos (PFCA). Ambos grupos contienen solo átomos de carbono y flúor en la fracción PFAA.

El PFOS es persistente y tiene propiedades sustanciales de bioacumulación y biomagnificación, aunque no sigue el patrón clásico de otros COP al dividirse en tejidos grasos. En cambio, se une a las proteínas de la sangre y el hígado. Tiene capacidad para ser transportado a larga distancia y ha demostrado su ecotoxicidad y toxicidad para los mamíferos.

El PFOS, sus sales y el fluoruro de perfluorooctanosulfonilo (PFOSF) se enumeran en la parte III del anexo B del Convenio. El producto químico fue incluido en la COP-4 en 2009 y la lista fue modificada por la COP-9 en 2019. En las Tablas 12 y 13 se muestra la estructura de diversos productos PFOS y PFOA, su nombre y su fórmula.

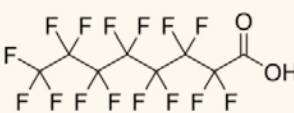
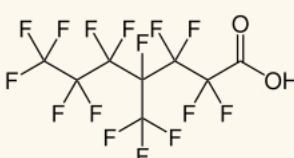
Tabla 12. Ejemplos de PFOS y sustancias relacionadas.

Fórmula estructural	Nombre y abreviatura de la sustancia	Fórmula
Productos químicos PFOS enumerados en el Convenio de Estocolmo		
	Ácido perfluorooctano sulfónico (lineal) PFOS	$F-(CF_2)_8-SO_3^-$ $C_8F_{17}-SO_3^-$
	Ácido 4-perfluorooctano sulfónico (ramificado) PFOS	$F-(CF_2)_8-SO_3^-$ $C_8F_{17}-SO_3^-$
Cation R ⁺ K ⁺ , Li ⁺ , NH ₄ ⁺ , N(C ₁₀ H ₂₃) ₂ (CH ₃) ₂ ⁺ 	Sulfonato de perfluorooctano de potasio; Sulfonato de perfluorooctano de litio; Sulfonato de perfluorooctano de amonio; Sulfonato de perfluorooctano de didecildimetilammonio	$F-(CF_2)_8-SO_3^-$ $C_8F_{17}-SO_3^-$
	Fluoruro de perfluorooctanosulfonilo PFOSF	$F-(CF_2)_8-SO_2FS$ $C_8F_{17}-SO_2F$

Fórmula estructural	Nombre y abreviatura de la sustancia	Fórmula
Sustancia relacionada con el PFOS para fines aceptables		
	N-etilperfluorooctanosulfo- namida EtFOSA También: sulfluramida	$F-(CF_2)_8-SO_2-NH-CH_2CH_3$ $C_8F_{17}-SO_2-N(H)C_2H_5$

Fuente: PNUMA (2023).

Tabla 13. Ejemplos de PFOA y compuestos relacionados.

Fórmula estructural	Nombre y abreviatura de la sustancia	Fórmula
PFOA		
	Ácido perfluorooctanoico (lineal) L-PFOA	$F-(CF_2)_7-COOH$ $C_7F_{15}-COOH$
	Ejemplo de ácido perfluorooctanoico (ramificado) Br-PFOA	$F-(CF_2)_7-COOH$ $C_7F_{15}-COOH$
	Polímero fluorado con cadenas laterales de perfluoroalquilo a base de C ₈	
	Alcohol fluorotelómero 8:2	$C_8F_{17}-CH_2-CH_2OH$
	8:2 fluorotelómero (metacrilato 8:2 FT-MAC)	$C_8F_{17}-CH_2-CH_2-O-C(=O)C(CH_3)=CH_2$

Fuente: PNUMA (2023).

2.3. Mercurio (Hg)

La preocupación por reducir los riesgos sobre la salud y el medio ambiente por la exposición a Hg derivó en la realización de diversas reuniones internacionales entre 2010 y 2013, que se cristalizaron en la adopción de un texto del instrumento jurídicamente vinculante, llamado Convenio de Minamata sobre el Mercurio, que tiene por objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio. El texto fue adoptado formalmente durante la Conferencia de Plenipotenciarios, que tuvo lugar en Kumamoto, Japón, en octubre de 2013 (PNUMA, 2019).

El gobierno de Paraguay aprobó el Convenio de Minamata el 10 de octubre de 2013, lo ratificó el 26 de julio de 2018 y lo aprobó el 10 de febrero de 2014 mediante la Ley N.º 6036/14.

El mercurio es un metal que se caracteriza por ser líquido inodoro a temperatura ambiente. Forma aleaciones con casi todos los metales, llamadas amalgamas, entre las que se destacan las de oro y plata. Al ser un metal líquido, siempre está en equilibrio con su presión de vapor, por lo que se volatiliza fácilmente. En la naturaleza el mercurio se encuentra asociado a otros elementos como el azufre, por ejemplo, el cinabrio. Se libera en el medio ambiente por causas naturales (incendios forestales, fallas y erupciones volcánicas) y por actividades humanas (antropógenas). (CCCB-CRCE, 2014).

Ha sido utilizado en múltiples aplicaciones, incluyendo varios procesos productivos como catalizador en la industria cloro-álcali y de producción de cloruro de vinilo, para la extracción de oro, en productos como dispositivos de medición (barómetros, higrómetros, manómetros, termómetros, esfigmomanómetros), interruptores y relés, lámparas fluorescentes, pilas, cosméticos, plaguicidas, biocidas, antisépticos tópicos y amalgama dental, así como en procesos de fabricación tales como los que comprenden la producción de acetaldehídos, metilatos o etilatos de sodio o potasio, poliuretano, chapado de oro y productos que contienen mercurio o compuestos de mercurio. El mercurio también puede ser un subproducto de procesos de refinación o producción de materias primas, como la refinación de petróleo y gas y la producción de metales no ferrosos. (CCCB-CRCE, 2014).

También puede ser emitido no-intencionalmente a partir de fuentes puntuales como los procesos de fundición y calcinación utilizados en la producción de metales, y el uso de carbón, como fuente de energía en centrales eléctricas y calderas industriales.

Una vez que el mercurio ingresa al ambiente como contaminante, es sumamente nocivo, dada su persistencia; movilidad (en la atmósfera puede transportarse a largas distancias); capacidad para formar compuestos orgánicos, bioacumularse y biomagnificarse en los organismos; también por su capacidad de formar compuestos orgánicos como el metilmercurio y, por supuesto, por su impacto negativo en la salud humana.

Los daños a la salud incluyen alteraciones permanentes del sistema nervioso, con un efecto especialmente perjudicial en el sistema nervioso en desarrollo. El mercurio atraviesa la barrera placentaria y puede transferirse verticalmente de madre a hijo durante el embarazo; los bebés, niños y mujeres embarazadas se consideran las poblaciones más vulnerables. Un cierto porcentaje del mercurio liberado al medio acuático es convertido por microorganismos en metilmercurio (MeHg), que es más tóxico y más biodisponible que el mercurio elemental (Hg), permaneciendo en el medio ambiente, donde se acumula y se biomagnifica en las cadenas alimentarias acuáticas y terrestres. (CCCB-CRCE, 2014).

2. 4. Situación de los COP y mercurio en Paraguay

2. 4. 1. Inventario de Compuestos Orgánicos Persistentes

Con base en datos del Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes para la República del Paraguay – año 2017, en la Tabla 14 se muestra el resumen de las sustancias COP, los productos que los contienen y la cantidad identificada de dichas sustancias considerando un año base de 2015 y existencias entre los años de 2007 al 2015. Se puede observar que existe una gran variedad de productos que pueden contener estas sustancias;

afortunadamente la gran mayoría de ellas ya se encuentran prohibidas, aunque se pueden ubicar en las corrientes de residuos urbanos cuando llegan a los sitios de disposición final al término de su vida útil (GEF-PNUMA, 2017).

Tabla 14. Inventario de compuestos orgánicos persistentes en Paraguay (2015).

Sustancias	Tipo de productos (fuente)	Cantidad (toneladas)
PFOS	Cuero, papel y cartón, productos de limpieza, recubrimientos de pintura, textiles y tapicería. Alfombras sintéticas, dispositivos médicos, tóner y tinta para impresora, espumas contra incendios, aceites de aviación, plaguicidas (sulfuramida).	21.465 (entre identificadas en el 2015 y existencias entre 2007 y 2014).
Hexabromociclo-dodecano (HBCD)	Poliestireno expandido y de alto impacto, espumas de poliestireno. Paneles para construcción, textiles y materiales asociados al sector transporte, aparatos electrónicos y eléctricos.	476
Éteres de bifenilos polibromados (PBDE)	c-pentaBDE y octaBDE: Espuma de poliuretano; automóviles y buses, muebles (colchones, sofás y cojines), industria textil y de caucho. Retardante de flama; artículos eléctricos y electrónicos (AEE), televisores y monitores CRT de ordenadores. COP-PBDE en vehículos al 2015.	Residuos de Aparatos Eléctricos Electrónicos (RAEE) (COPs-PBDE) importados en el 2015, 85.552. COP-octaBDE en existencias entre 2007 y 2015, 11.068,46 y en residuos 2.911,96 5.078
Bifenilos polibromados	Transformadores	Equipo contaminado 700 considerando el principio precautorio y en aceites de 35 t
Plaguicidas	Plaguicidas obsoletos	3.218.783 kg de plaguicidas obsoletos en 2017. 45 kg endosulfán (campo experimental caña de azúcar, ciudad de Natalicio Talavera) 20 kg endrín (granja de cerdos en Acambay) 13 kg endosulfán en Cooperativa Chortitzer, departamento de Boquerón. En 2006- FAO 6.864 kg y 2017 en SENAVE 19.078 (19.000 de sulfuramida).
Dioxinas y furanos	Incineración de desechos-Producción de metales ferrosos y no ferrosos-Generación de energía y calor-Producción de productos minerales-Transporte-Procesos de quema a cielo abierto-Producción y uso de productos químicos y artículos de consumo-Otros varios-Eliminación/Relleno Sanitario-Emplazamiento y puntos calientes	94.387 gr de EQT en el 2015 (80,9 % emitidas al aire).

Fuente: GEF-PNUMA (2017). Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo para la República del Paraguay⁶.

2. 4. 2. Inventario de emisiones y liberaciones de Mercurio

Si bien las fuentes de generación de desechos de mercurio varían de un país a otro, a nivel mundial las principales fuentes de desechos de mercurio son los procesos industriales que utilizan mercurio o compuestos de mercurio y los dispositivos que contienen mercurio que se han convertido en desechos. Otras fuentes importantes

6 [https://faolex.fao.org/docs/pdf/par218112.pdf#:~:text=El%20presente%20documento%20fue%20desarrollado%20en%20el,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C3%A9s\)%20y%20ejecutado](https://faolex.fao.org/docs/pdf/par218112.pdf#:~:text=El%20presente%20documento%20fue%20desarrollado%20en%20el,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C3%A9s)%20y%20ejecutado)

de desechos de mercurio son la producción, el procesamiento y la utilización de recursos naturales (por ejemplo, el procesamiento de minerales metalíferos no ferrosos, el procesamiento de petróleo y gas y la combustión de carbón).

El inventario de emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio de Paraguay utiliza datos de referencia que corresponden al año 2014, aunque para ciertas fuentes no se contaron con datos disponibles de dicho año, por lo cual recurrieron a informaciones de años anteriores (CCCB-CRCE, 2019).

En dicho inventario, se estableció que las liberaciones estimadas para el aire fueron de 7.964 kg Hg/a; para el agua, de 1.553 kg Hg/a; como desechos generales, un total de 2.643 kg Hg/a; a la tierra, de 916 kg Hg/a; como tratamiento/eliminación de desechos específicos del sector, 319 kg Hg/a, y como subproductos e impurezas, 34,57 kg Hg/a. Cabe resaltar que el total de las emisiones ascendió a 13.430 kg Hg/a. Los desechos generados de productos de consumo con contenido de mercurio (pilas, termómetros, tubos fluorescentes, entre otros) con 2.643,3 kg Hg/a, mientras que, del total de mercurio emitido al aire, las fuentes con mayores aportes fueron la incineración de desechos con 6.128,2 kg Hg/a; los productos de consumo con uso deliberado de mercurio (en la totalidad de su vida útil), con 802,9 kg Hg/a, y la producción de metales primarios (vírgenes), con 559 kg Hg/a (CCCB-CRCE, 2019⁷). En la Tabla 15 se presentan los resultados para los grupos de fuentes de emisión de mercurio:

Tabla 15. Resumen de resultados del inventario nacional de mercurio.

Categoría de fuente	Salidas calculadas de Hg	
	Total (Kg/a)	Porcentaje del total de emisiones
Extracción y uso de combustibles / fuentes de energía	161,5	1 %
Producción de metales primarios (vírgenes)	847,0	6 %
Producción de otros minerales y materiales con impurezas de mercurio	124,0	1 %
Productos de consumo con uso deliberado de mercurio (totalidad de la vida útil)	4.901,5	36 %
Otro uso deliberado en productos o procesos	869,4	6 %
Incineración y quema de desechos	6.131,0	46 %
Depósito/vertido de desechos y tratamiento de aguas residuales	1.721,1	3 %
Crematorios y cementerios	56,8	0 %
Total	13.429,9	100 %

Fuente: CCCB-CRCE, 2019.

En la Tabla 16 se muestran las fuentes de emisión de mercurio identificadas como presentes en el país en el inventario de emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio del Paraguay.

7 CCCB-CRCE, 2019. Evaluación Inicial del Convenio de Minamata en Paraguay. CCCB-CRCE para América Latina y el Caribe. 65 pp. https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/minamata_initial_assessment/Paraguay-MIA-2019-SP.pdf

Tabla 16. Fuentes de emisión de mercurio presentes en el país.

Categoría de la fuente
Categoría principal: extracción y uso de combustibles/fuentes de energía
Otras combustiones de carbón
Extracción, refinación y uso de aceite mineral
Extracción, refinación y uso de gas natural
Extracción y uso de otros combustibles fósiles
Energía y producción de calor de biomasa
Categoría principal: producción primaria (virgen) de metales
Extracción de oro (y plata) con procesos de amalgamación de mercurio ⁸
Extracción y procesamiento inicial de oro por procesos distintos a la amalgamación de mercurio
Producción primaria de metales ferrosos
Categoría principal: producción de otros minerales y materiales con impurezas de mercurio
Producción de cemento
Producción de cal y hornos para conglomerados livianos ⁹
Categoría principal: productos de consumo con uso intencional de mercurio
Termómetros con mercurio
Interruptores eléctricos y electrónicos, contactos y relés con mercurio
Fuentes de luz con mercurio
Pilas que contienen mercurio
Categoría principal: otros usos intencionales en productos/procesos
Empastes de amalgamas dentales
Manómetros y medidores
Productos químicos y equipos de laboratorio
Categoría principal: incineración de residuos
Incineración de desechos médicos
Quema informal de desechos al aire libre en vertederos
Categoría principal: depósito/vertido de desechos y tratamiento de aguas residuales
Vertederos o depósitos controlados
Vertido informal de desechos generales
Sistema/tratamiento de aguas residuales
Categoría principal: cremación y cementerios
Crematorios y cementerios

Fuente: CCCB-CRCE, 2019.

⁸ Esta subcategoría no fue tratada en este documento.

⁹ En el país existe producción de cal y aglomerados livianos; sin embargo, no se contaron con datos sobre el factor de entrada de mercurio para la cuantificación de dichas subcategorías.

2. 5. Género y medio ambiente

La integración de la perspectiva de género es un componente crucial en la implementación de los Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo (BRE), ya que garantiza que las diferentes necesidades y perspectivas de hombres y mujeres se consideren en el proceso de toma de decisiones. Las sustancias químicas y los residuos peligrosos afectan de manera diferente a mujeres y hombres, y las desigualdades de género pueden exacerbar estas diferencias¹⁰.

Las mujeres suelen estar más expuestas a sustancias químicas y residuos peligrosos que los hombres, ya que tienen mayor probabilidad de trabajar en industrias que implican la manipulación de estas sustancias, como la agricultura y en el sector salud. También es más probable que las mujeres participen en el sector informal, que a menudo implica la manipulación de residuos peligrosos. Además, las mujeres pueden tener diferentes roles culturales y sociales, lo que puede afectar su exposición a las sustancias químicas y los residuos¹¹.

La integración de la perspectiva de género también garantiza la representación de las mujeres en los procesos de toma de decisiones, lo cual es esencial para promover la igualdad de género y lograr el desarrollo sostenible. Se ha demostrado que la participación de las mujeres en la toma de decisiones ambientales genera mejores resultados ambientales, ya que a menudo aportan perspectivas y experiencias únicas.

2. 5. 1. Plan de acción de Género del BRE (Basilea, Rotterdam y Estocolmo)

El BRE desarrolló un Plan de Acción de Género para garantizar que los principios de igualdad de género se integren firmemente en las actividades de la Secretaría de los Convenios BRE, de conformidad con las políticas de género aplicables de las Naciones Unidas y el PNUMA. Para lograr esta visión, el Plan de Acción de Género destaca diversas áreas de acción, entre las cuales se destacan las siguientes¹¹:

- Desarrollar una base de referencia sobre cuestiones de género y medir el progreso en el logro de los objetivos del Plan de Acción de Género y la implementación de las actividades;
- Garantizar que los programas y proyectos de la Secretaría se planifiquen e implementen desde una perspectiva de igualdad de género;
- Promover la consideración de las cuestiones de género en la gestión de productos químicos y residuos peligrosos a nivel nacional y regional;
- Apoyar al personal para lograr un equilibrio sostenible entre la vida laboral y personal.

El Plan de Acción busca que los países integren esquemas que permitan:

Mejorar la comprensión de los posibles impactos que los productos químicos y los desechos peligrosos pueden tener en personas de diferentes géneros y en grupos vulnerables;

Mejorar la integración sistemática de las consideraciones de género por parte de las Partes y otros actores clave en la implementación de los Convenios de BRE; y

¹⁰ <https://www.brsmeas.org/Implementation/Gender/Overview/tabid/3651/language/en-US/Default.aspx>

¹¹ UNEP (n/d). BRS Conventions. Gender Overview.

Promover la participación igualitaria y significativa de las mujeres en la toma de decisiones a nivel nacional y regional con respecto a la gestión de productos químicos y desechos peligrosos y en los procesos de BRE.

2.5.2. Brechas y oportunidades en América Latina y El Caribe en materia de Género y Ambiente

En el informe de PNUMA, (2020)¹², sobre Género y Medio Ambiente, un análisis preliminar de brechas y oportunidades en América Latina y el Caribe, se señala que durante la XXI reunión celebrada en Buenos Aires, Argentina, del 9 al 12 de octubre de 2018, los ministros discutieron temas relacionados con la contaminación, la descarbonización y el uso sostenible de los recursos naturales, entre otros. La Declaración Ministerial de Buenos Aires incluyó por primera vez el siguiente acuerdo (los textos desarrollados hasta el apartado de consumo y producción sostenible y gestión de residuos se basan fundamentalmente en este informe):

"Considerar la perspectiva de género como una variable significativa para el desarrollo e implementación de políticas públicas en materia ambiental, considerando las brechas que hoy están presentes en la región y las oportunidades que surgen del intercambio de experiencias en esta materia, para cumplir con los requisitos de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)".

Por otra parte, la 4.ª Asamblea Ambiental de la ONU adoptó una decisión para promover la igualdad de género, los derechos humanos y el empoderamiento de las mujeres y las niñas en la gobernanza ambiental (UNEP/EA.4/RES.17, 2019), reconociendo el papel que desempeñan las mujeres como gestoras de los recursos naturales y agentes de cambio en la protección del medio ambiente. Los Estados miembro también solicitaron al PNUMA que facilitara la recopilación de datos y lecciones aprendidas de estas naciones y de otras partes interesadas, sobre el progreso en el logro de la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres y las niñas, en las políticas, programas e iniciativas ambientales locales, nacionales y mundiales.

Los países y las instituciones han reconocido la importancia de un enfoque sensible al género, para abordar los desafíos ambientales y lo han incluido en los planes nacionales y acuerdos internacionales. Hoy en día, la igualdad de género es un concepto que se ha incorporado a la mayoría de los acuerdos ambientales multilaterales (AAM). Las tres convenciones principales de Río, Diversidad Biológica (CDB), Cambio Climático (CMNUCC) y Lucha contra la Desertificación (CLD), así como las Convenciones de Basilea, Rotterdam y Estocolmo (BRS) y los principales mecanismos financieros ambientales, incluido el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el Fondo Verde para el Clima (GCF por sus siglas en inglés), los Fondos de Inversión para el Clima (CIF por sus siglas en inglés) y el Fondo de Adaptación, todos tienen marcos rectores para garantizar la participación equitativa de las mujeres y asegurar que su implementación sea sensible al género.

En dicho informe se plasman las brechas ambientales identificadas en materia de género y medio ambiente, las cuales se mencionan a continuación:

- ➔ *Las mujeres y las niñas experimentan niveles extremos de pobreza de manera más desproporcionada que los hombres y los niños: de más de mil millones de personas que viven en los niveles más profundos de pobreza, se considera que las mujeres son la mayoría.*

¹² PNUMA, 2020. Género y medio ambiente: un análisis preliminar de brechas y oportunidades en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ciudad de Panamá: PNUMA. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34929/GEN_ES.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- *Existen grandes diferencias entre mujeres y hombres en cuanto a la tenencia de la tierra: a nivel mundial, menos del 20 % de todos los propietarios de tierras son mujeres. En solo 28 países del mundo, las mujeres tienen los mismos derechos legales que los hombres, a poseer y acceder a la tierra.*
- *Si bien el tamaño total de la población analfabeta mundial se está reduciendo, la proporción de mujeres ha persistido: las mujeres representan dos tercios (493 millones) de los 774 millones de adultos analfabetos (15 años o más) en el mundo, y entre los jóvenes, más de la mitad son niñas (76 millones de un total de 123 millones).*
- *Cuando a las mujeres se les paga por un trabajo, reciben en promedio entre un 10 % y un 30 % menos que los hombres, por el mismo trabajo: se estima que, al ritmo actual de progreso, se necesitarán 75 años para que el principio de "igualdad de remuneración por un trabajo de igual valor" sea una realidad para mujeres y hombres.*
- *Las mujeres también tienen menos acceso a los mercados laborales, especialmente a los mercados formales: en 2013, la relación entre el empleo masculino y la población se situó en el 72,2 %, mientras que la relación para las mujeres fue del 47,1 %.*
- *Las mujeres soportan la carga del trabajo del cuidado no remunerado: dedican de una a tres horas más al día al trabajo doméstico que los hombres; de dos a diez veces más tiempo al día para cuidar (niños, ancianos y enfermos) y de una a cuatro horas menos al día para actividades del mercado. En la Unión Europea, por ejemplo, el 25 % de las mujeres informó que el cuidado y otras responsabilidades familiares y personales son la razón para no estar en la fuerza laboral, frente a solo el 3 % de los hombres. Esto tiene un impacto directo y negativo en la participación de la mujer en la fuerza laboral. Las esferas de toma de decisiones en todos los niveles siguen estando desequilibradas: a septiembre de 2015, solo el 22 % de todos los parlamentarios eran mujeres, un pequeño aumento desde el 11,3 % de 1995.*
- *La toma de decisiones de alto nivel sobre el medio ambiente también es desigual: según los datos de la Unión Interparlamentaria de 2014, las mujeres ocupaban aproximadamente el 17 % del total de puestos ministeriales en todo el mundo, pero en 2015, según el Índice de Género y Medio Ambiente (EGI, por sus siglas en inglés), las mujeres ocuparon solo el 12 % de los altos cargos ministeriales, en los sectores relacionados con el medio ambiente.*

El análisis de brechas de género y su relación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible identifica 10 temas claves (ver Tabla 17), de los cuales, por su relación con el tema de sustancias químicas, se abordarán los relacionadas con mujeres en minería y consumo y producción sostenible y gestión de residuos.

Tabla 17. Brechas de género en materia ambiental identificadas en América Latina y El Caribe y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Brecha de género	Problemática ambiental	Objetivos de Desarrollo Sostenible
Derecho a la gestión de la tierra y los recursos naturales	Derecho a la tierra y el rol de la mujer en la agricultura	   
	Mujeres en la minería de pequeña escala	  
	Mujeres en la pesca	  
	El papel de la mujer en la defensa de los derechos ambientales	  
Bienestar y cambio climático	Riesgo de desastres e impactos del cambio climático**	  
	Consumo y producción sostenible y gestión de residuos	  
Acceso a energía, agua y saneamiento	Acceso a agua y saneamiento	 
	Acceso a energía limpia para cocinar	 
	Acceso a energía	 
Gobernanza y participación ambiental (transversal a todo lo anterior)	Las mujeres en la toma de decisiones ambientales	  

* La salud se ha considerado un tema transversal y, por lo tanto, las implicaciones para la salud se incluyen en varias brechas.

** Todos estos temas ambientales y diferencias de género pueden tener un impacto en el ODS 13 (Acción Climática), considerando que las mujeres no solo son especialmente vulnerables al cambio climático, sino también agentes de cambio para enfrentar este desafío global.

Fuente: PNUMA, 2020. Género y medio ambiente: un análisis preliminar de brechas y oportunidades en América Latina y el Caribe.

2. 5. 3. Mujeres en minería a pequeña escala

El informe señala que, a nivel mundial, las operaciones mineras artesanales y de pequeña escala emplean entre 20 y 30 millones de personas, lo que proporciona medios de vida a más de 100 millones. En América Latina, esta actividad se concentra en Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Perú, con una alta tasa de informalidad, lo que expone a los trabajadores y comunidades a niveles de riesgos para la salud y la seguridad, en especial a las mujeres y niños.

Entre los más de 20 millones de MAPE activos en todo el mundo, la proporción de mujeres mineras se estimó en alrededor del 30 por ciento en 2003; su participación puede ser ahora mucho mayor. Las mujeres representan más del 10 por ciento e incluso más del 50 por ciento de los mineros, en algunos países asiáticos y en América Latina, comprenden aproximadamente del 10 al 30 por ciento.

Las mujeres, además de trabajar directamente en la minería, suelen trabajar a tiempo parcial en operaciones mineras informales y ocupan roles auxiliares (por ejemplo, cocineras y proveedoras de servicios). Por lo general, suelen tener responsabilidades domésticas intensivas, y trabajar de cuatro a ocho horas más que los hombres al día, lo que aumenta su carga de trabajo; esto en gran parte no se reconoce y está infravalorado.

A nivel de la mina, ya sea por cuenta propia o como miembro de una cooperativa minera, mientras que la mayoría de los hombres se dedican al trabajo de extracción, la mayoría de las mujeres recuperan los relaves de las actividades mineras en trabajos de cantera o aluviales, transporte y lavado de minerales. Las etapas de procesamiento y refinación de minerales a menudo se atribuyen a las mujeres, que son percibidas como más meticulosas para la selección manual, como sucede con las esmeraldas de fragmentos de roca en Brasil, la amalgamación y la descomposición de la amalgama en la extracción de oro. Los hombres tienden a dominar la comercialización de minerales, mientras que las mujeres suelen depender de compradores que luego los revenden a las plantas de procesamiento. En las cooperativas mineras, los hombres generalmente desempeñan funciones de gestión, mientras que las mujeres prestan servicios administrativos, de limpieza y preparación de alimentos y de salud.

Esta división del trabajo por género también expone a las mujeres a sustancias químicas altamente tóxicas, como el mercurio y el cianuro, debido a la manipulación de estas sustancias con las manos desnudas y la exposición a los vapores en las etapas de procesamiento de minerales, especialmente durante la extracción de oro artesanal a pequeña escala. La exposición a estas sustancias peligrosas puede causar degeneración neurológica, óptica e incluso la exposición crónica puede ser fatal.

Además, el mercurio se bioacumula en los organismos acuáticos y también se biomagnifica a lo largo de la cadena trófica. Esto puede ser particularmente perjudicial para las mujeres embarazadas, el desarrollo del feto y los recién nacidos, e incluso causar esterilidad, aun si no están directamente involucradas en actividades mineras. En las comunidades mineras las mujeres no solo tienen los trabajos peor pagados y con mayor exposición a sustancias químicas nocivas, sino que también son explotadas durante el trabajo sexual.

En Paraguay, en el Informe Final Estudio de Panorama Nacional del Sector MAPE (NAP, PNUMA, GEF, 2019), que forma parte del Plan de Acción Nacional sobre Mercurio, se evaluó el impacto en salud por exposición en el uso del mercurio en la minería artesanal de oro en la ciudad de Paso Yobái. El estudio consideró, principalmente, a hombres trabajadores y mujeres. Entre los principales síntomas identificados se tienen: temblor de los dedos de las manos y de los párpados, irritación y/o picazón en nariz y/o garganta, y náuseas, vómitos, diarrea, digestión pesada. A nivel neurológico se identificaron trastornos en la memoria reflejados en olvidos. Un importante hallazgo de la consultoría fue que el 11 % del universo de trabajadores censados sobrepasan el valor máximo permitido de 5 ug/24 horas de mercurio en orina.

2. 5. 4. **Consumo y producción sostenible y gestión de residuos**

Las prácticas inadecuadas, la falta de recursos y de profesionalización de los servicios de limpieza (separación, reúso, reciclaje, recolección, tratamiento y disposición final) han sido factores para contribuir a la aparición de la informalidad en

el proceso de gestión de residuos, a través de recicladores informales (segregadores, o pepenadores, dependiendo de la región de América Latina). Se estima que unos 4 millones de personas participan en dichas actividades.

Normalmente, los recicladores informales son un sector estigmatizado que vive en condiciones socioeconómicas precarias; sin embargo, realizan una actividad que beneficia a los gobiernos locales al crear insumos para varias cadenas de valor; se estima que contribuyen entre el 25 % y el 50 % de todos los materiales reciclados en ALC. Además, alargan la vida productiva de los rellenos sanitarios, disminuyen los costos de transporte y aportan beneficios ambientales y para la salud, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la eliminación de materiales tóxicos.

En Brasil, hay más de un cuarto de millón de recicladores, de los cuales el 33 % son mujeres, mientras que, en Quito, Ecuador, hay 2.400 recicladores informales, de los cuales el 70 % son mujeres. Las mujeres se enfrentan a desigualdades y amenazas, realizan su labor sin las herramientas necesarias y sin ningún tipo de protección social. Las recicladoras tienen acceso a materiales de reciclaje menos valiosos que los hombres, que no solo representan menos ingresos, sino que también tienen mayores riesgos para la salud. En estas condiciones, las mujeres son especialmente vulnerables y los hombres ganan constantemente más que las mujeres recicladoras. Otro factor que las afecta es la violencia y el acoso sexual, así como la falta de apoyo social para el cuidado de los niños, lo que las obliga a llevar a sus hijos al trabajo.

Las mujeres y los niños están más expuestos a los efectos nocivos de la inadecuada gestión de los desechos, porque permanecen cerca de sus hogares y, por lo tanto, están expuestos al humo de la práctica común de quemar los desechos, lo que los hace más vulnerables a las sustancias nocivas, debido a sus efectos endocrinos. El sistema se ve afectado de manera desproporcionada por sustancias químicas que provocan cáncer de mama y problemas reproductivos. Las exposiciones ocupacionales a sustancias químicas utilizadas en la industria del plástico pueden contribuir al desarrollo de cáncer de mama y a problemas reproductivos. Los recicladores están expuestos a productos químicos sintéticos, especialmente plásticos, que han sido identificados como carcinógenos mamarios y disruptores endócrinos, y su entorno de trabajo a menudo está muy contaminado con polvo y vapores.

Por otra parte, abordando el tema de las sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables, con el aumento del crecimiento y desarrollo de la población, se ha intensificado el uso de productos químicos en la producción agrícola e industrial. La urbanización y el aumento del consumo imponen exigencias cada vez mayores a la gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales.

En el documento *Género y estadísticas ambientales* (UNEP and IUCN, 2018)¹³ se señala que el uso de algunos productos químicos y contaminantes, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP), ha provocado la degradación ambiental y la contaminación del agua y del aire, todo lo cual tiene impactos de género en la salud y el bienestar. Las mujeres embarazadas y lactantes son, una vez más, particularmente vulnerables a la contaminación química y los COP, lo que refuerza la urgente necesidad de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles y de lograr que los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

13 UNEP and IUCN. (2018). Gender and environment statistics: Unlocking information for action and measuring the SDGs. UN Environment, Nairobi, Kenya. 161 pp.

2.5.5. Algunos ejemplos de la exposición de mujeres al mercurio

En un estudio realizado por la Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN, por sus siglas en inglés) y por el Instituto de Investigación de la Biodiversidad (bri, por sus siglas en inglés) (IPEN, bri, 2017)¹⁴ en un universo de 1044 mujeres en edad fértil de 25 países, el 42 % de ellas presentaron niveles de mercurio mayores a 1 ppm, correspondiente a la dosis de referencia de EPA de EUA (considera que la exposición a este nivel probablemente no presentará un riesgo considerable de efectos dañinos durante la vida de una persona). El 55 % de las mujeres presentaron niveles de mercurio mayores a 0.58 ppm, un umbral más reciente y con fundamento científico basado en datos que indican efectos dañinos a niveles inferiores de exposición a este nivel. El mercurio es una amenaza a la salud de mujeres y el feto en desarrollo.

Las principales fuentes de exposición al mercurio identificadas para las mujeres que participaron en el estudio fueron: el consumo de pescado; la amalgamación de mercurio; y poblaciones que residen cerca de plantas de energía que operan con carbón, las plantas de producción de cemento y otras industrias (IPEN, bri, 2017).

En otro estudio realizado en Colombia (Díaz et al, 2020¹⁵), cuyo objetivo fue explorar la relación entre los niveles de mercurio en mujeres y sus posibles fuentes de contaminación, entre 2014 y 2015 con mujeres residentes en 11 municipios de La Mojana, Colombia, a las participantes se les tomaron muestras de sangre, orina y cabello para cuantificar los niveles de mercurio. Los resultados indican que las mujeres están expuestas principalmente al mercurio a través del consumo de pescado contaminado por la minería de oro y los principales sistemas afectados son el sistema nervioso central y el renal y el sistema reproductivo.

En un estudio de caso realizado en Bolivia entre 2019 y 2020 por el secretariado del BRE (BRE, 2021¹⁶) se identificaron las dimensiones de género en los puntos críticos de contaminación química y de residuos, así como buenas prácticas en materia de reciclaje y agroecología. El universo de visitas incluyó a comunidades indígenas de la cuenca del río Beni afectadas por el mercurio utilizado en la extracción de oro, agricultores indígenas que utilizan plaguicidas altamente peligrosos, vendedores de plaguicidas altamente peligrosos en el mercado, el vertedero de la capital y varios vertederos clandestinos, incluidos los utilizados para residuos de asbesto.

El estudio se desarrolló específicamente en el pueblo indígena Esse Ejjas en Eyiyo Quibo, que se autodenomina "el pueblo del río" debido a su desplazamiento a lo largo del río, cuya dieta se basa en pescado y plátano, y se estima que presentan el mayor nivel de desnutrición del país y ya enfrentan la contaminación por mercurio de su pescado, que es su principal fuente de proteínas.

Como parte del estudio, se tomaron 65 muestras de cabello de comunidades de mujeres que viven en dos regiones amazónicas de Bolivia afectadas por la minería de oro con mercurio. Los resultados muestran que todas las participantes, mujeres de entre 18 y 55 años que viven en comunidades indígenas, presentaron niveles muy altos de mercurio en el cabello, lo cual indica que el mercurio se ha acumulado en sus cuerpos y que las mujeres con hijos transmitirán la contaminación por mercurio a sus hijos durante la lactancia y el embarazo.

14 IPEN, bri, (2017). Contenido de mercurio en mujeres en edad reproductiva de 25 países, IPEN. 24 pp.

15 Díaz, S. M., Palma, R. M., Muñoz, M. N., Becerra-Arias, C., & Fernández Niño, J. A. (2020). Factors Associated with High Mercury Levels in Women and Girls from The Mojana Region, Colombia, 2013-2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1827. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061827>.

16 BRE (2021). Gender, Chemicals and Waste. Gender dimensions of chemicals and waste policies in Bolivia in relation to the Minamata, Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions. Case study Bolivia, 2019-2020. BRE. 58 pp.

Todas las mujeres de las comunidades indígenas de Eyiyo Quibo y Portachuelo que se realizaron la prueba presentaron niveles superiores a 1,0 partes por millón, el nivel máximo seguro establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El nivel recomendado es inferior a 0,58 ppm. (ver Tabla 18)

Tabla 18. Resultados del muestreo de cabello comparados con el estándar de referencia de la OMS de 1 ppm y la concentración propuesta de mercurio de 0,58 ppm.

Localidad	N.º de muestras	Concentración promedio de Hg en ppm	N.º de muestras mayores a 1 ppm	% de muestras mayores a 1 ppm	% de muestras mayores a 0,58 ppm	Niveles más altos de Hg (ppm)
Eyiyo Quibo	25	8,95 ± 6,34	25	100,0 %	100,0 %	32,4
Portachuelo	35	6,44 ± 2,18	35	100,0 %	100,0 %	11,75
Control group	4	0,20 ± 0,17	0	0,0 %	0,0 %	0,43
Total	64	7,58 ± 4,76	60	100,0 %	100,0 %	32,42

Fuente: BRE, 2021. Gender, Chemicals and Waste, 2021.

Los resultados presentados en la Tabla 18 muestran que todas las muestras rebasan el límite establecido por la OMS y del recomendado de 0,58 pp. Cabe señalar que las mujeres no se dedican a la minería, por lo que la fuente principal de exposición al Hg es el consumo de pescado.

Finalmente, un estudio realizado por Benefice (Benefice 2010¹⁷) en el 2007 en esa zona, llegó a la siguiente conclusión: «Las mujeres presentaron un nivel medio de mercurio en el cabello de $5,4 \pm 4,3 \mu\text{g/g}$ (mín.: 0,15; máx.: $20,08 \mu\text{g/g}$) y los niños y adolescentes de $5,3 \pm 4,5 \mu\text{g/g}$ (mín.: 0,08; máx.: $34,14 \mu\text{g/g}$). Reporta que existe una relación significativa entre el mercurio en el cabello y el consumo de pescado, lo que coincide con los resultados obtenidos en el estudio de BRE.

17 Benefice, E., Luna-Monroy, S., & Lopez-Rodriguez, R. (2010). Fishing activity, health characteristics and mercury exposure of Amerindian women living alongside the Beni River (Amazonian Bolivia). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213(6), 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.08.010>.

Notas

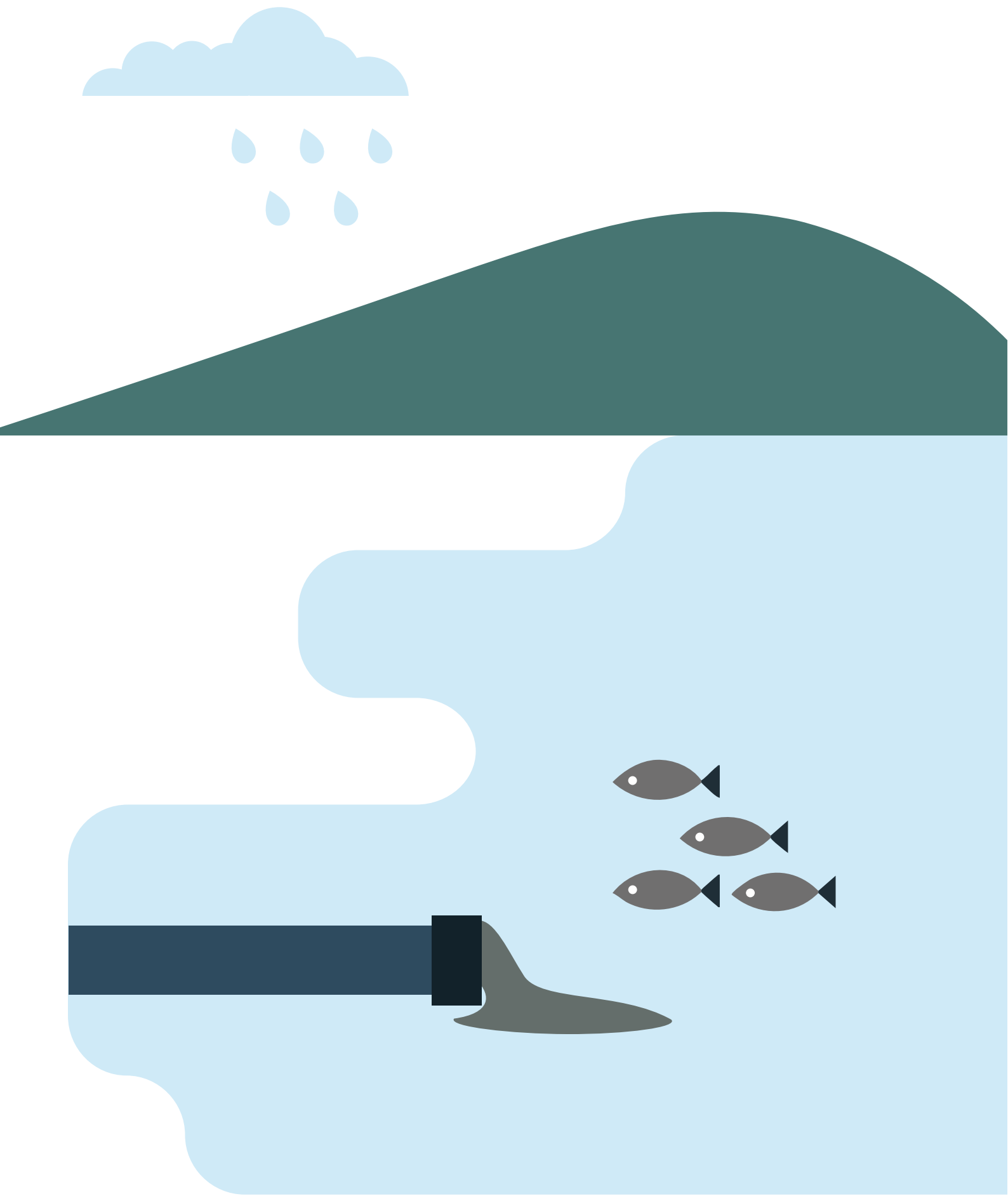
Notas

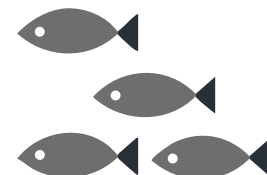
Notas

Notas

Notas

Notas





3. Marco Jurídico de Paraguay aplicable a COP y Hg

Los instrumentos legislativos vinculados a la temática de los residuos peligrosos y a los COP y Hg tienen como referencia primaria la Constitución Nacional, además de tratados y convenios internacionales, leyes, decretos y regulaciones específicas.

Constitución Nacional de Paraguay

La Constitución Nacional de Paraguay es la ley suprema de la República y en su Art. 137 señala: "La ley suprema de la República es la Constitución. Esta, los tratados, convenios y acuerdos internacionales aprobados y ratificados, las leyes dictadas por el Congreso y otras disposiciones jurídicas de inferior jerarquía, sancionadas en consecuencia, integran el derecho positivo nacional en el orden de prelación enunciado".

La Constitución paraguaya vela por salvaguardar los derechos y garantías de los ciudadanos que puedan verse comprometidos debido al mal manejo de los residuos peligrosos. En conjunto, el Artículo 6–De la Calidad de Vida, el Artículo 7–Del Derecho a un Ambiente Saludable y el Artículo 68–Del Derecho a la Salud exhortan al Estado a velar por la conservación del ambiente y de la calidad de vida de los habitantes. Dentro de la Constitución se hace explícita la prohibición de actividades peligrosas para el ambiente, incluyendo la importación de los residuos peligrosos.

3.1. Acuerdos ambientales multilaterales ratificados por Paraguay y sus instrumentos normativos nacionales

Paraguay ha ratificado los distintos convenios multilaterales que han sido emitidos y en cumplimiento con los mismos ha desarrollado los instrumentos normativos vinculados a estos. En la Tabla 19 se describen los distintos acuerdos multilaterales y sus instrumentos normativos en Paraguay.

Tabla 19. Descripción de acuerdos multilaterales ratificados y sus instrumentos normativos.

Título del Acuerdo Multilateral	Instrumento normativo	Descripción
Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación¹⁸ https://www.basel.int/	Ley N.º 567/95 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/11201/ley-n-567	Ley que aprueba el Convenio de Basilea, en el que se mencionan las directrices y los principios internacionalmente reconocidos sobre el control racional de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación; prohíbe a los países importar residuos peligrosos que no tengan la capacidad de tratar. Es la base para la clasificación de los residuos peligrosos por sus características de peligrosidad: explosivos, inflamables, oxidantes, peróxidos orgánicos, tóxicos, infecciosos, corrosivos.
	Ley N.º 1262/98 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/834/ley-n-1262	Que aprueba la enmienda al Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación.
	Decreto N.º 7084/00 https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC047981/	Prohíbe la importación al Paraguay de residuos textiles (artículos de prendería, trapos, entre otros).
Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) https://chm.pops.int/	Ley N.º 2333/03 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/5030/ley-n-2333	Ley que aprueba el Convenio de Estocolmo, comprometiéndose a prohibir la producción y el uso de diferentes plaguicidas y a llevar inventarios de los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP) que se encuentran en el país.
	Resolución MADES N.º 138/23 https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2025/04/Resolucion-N%C2%B0-138-2023.pdf	Por la cual se establecen medidas para la gestión de bifenilos policlorados (PCB) en la República del Paraguay y se dispone su reglamentación en el marco de la Ley 2333/04, derogando las Resoluciones N.º 1190/08 y 1402/11.
	Resolución MADES N.º 226/24	Por la cual se aprueban los protocolos manuales para Gestión Ambientalmente Racional de Bifenilos policlorados (PCB).
Convenio de Minamata sobre el Mercurio¹⁹ https://minamataconvention.org/	Ley N.º 6036/2018 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/9690/ley-n-6036	Ley que aprueba el Convenio de Minamata sobre el mercurio. Este convenio se centra en la reducción de las emisiones y liberaciones de mercurio. Establece directrices para la gestión de residuos que contienen mercurio a lo largo de su ciclo de vida.

18 Autoridad de aplicación es el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES).

19 Autoridad de aplicación es el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES).

Título del Acuerdo Multilateral	Instrumento normativo	Descripción
Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo (CFP) para ciertos pesticidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional https://www.pic.int/	Ley N.º 2135/03 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/412/ley-n-2135	Ley que aprueba el Convenio de Rotterdam que tiene por objetivo promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las Partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños.
	Decreto N.º 2171/24 https://www.asuntosregulatorios.com.py/2024/07/29/decreto-n-2171-24	El Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Vegetal y de Semilla (SENAVE) es la autoridad nacional en el ámbito de productos plaguicidas y formulaciones de plaguicidas y el MADES es la autoridad nacional en el ámbito de productos químicos industriales.
	Resolución SENAVE N.º 447/93	Por la cual se prohíbe la importación, formulación, venta y uso de insecticidas a base de organoclorados.
	Resolución SENAVE N.º 635/10	Que suspende la emisión de nuevos registros y la importación al país de productos técnicos o formulados a base de endosulfán, en todas sus concentraciones.
Acuerdo marco de medio ambiente del MERCOSUR https://www.oas.org/dsd/Tool-kit/Documentos/MOduleII/Acuerdo%20Marco%20Sobre%20Medio%20Ambiente%20del%20MERCOSUR.pdf	Ley N.º 2068/03 http://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/4347/ley-n-2068	Las naciones que componen el MERCOSUR se comprometen a cooperar para la protección del medio ambiente y la utilización sustentable de los recursos naturales, con vistas a alcanzar una mejor calidad de vida y un desarrollo económico, social y ambiental sustentables. Dentro de la temática considerada en el Acuerdo se incluyen los residuos peligrosos y las sustancias y productos peligrosos.

3. 2. Normas jurídicas nacionales vinculadas directamente a los COP y Hg en Paraguay

En la Tabla 20 se describen las normas jurídicas en Paraguay directamente vinculadas a un manejo racional de los COP y del Hg, y en general de los residuos peligrosos.

Tabla 20. Normas jurídicas nacionales vinculadas directamente a los COP y Hg en Paraguay.

Título de la Norma Jurídica	Instrumento normativo	Descripción
Gestión integral de los residuos sólidos en la República del Paraguay	Ley N.º 3956 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/3208/gestion-integral-de-los-residuos-solidos-en-la-republica-del-paraguay	Tiene por objeto el establecimiento y aplicación de un régimen jurídico a la producción y gestión responsable de los residuos sólidos, cuyo contenido normativo y utilidad práctica deberá generar la reducción de los mismos, al mínimo, y evitar situaciones de riesgo para la salud humana y la calidad ambiental.
Reglamento la Ley N.º 3956/2009, "Gestión integral de los residuos sólidos en la República del Paraguay"	Decreto N.º 7391/2017 https://baselegal.com.py/docs/3807b55c-8278-11eb-990a-525400c761ca	Establece las condiciones para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos, con la finalidad de prevenir riesgos sanitarios, proteger y promover la calidad ambiental, la salud y el bienestar de la persona humana.
Orgánica municipal	Ley 3966/10 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/969/ley-n-3966-organica-municipal	Establece el marco legal para el funcionamiento de los gobiernos municipales
Gestión integral de pilas y baterías de uso doméstico.	Ley 5882/17	Establece mecanismos para el manejo adecuado de pilas y baterías usadas, promoviendo su segregación, reutilización, almacenamiento, recolección, transporte, reciclaje, tratamiento y disposición final, con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente.
Código Aduanero	Ley N.º 2422/94 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2276/ley-n-2422	Establece la atribución de recaudar los tributos a la importación y a la exportación, así como las responsabilidades en cuanto a controles y fiscalizaciones. Ejerce el control sobre mercaderías prohibidas o restringidas. Mediante el registro en el sistema SOFIA (sistema de despacho aduanero informatizado que interactúa en forma directa con sus usuarios) se pueden revisar las importaciones de productos que contienen o pudieran contener sustancias químicas como COP y Hg. La autoridad de aplicación es la Dirección Nacional de Ingresos Tributarios (DNIT).
Ley de calidad del aire	Ley 5211/14 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/4637/ley-n-5211	Permite fijar los valores límites de emisión de los contaminantes del aire (entre los cuales se encuentran los metales pesados, como el Hg) que puedan ser emitidos por fuentes fijas o fuentes móviles; tiene como autoridad de aplicación al MADES.

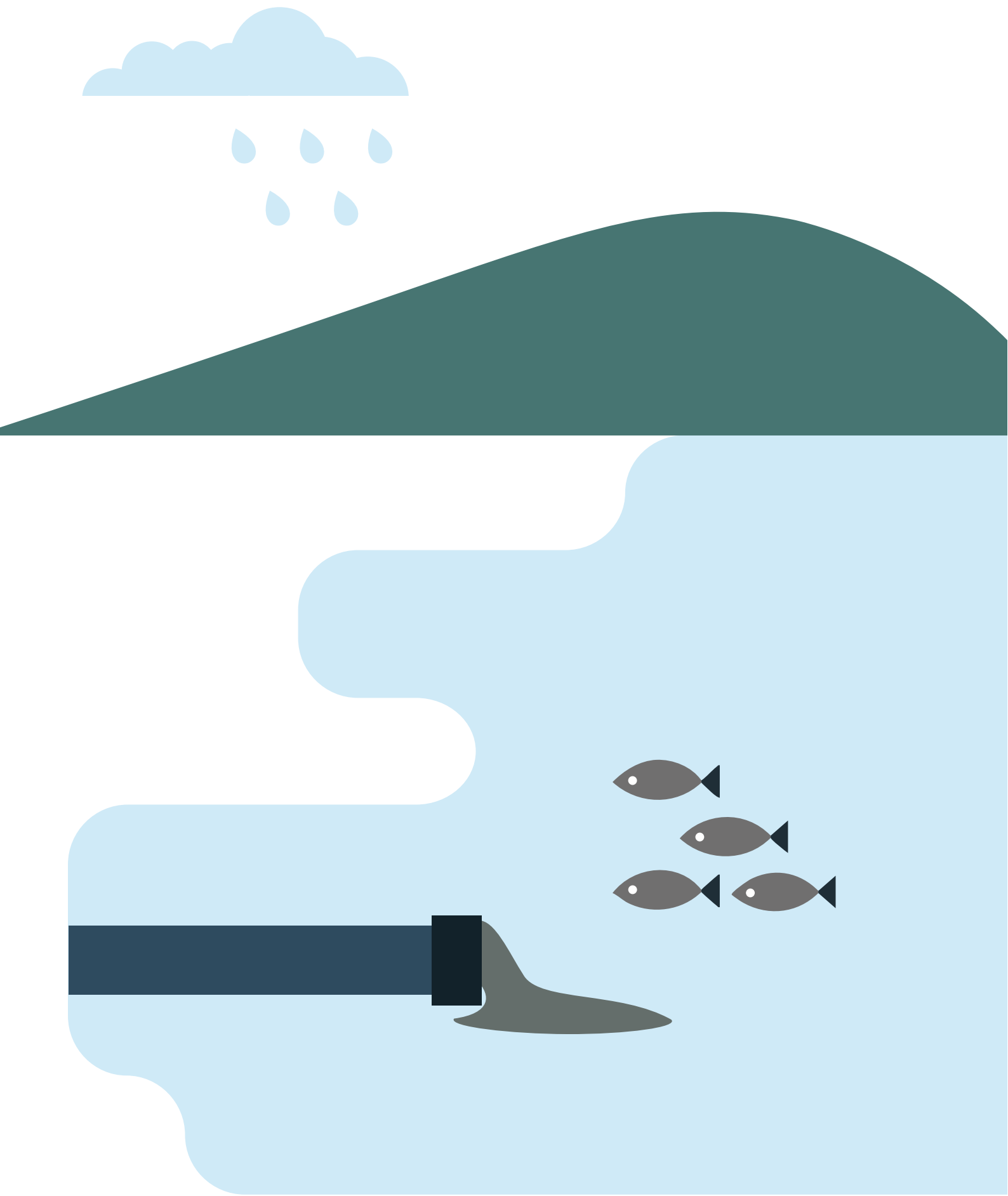
Título de la Norma Jurídica	Instrumento normativo	Descripción
Registro de fabricantes e importadores de lámparas incandescentes y fluorescentes	Decreto N.º 7103/17 https://www2.aladi.org/nsfaladi/normastecnicas.nsf/ccc11adff39a6a9403257cf600683dc4/c20c9221e269005d032585b9005abcbb/\$FILE/Proy%20lámparas.pdf	Por el cual se crea el registro de fabricantes e importadores de lámparas incandescentes y fluorescentes, dependiente del Ministerio de Industria y Comercio, se establece el régimen de licencia previa de importación y la certificación obligatoria de eficiencia energética.
Que sanciona delitos contra el medio ambiente	Ley N.º 716/95 https://www.bacn.gov.py/conoce-tu-ley/8837	En su Art. 3.º sanciona delitos contra el medioambiente; contra quienes ordenen, ejecuten, permitan o autoricen actividades atentatorias contra el equilibrio del ecosistema, la sustentabilidad de los recursos naturales y la calidad de vida humana; establece la sanción o pena por introducir, comercializar o facilitar el transporte de los residuos peligrosos o tóxicos dentro del país.
Código Sanitario	Ley N.º 836/80 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2399/ley-n-836	En el Libro III, Capítulo II. De las sustancias tóxicas o peligrosas. Regula las funciones estatales para el cuidado integral de la salud de la población, y los derechos y las obligaciones de las personas en la materia y en sus instalaciones. Regula las normas sanitarias de las actividades laborales, industriales, comerciales y de transporte, así como los programas de prevención y control de la contaminación; dispone sobre la salud del agua para el consumo; los alcantarillados y residuos industriales; designa al MSPyBS y al MAG para definir la clasificación y características de plaguicidas y fertilizantes de acuerdo con el riesgo que representen para la salud.
Código Penal	Ley N.º 1160/1997 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/3497	En los Artículos del 197 al 209 de su Título III. Hechos punibles contra la seguridad de la vida y de la integridad física de las personas; y su Capítulo I. Hechos punibles contra las bases naturales de la vida humana, define hechos punibles que hacen referencia a las sustancias contaminantes.
De control de productos fitosanitarios de uso agrícola	Ley N.º 3742/09 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2940	Establece el régimen legal de registro y control de todo producto fitosanitario de uso agrícola a partir del ingreso de estos al territorio nacional, así como: la síntesis, la formulación, el fraccionamiento, el transporte, el almacenaje, el etiquetado, la comercialización, la publicidad, la aplicación y la eliminación de los residuos y la disposición final de los envases vacíos y de plaguicidas vencidos, con el fin de proteger la salud humana, animal, vegetal, y el ambiente. Designa al SENAVE como la autoridad de aplicación de la presente ley.

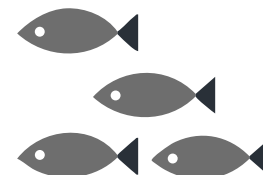
Título de la Norma Jurídica	Instrumento normativo	Descripción
Prohíbe la importación, depósito y utilización de productos calificados como residuos industriales peligrosos o basuras tóxicas	Ley 42/90 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2382/ley-n-42	En su Art. 1, prohíbe a toda persona física o jurídica la importación de productos calificados como residuos o residuos industriales peligrosos o basuras tóxicas; o bien, facilitar por cualquier medio su ingreso al país; y estipula que se tendrá una lista de los residuos tóxicos con el fin de evitar su ingreso; se designa al MSPyBS, al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), al MIC, y a la Comisión Nacional de Defensa de los Recursos Naturales (CONADERNA) como responsables.
Por el cual se reglamenta la Ley N.º 42/90	Decreto N.º 18.969/97 https://digesto.aduana.gov.py/DNA/upload/980824754.pdf	Se detallan y definen los residuos industriales considerados peligrosos o tóxicos y las responsabilidades y medidas de control y seguridad con los mismos.
De residuos generados en los establecimientos de salud y afines	Ley N.º 3361/07 https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/3414	Regula la gestión integral de los residuos generados en establecimientos de salud y afines, que provengan de la atención de la salud humana y animal, con fines de prevención, diagnóstico, tratamiento, rehabilitación, estudio, docencia, investigación, o producción de elementos o medicamentos biológicos, farmacéuticos y químicos. La autoridad de aplicación de la ley es el MSPyBS encargado de registrar y habilitar a los generadores de residuos.
Por el cual se reglamenta la Ley N.º 3361/07	Decreto N.º 6538/11 https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/1990125-DEC6538-11pdf-DEC6538-11.pdf	Reglamenta toda la gestión de los residuos generados en establecimientos de salud y afines, desde la generación, clasificación, manipulación, transporte interno, almacenamiento, transporte externo, tratamiento y disposición final. La dirección encargada de los residuos es la Dirección de Gestión de Salud Ambiental (DIGESA).
Por la cual se aprueba el reglamento referente al manejo de los residuos sólidos urbanos peligrosos biológicos-infecciosos, industriales y afines, y se deja sin efecto la Resolución S. G. N.º 548 de fecha 21 de agosto de 1996	Resolución S. G. N.º 750/2002 https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/4731747-RES750de2018manejodeRESIDUOSpdf-RES750de2018manejodeRESIDUOS.pdf	Se establece a la Dirección General de Salud Ambiental, organismo técnico del MSPyBS, como autoridad de aplicación.

Notas

Notas

Notas





4. Gestión ambientalmente racional de residuos con compuestos orgánicos persistentes o contaminados con ellos

La gestión ambientalmente racional se define en el Convenio de Basilea como la adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los desechos peligrosos u otros desechos se gestionen de forma que se proteja la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos que puedan derivarse de dichos desechos.

En este contexto, los criterios para evaluar la gestión ambientalmente racional incluyen lo siguiente:

- Existe una infraestructura regulatoria y un sistema de aplicación que garantiza el cumplimiento de la normativa aplicable.
- Los sitios o instalaciones están autorizados y cuentan con un nivel adecuado de tecnología y control de la contaminación para gestionar los desechos peligrosos de la forma propuesta, teniendo en cuenta en particular el nivel de tecnología y control de la contaminación del país exportador. Los operadores de los sitios o instalaciones donde se gestionan desechos peligrosos están obligados, según corresponda, a supervisar los efectos de dichas actividades. Se adoptan las medidas adecuadas en los casos en que el seguimiento indica que la gestión de desechos peligrosos ha generado emisiones inaceptables. Las personas que participan en la gestión de desechos peligrosos son capaces y están adecuadamente capacitadas para ello. Los países también tienen la obligación de evitar o minimizar la generación de desechos y de garantizar la disponibilidad de instalaciones adecuadas para sus desechos, a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente.



En el anexo 1 se pueden consultar plantillas diseñadas como una herramienta de apoyo a los profesionales interesados en realizar una gestión ambientalmente racional de residuos peligrosos generados en establecimientos.

4. 1. Prevención y minimización de residuos

La prevención y minimización de residuos de COP son los primeros y más importantes pasos fundamentales en la gestión ambientalmente racional de dichos desechos, como lo establece el Convenio de Basilea. La prioridad debe ser evitar la generación de residuos peligrosos o reducir su cantidad y peligrosidad. Las empresas generadoras de residuos son responsables de implementar las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA), minimizando la generación de desechos mediante innovación y desarrollo de procesos más eficientes. Asimismo, los generadores de residuos están obligados por el marco normativo a desarrollar planes de gestión que abarquen todos los desechos peligrosos y los COP. El Decreto N.º 7391/2017 de Paraguay establece la obligatoriedad de que las personas, conforme a lo dispuesto en la Ley y este Reglamento, deben registrar ante la Autoridad de Aplicación los Planes de Gestión de Residuos Sólidos.

El programa de prevención debe incluir la identificación de procesos generadores de COP y la búsqueda de alternativas menos contaminantes, así como la reducción de los volúmenes de desechos y la implementación de procedimientos adecuados para evitar la contaminación. Dicho programa debe contemplar las siguientes acciones o actividades (Figura 7) (UNEP, 2023):

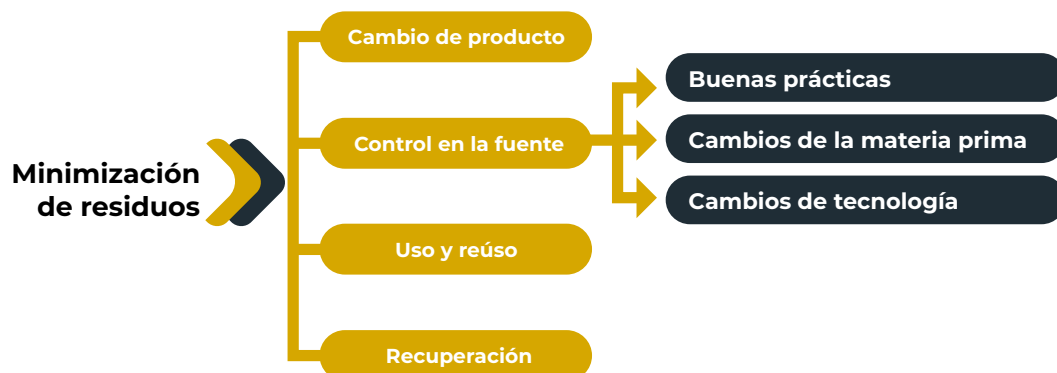
Figura 7. Programa para la gestión de COP.



De acuerdo con Martínez (2005), la producción de cualquier producto implica inevitablemente la generación de residuos sólidos, líquidos y/o gaseosos, que no son otra cosa que pérdidas de materias primas y de energía del proceso productivo. La minimización de residuos consiste en reducir el volumen y la peligrosidad de residuos generados.

El Convenio de Basilea adopta el principio de prevenir o minimizar la generación de residuos peligrosos, exigiendo que los países Parte tomen medidas para identificar y cuantificar sus residuos y utilicen prácticas ambientalmente adecuadas para prevenir o minimizar su generación. En la Figura 8 se puede observar un esquema de minimización de residuos.

Figura 8. Esquema de minimización de residuos.



Fuente: Martínez (2005).

Los beneficios que surgen de la aplicación de una política de minimización de residuos son:

- Ahorro en materias primas.
- Ahorro por reducción de costos de almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.
- Mejora en la seguridad e higiene laboral.
- Reducción de potenciales problemas ambientales.
- Cumplimientos con normas ambientales.
- Mejora de la imagen de la compañía (externa e interna).
- Mejora de la competitividad.

4. 2. Proceso de decisión para eliminación de residuos COP

El proceso de decisión para la eliminación de residuos COP ayuda a seleccionar el método más adecuado para gestionar residuos con contaminantes orgánicos persistentes (COP) teniendo en cuenta las características y regulaciones ambientales específicas. En la Figura 9, se presenta el esquema del flujo de decisión lógica y el detalle de cada paso del proceso.

Figura 9. Flujo de decisión para la eliminación ambientalmente racional de residuos COP.



Identificación de presencia de COP:

- Lo primero es determinar si el residuo contiene COP. Si no contiene COP, el residuo puede seguir procesos de eliminación estándar, no requeridos para residuos peligrosos.

Evaluación de la necesidad de pretratamiento:

- Si el residuo contiene COP, se debe evaluar si es necesario un **pretratamiento** para optimizar su gestión.

Evaluación de la destrucción irreversible:

- Después del pretratamiento, se evalúa la viabilidad del método de **destrucción irreversible** más adecuado.

Eliminación en vertedero o almacenamiento seguro:

- Si la destrucción irreversible no es viable o ambientalmente preferible, se considera la posibilidad de **almacenamiento seguro en vertederos diseñados específicamente** o en formaciones subterráneas como minas. Estos métodos son adecuados para residuos estabilizados y encapsulados que minimizan el riesgo de liberación de COP al medio ambiente.

Evaluación de contenido bajo de COP:

- Si el contenido de COP en el residuo es bajo, se permite la eliminación de acuerdo con las regulaciones nacionales e internacionales, asegurando un bajo riesgo de contaminación ambiental y cumpliendo con las directrices de seguridad.

Selección de tratamiento ambiental adecuado:

- En los casos en los que el contenido de COP y las opciones anteriores no sean aplicables o viables, se debe realizar una **evaluación adicional** para seleccionar un método ambientalmente racional que permita una eliminación segura del residuo COP según su tipo y características.

4.3. Identificación de COP en productos, matrices ambientales y residuos

A pesar de que Paraguay es miembro de los Convenios de Estocolmo, Basilea y de Rotterdam, no cuenta actualmente con un programa de monitoreo de compuestos orgánicos persistentes, por ello la identificación de los COP es el punto de partida para una gestión ambientalmente racional efectiva. El muestreo, el análisis y la vigilancia son actividades importantes para los responsables de la gestión de los desechos de COP, así como para las autoridades en sus estrategias de protección a la salud y el medio ambiente identificar la concentración de COP tanto en residuos como en matrices ambientales y humanas para seleccionar el método de gestión adecuado; estas deben ser realizadas por profesionales capacitados, de conformidad con un programa bien diseñado y utilizando métodos internacionalmente aceptados o aprobados a nivel nacional, utilizando el mismo método cada vez que dure el programa. Un programa de monitoreo de COP puede instrumentarse en diferentes matrices ambientales: aire, agua, suelo, flora y fauna, sangre y leche en humanos.

Paraguay puede iniciar, respaldado en un marco legislativo adecuado, un programa para el monitoreo de COP que le permita identificar la presencia de estos compuestos en el medio ambiente. Para ello se pueden considerar los siguientes elementos como base para el diseño de un programa de monitoreo de COP:

- Identificación de sitios claves (áreas urbanas, zonas industriales, etc.).
- Agrupar los COP por compartimientos ambientales similares. Por ejemplo, los PFOS tienen afinidad con el agua, mientras que otros COP no la tienen.
- Definición de contaminantes prioritarios que deben analizarse en los sitios seleccionados.
- Identificación de laboratorios con capacidades adecuadas e interesados en participar.
- Uso de protocolos analíticos similares (estandarización y calibración, control y aseguramiento de la calidad (CC/AC) similares para todos los laboratorios participantes).

Se puede iniciar con monitoreo pasivo en aire y leche materna que son matrices que desde hace más de una década realiza con éxito el Grupo del Monitoreo Global del Convenio de Estocolmo, a través de su Programa Mundial de Vigilancia de los COP. El Programa tiene como objetivo proporcionar un marco uniforme para todas las actividades y tareas asociadas con la recopilación, evaluación y presentación de informes sobre los niveles ambientales de fondo de los COP incluidos en los Anexos A, B y C del Convenio de Estocolmo, a fin de proporcionar información comparable (UNEP, 2021).

Asimismo, para los análisis en laboratorio, la Guía para el Programa de Monitoreo Global de los COP señala que una adecuada red de laboratorios debe contar al menos con un laboratorio de nivel 1 y varios laboratorios de niveles 2 y 3 (ver Tabla 21) (PNUMA, 2004²⁰). Los laboratorios de nivel 1 son aquellos que cuentan con el instrumental y personal capacitado para analizar compuestos como las dioxinas y furanos, las cuales requieren personal altamente especializado y su operación y mantenimiento es extremadamente caro. Mientras que los del nivel 3 son laboratorios que cuentan con el instrumental básico para el análisis de la mayoría de los bifenilos clorados y todos los plaguicidas organoclorados a excepción del toxafeno. Los de nivel 2 son similares al 3 con la posibilidad de analizar toxafeno si cuentan con ionización química negativa. Normalmente todos los países cuentan con varios laboratorios de nivel 3, pero los de nivel 1 solo pocos países, como Brasil en América Latina, cuentan con este tipo de laboratorios.

Tabla 21. Características de los laboratorios de nivel 1, 2 y 3.

Características	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Equipo básico para extracción y limpieza de muestras	X	X	X
Cromatografía de gases capilar con detectores de captura de electrones	X	X	X
Instalaciones con gases especiales (He y N ₂), aire acondicionado y sistema ininterrumpido de energía	X	X	X
Personal entrenado en HRGC (cromatografía de gases de alta resolución) con ECD detector de captura de electrones).	X	X	X
Cromatografía de gases capilar (HRGC, por sus siglas en inglés) acoplada a espectrometría de masas de baja resolución (LMRS, por sus siglas en inglés.)	X	X	
Personal entrenado en HRGC/LRMS	X	X	
Equipo avanzado para extracción y limpieza de muestras	X		
Cromatografía de gases capilar acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (HRMS)	X		
Personal entrenado en HRGC/HRMS	X		

Fuente: PNUMA, 2007. Guía para el Análisis de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), PNUMA. 24 pp.

Para el caso de PFOS, el método analítico recomendado es cromatografía de líquidos + espectrometría de masas tándem (LC) + (MS/MS); para dioxinas y furanos es cromatografía de gases con espectrometría de masas de alta resolución (HRGC/HRMS).

20 PNUMA, 2004. Guidance Document on the Preparation of Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Subject to the Basel Convention. PNUMA. 17 pp.

Mediante la implementación de un programa de vigilancia y monitoreo, las autoridades y administradores de instalaciones de reciclaje y de tratamiento de residuos podrán identificar los COP en productos, matrices ambientales y en residuos. Se puede encontrar más información en los siguientes documentos:

- Global Monitoring Plan for Persistent Organic Pollutants.²¹
- Monitoreo e investigación en el marco del Plan de Gestión de Productos Químicos (Ministerio de Medio Ambiente de Canadá, 2011).²²
- Principios Generales de Monitoreo (Comisión Europea, 2003).²³
- Base de datos de dioxinas de la Federación Alemana/Länder (Agencia Federal Alemana de Medio Ambiente Dessau-Roßlau, 2014).²⁴

4. 4. Minimización de residuos peligrosos

Una de las primeras etapas para minimizar la presencia de residuos peligrosos con contenido de COP es la minimización de generación en la fuente. Alternativas aceptables de minimización se deben complementar con opciones de tratamiento y disposición final, con el objetivo de presentar una propuesta integral para cada problema. Las alternativas identificadas deben ser sometidas a un análisis de factibilidad técnica y económica (Martínez, 2005).

4. 4. 1. Opciones de reducción en la fuente:

Las opciones de reducción en la fuente dependen de las características específicas de las operaciones y procesos utilizados en la industria para obtener un producto, y puede ser una sola actividad o combinación de varias. En el siguiente listado se señalan algunas opciones y posteriormente se hace una breve descripción de cada una de ellas.

- **Buenas prácticas de operación.**
- **Cambios de tecnologías.**
- **Cambios de materias primas.**
- **Cambios de productos.**
- **Uso y reúso.**
- **Recuperación para uso en otro fin.**

Buenas prácticas de operación

Las buenas prácticas contribuyen a reducir emisiones y residuos sin necesidad de inversiones importantes. Las acciones consisten en:

- Entrenamiento de personal y programas de incentivos
- Buen manejo de materias primas y productos
- Adecuado control de stock de materias primas y productos (materiales perecederos)
- Prevención de derrames
- Segregación de residuos

21 Disponible en: <https://www.pops.int/implementation/globalmonitoringplan/overview/tabid/83/default.aspx>

22 Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2011/ec/En14-34-2011-eng.pdf

23 Disponible en: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_mon_bref_0703.pdf

24 Disponible en: <http://www.dioxindb.de/index-e.html>

- Traslado de costos vinculados a los residuos al sector generador
- Organización de la producción

Cambios de tecnología

Estos cambios se vinculan a los procesos productivos y están orientados hacia modificaciones de proceso y equipamiento tendientes a reducir la generación de residuos. Los cambios pueden incluir:

- Cambios del proceso tecnológico
- Cambios de equipamiento, disposición de las unidades, cañerías, etc.
- Uso de automatización
- Cambios en las condiciones del proceso (flujos, temperatura, presión, etc.)

Algunos ejemplos de cambios de tecnología son:

En las *plantas de cloro-soda* se realiza electrólisis de solución de salmuera utilizando cátodos de mercurio. Esto produce como residuos un efluente líquido y barros que contienen mercurio. El hidrógeno, subproducto del proceso, también contiene mercurio. El cambio de tecnología consiste en sustituir las celdas por celdas de diafragma, eliminando el mercurio de los residuos y subproductos, reduciendo la toxicidad.

En la *explotación de minerales auríferos* se utiliza un proceso de extracción con cianuro (lixiviación), el cual sustituye al método de amalgama en el que se utiliza mercurio. Esto permite además la explotación de minerales con menor concentración de oro.

Cambios de materia prima

Los cambios de materias primas pueden eliminar materiales contaminantes que se introducen con la materia prima o se forman en el proceso a partir de ella. Los cambios pueden consistir en:

- Materiales con mayor porcentaje de pureza.
- Materias primas o insumos menos agresivos al medio ambiente.
- Utilización de materias primas recicladas o reciclables.

Un ejemplo de cambios de materia prima es: En la *fabricación de aerosoles* la sustitución de clorofluorocarbonos (CFCs) por otros propelentes como por ejemplo propano o butano.

Cambios de productos

El objetivo es reducir residuos derivados del uso del producto (ciclo de vida, envases):

- sustitución del producto,
- cambios de composición del producto, y,
- cambios de tipo de envases.

Un ejemplo de cambio de productos es: En la *industria de los plaguicidas* la sustitución de productos altamente tóxicos y persistentes, como los plaguicidas clorados, por otros igualmente eficientes, pero menos persistentes como los fosforados o carbamatos.

Reúso

El reúso es volver a usar el residuo en el proceso que lo origina o en otro proceso ya sea dentro o fuera de la misma empresa. Un ejemplo se da en la industria del papel en la que se produce pulpa de celulosa a partir de madera o de papel usado. El proceso por el cual se recupera la pulpa de celulosa a partir de papel usado es sumamente simple en comparación con la producción de pulpa de celulosa a partir de la madera.

Recuperación

La recuperación de productos valorizables como puede ser la recuperación de plata de películas fotográficas y radiológicas; se generan residuos de los cuales se puede recuperar la plata por medio de un proceso que consiste básicamente en la disolución y posterior precipitación o electrólisis.

4. 5. Acondicionamiento, almacenamiento y transporte de residuos peligrosos

Desde el momento de su generación hasta su ingreso en una instalación de reciclaje, tratamiento o disposición final, los residuos peligrosos siguen una serie de etapas, que en forma genérica las podemos agrupar de la siguiente manera: a) acondicionamiento, b) almacenamiento, y, c) transporte.

4. 5. 1. Acondicionamiento

El acondicionamiento de residuos peligrosos es el conjunto de procedimientos y técnicas que se utilizan para preparar estos residuos antes de su almacenamiento, transporte, tratamiento o disposición final. El objetivo principal del acondicionamiento es garantizar que los residuos sean manejados de manera segura y eficiente, minimizando cualquier riesgo asociado.

El acondicionamiento permite:

- Reducir el volumen de residuos peligrosos, facilitando su manejo y transporte.
- Estabilizar los residuos, disminuyendo su peligrosidad.
- Facilitar la recuperación de materiales valorizables contenidos en los residuos.
- Simplificar el proceso de tratamiento y disposición final.

Existen diversas técnicas de acondicionamiento de residuos peligrosos, que se seleccionan en función de la naturaleza del residuo y del proceso de gestión al que serán sometidos. Algunas de las técnicas más comunes, que se describen en el apartado de tratamientos fisicoquímicos, incluyen: neutralización, solidificación y estabilización, compactación.

4. 5. 2. Almacenamiento

El almacenamiento de residuos consiste en la contención temporaria de los mismos en un depósito especialmente acondicionado, a la espera de reciclaje, tratamiento o disposición final. Si bien el depósito puede estar dentro o fuera del predio donde se generan los residuos, los requerimientos de diseño y operación serán similares y estarán condicionados por el o los tipos de residuos manejados.

A manera de ejemplo, se describen algunos criterios que se consideran en el almacenamiento de los residuos peligrosos en México (Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de México, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2023²⁵), (Figura 10).

Figura 10. Criterios para el almacenamiento de residuos peligrosos.



1. Estar separadas de las áreas de producción, servicios, oficinas y de almacenamiento de materias primas o productos terminados.



2. Estar ubicadas en zonas donde se reduzcan los riesgos por posibles emisiones, fugas, incendios, explosiones e inundaciones, que garantice que los riesgos para la salud y el medio ambiente sean mínimos.



3. Contar con dispositivos para contener posibles derrames, tales como muros, pretilas de contención o fosas de retención para la captación de los residuos en estado líquido o de los lixiviados.



4. Cuando se almacenen residuos líquidos, se deberá contar en sus pisos con pendiente y/o trincheras y/o canaletas que conduzcan los derrames a las fosas de retención con capacidad para contener una quinta parte como mínimo de los residuos almacenados o del volumen del recipiente de mayor tamaño.



5. Contar con pasillos que permitan el tránsito de equipos mecánicos, eléctricos o manuales, así como el movimiento de grupos de seguridad y bomberos, en casos de emergencia.



6. Contar con sistemas de extinción de incendios y equipos de seguridad para atención de emergencias, acordes con el tipo y la cantidad de los residuos peligrosos almacenados.



7. Contar con señalamientos y letreros alusivos a la peligrosidad de los residuos peligrosos almacenados, en lugares y formas visibles.



8. La altura máxima de las estibas será de tres tambores en forma vertical.

Fuente: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de México.

25 D.O.F. (2023). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de México. Última reforma publicada DOF 08-05-2023. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>

Además, para minimizar riesgos e incrementar la seguridad, se debe considerar lo siguiente:

- **Cercado y señalización:** El predio de emplazamiento deberá estar debidamente cercado de forma a impedir el acceso de personas ajenas a las instalaciones. Asimismo, deberá estar claramente señalizado con leyendas.
- **Diseño apropiado:** El lugar deberá estar diseñado de acuerdo con la naturaleza y volumen de los residuos a ser almacenados, así como con la forma de estiba a ser empleada.
- **Manual de operación:** Se deberá disponer de un manual con instrucciones para la operación general del depósito y de todo el equipamiento, programas de inspección, así como los procedimientos sobre higiene y seguridad. El manual será actualizado regularmente y estará disponible para todo el personal.
- **Planes de contingencia:** Se deberá contar con planes y procedimientos de emergencia dirigidos a garantizar la respuesta rápida y apropiada para aquellas situaciones que así lo ameriten. Se prestará especial atención a existencia de procedimientos para derrames, así como la disponibilidad de los elementos necesarios para la contención y reenvasado de los mismos.
- **Capacitación:** Quienes realizan tareas dentro del depósito tienen que contar con capacitación sobre procedimientos de trabajo, medidas de precaución y seguridad, procedimientos de emergencia y conocer los riesgos a los que están expuestos.

En los depósitos los residuos pueden ser almacenados a granel o previamente acondicionados en distintos tipos de contenedores debidamente estibados. Para el caso de líquidos a granel se pueden utilizar tanques aéreos o enterrados, mientras que para los sólidos se utilizarán silos o plataformas especialmente acondicionados.

4. 5. 3. Transporte de residuos peligrosos

El transporte corresponde a una etapa intermedia entre el almacenamiento en el lugar de generación y el tratamiento o disposición final, y puede existir una etapa intermedia de almacenamiento transitorio o unidad de transferencia en otro predio.

En el Paraguay, el transporte de mercancías peligrosas se encuentra regulado por una normativa MERCOSUR denominada "Acuerdo para la facilitación del Transporte de Mercancías Peligrosas en el MERCOSUR".²⁶ Esta normativa se encuentra vigente en el Paraguay mediante el Decreto del Poder Ejecutivo N.º 17.723/97 Por el cual se autoriza la vigencia en la República del Paraguay del "Acuerdo de Alcance Parcial, para la Facilitación del Transporte de Mercancías Peligrosas", protocolizado en el marco del Tratado de Montevideo del año 1980²⁷.

Dicho acuerdo está basado fundamentalmente en las recomendaciones preparadas por el comité de expertos de las naciones unidas sobre transporte de mercancías peligrosas, las que constituyen la base también de otras regulaciones internacionales en materia de transporte marítimo y aéreo.

Además, existe la Resolución N.º 923/00, del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), con fecha 17 de julio de 2000, "Por la cual se aprueba la vigencia en la República del Paraguay de las instrucciones para la fiscalización del transporte por carretera de mercancías peligrosas en el MERCOSUR".

²⁶ https://normas.mercosur.int/simfiles/normativas/80969_DEC_015-2019_ES_FERR_Acuerdo%20Transporte%20Mercancias%20Peligrosas.pdf

²⁷ https://www2.aladi.org/biblioteca/Publicaciones/ALADI/Comite_de_Representantes/CR_di/ES/0700/755.PDF

También Paraguay junto con los Gobiernos de la República Argentina, República de Bolivia, República Federativa del Brasil, República de Chile, República del Perú y República Oriental del Uruguay convinieron en firmar el Convenio, reflejado en la Ley N.º 1128²⁸ que aprueba el convenio sobre transporte internacional terrestre, con sus respectivos anexos y modificaciones, en la cual se establecen criterios para el transporte de carga y de pasajeros entre los países firmantes.

Movimiento transfronterizo de desechos o residuos peligrosos

El Convenio de Basilea establece que las Partes o países signatarios tienen la obligación de garantizar que se minimicen los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y otros desechos y que dichos movimientos se realicen de manera que se protejan la salud humana y el medio ambiente. El Convenio establece que los movimientos transfronterizos, entre al menos dos Estados, solo pueden tener lugar si se cumplen ciertas condiciones y se ajustan a ciertos procedimientos (PNUMA, 2020).

Las Partes tienen la obligación de adoptar las medidas pertinentes para garantizar que los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y otros desechos solo se permitan si se cumple una de las tres condiciones siguientes:

- El Estado de exportación no cuenta con la capacidad técnica ni con las instalaciones, la capacidad o los lugares de eliminación adecuados necesarios para eliminar los desechos en cuestión de forma ambientalmente racional; o
- Los desechos en cuestión se requieren como materia prima para las industrias de reciclaje o recuperación en el Estado de importación; o
- El movimiento transfronterizo en cuestión se ajusta a otros criterios decididos por las Partes (dichos criterios normalmente se encontrarán en las decisiones adoptadas por la Conferencia de las Partes) (PNUMA, 2020).

El Convenio exige que se cumpla con una gestión ambientalmente racional de los desechos peligrosos u otros desechos. Además, se especifican los casos en los que las Partes pueden restringir los movimientos transfronterizos y los casos en los que deben restringirlos. Asimismo, que solo las personas autorizadas o autorizadas para transportar o eliminar residuos realicen dichas operaciones, y que estas empaqueten, etiqueten y transporten de conformidad con las normas y estándares internacionales generalmente aceptados y reconocidos.

El Convenio de Basilea establece un procedimiento detallado de Consentimiento Fundamentado Previo²⁹ (PIC, por sus siglas en inglés) con requisitos estrictos para los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y otros desechos. Este procedimiento constituye la base del sistema de control del Convenio de Basilea y se basa en cuatro etapas clave:

- notificación;
- consentimiento y emisión del documento de movimiento;
- movimiento transfronterizo; y
- confirmación de la eliminación.

28 <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/10649/ley-n-1128-aprueba-el-convenio-sobre-transporte-internacional-terrestre-con-sus-respectivos-anexos-y-modificaciones>

29 Consultar lo relacionado a los criterios, procedimientos y plantillas o formatos necesarios para un movimiento transfronterizo de residuos peligrosos en la siguiente liga: <https://www.basel.int/Procedures/NotificationMovementDocuments/tabid/1327/Default.aspx>

4. 6. Tratamiento y eliminación ambientalmente racional de residuos peligrosos

El **tratamiento de residuos** consiste en un proceso de transformación cuyo objetivo es reducir el volumen y disminuir la peligrosidad. Entre los procesos de tratamiento tenemos (cita):

- Físicoquímicos
- Estabilización–solidificación
- Biológicos
- Destrucción y métodos de transformación irreversible

Cada proceso de tratamiento producirá otros residuos (emisiones atmosféricas, efluentes y residuos sólidos) que requerirán una gestión especial en función de sus características. Por lo tanto, en el momento de diseñar un sistema de tratamiento de residuos se debe evaluar el impacto ambiental de las diferentes alternativas.

La **disposición final de los residuos** tiene como objetivo el confinamiento de estos, minimizando las liberaciones de contaminantes. En el caso de residuos peligrosos, lo más común es el confinamiento en rellenos de seguridad. Esta tecnología consiste en la disposición en el suelo utilizando obras civiles especialmente diseñadas.

4. 6. 1. Tratamientos físicoquímicos.

Los tratamientos físicoquímicos involucran tanto los procesos físicos como químicos por los cuales se modifican las propiedades químicas o físicas de un residuo. Estos tratamientos pueden cumplir varias funciones en un sistema de gestión de residuos:

- Permitir la recuperación de un compuesto para su posterior utilización como materia prima en otro proceso.
- Separar los constituyentes peligrosos de la masa total del residuo.
- Reducir la peligrosidad del residuo mediante la transformación de sus componentes, transformándolos en compuestos menos peligrosos o reduciendo su movilidad en el medio ambiente.
- Transformar el residuo en un material que cumpla con las condiciones para ingresar a otro sistema de tratamiento o al sistema de disposición final.

Un tratamiento meramente físico constituye normalmente la primera etapa dentro de un tratamiento global.

A continuación, se facilita una breve descripción, de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2016), de algunos tratamientos físicoquímicos. Tabla 22.

Tabla 22. Tratamientos fisicoquímicos.

Tipo de tratamiento	Descripción
Filtración	Consiste en hacer pasar un fluido (generalmente un líquido) a través de un medio que es capaz de retener las partículas suspendidas en él. Los sistemas de filtrado se clasifican según el sentido de flujo (ascendente, descendente, mixto), por el tipo de medio filtrante (de una capa o varias) y por la presión usada (gravedad, presión positiva o negativa). Para tratar residuos generalmente se tienen diferentes tipos de filtrado, pues existen varios tipos de filtros: de prensa, de cinturón de prensa, de medio granular, de vacío.
Sedimentación	Es la separación de partículas presentes en un líquido que son más densas que este mediante la acción de la gravedad; sirve para eliminar de una forma simple arenas, flóculos y otros sólidos para obtener un efluente clarificado y unos sólidos más manejables.
Centrifugación	Consiste en hacer girar sobre un eje el líquido para tratar de someterlo a una fuerza que hace que los elementos de mayor densidad se alejen del centro de giro (fuerza centrífuga, que es la que "busca escapar" del sistema de giro). Existen varios tipos de centrifugas, como las de cilindro, de canasta o de discos. En el tratamiento de residuos se utiliza para separar líquidos de diferente densidad y para separar sólidos de líquidos; por ejemplo, separar mezclas de fluidos orgánicos e inorgánicos (en dos o más fases), concentrar lechadas y lodos. Inapropiada para alquitranes, residuos sólidos, polvos secos y gases, no es aplicable a fluidos con partículas muy pequeñas o de densidad muy baja.
Coagulación y floculación	La coagulación y la floculación son dos procesos fisicoquímicos que se dan juntos al momento de separar un soluto. → La coagulación es el fenómeno mediante el cual las partículas de un soluto, que están suspendidas, constituyendo una mezcla coloidal, se desestabilizan, reduciendo las fuerzas electroquímicas que las mantienen separadas. → La floculación comprende la serie de fenómenos de transporte que ocurren en el seno del líquido para que las partículas hagan contacto y se aglomeren formando unidades más grandes; este proceso implica la formación de interacciones entre ellas a nivel energético para integrar una malla tridimensional y porosa hasta que tiene el tamaño suficiente para separarse del líquido. Se utilizan para tratar líquidos con sólidos suspendidos y con grasas y aceites; no se recomiendan para lechadas con alto contenido de sólidos y probablemente el efluente necesite de tratamientos posteriores.
Flotación	Es una operación física unitaria utilizada para separar partículas contenidas en una fase líquida mediante burbujas de gas (comúnmente se usa aire); estas se adhieren a las partículas llevándolas con ellas hacia arriba. Con esta técnica es posible separar partículas de mayor y menor densidad que el líquido; una vez en la superficie, la nata formada por burbujas y partículas se puede remover. Se emplea para eliminar materia suspendida, aceites en emulsión (residuos de aceites en el agua, por ejemplo) y para concentrar residuos como lodos biológicos de tratamiento de agua; permite eliminar con mayor eficiencia y en menos espacio y tiempo las partículas pequeñas cuya sedimentación es muy lenta. Los efluentes de este tratamiento pueden requerir de otros adicionales.
Evaporación	Consiste en aplicar calor a un líquido que contenga contaminantes para cambiarlo de fase (convertirlo en vapor) y así concentrar los contaminantes contenidos en él; posteriormente el líquido debe de ser condensado para recuperarlo. Se utiliza en la recuperación de solventes orgánicos e inorgánicos con impurezas no volátiles como aceites pesados, grasas no volátiles, pigmentos de pinturas, colorantes, residuos de resinas poliméricas. No es adecuada para alquitranes, líquidos que se degraden, sólidos, polvos secos ni gases y utiliza mucha energía.
Destilación	Consiste en separar mezclas líquidas entre sí al aplicar calor; así, los diferentes componentes se evaporarán a temperaturas diferentes, mismos que se condensarán posteriormente. Para que sea posible, debe haber una diferencia en los puntos de ebullición. Existen varios tipos de destilación, como la simple, la fraccionada, al vacío, por arrastre de vapor, destructiva con reacción química, entre otros. Para tratar residuos se utiliza sobre todo para mezclas de líquidos orgánicos que tengan una baja viscosidad y una diferencia clara de volatilidades. No es adecuada para lechadas, lodos, alquitranes o materiales poliméricos.

Tipo de tratamiento	Descripción
Arrastre con gas (aire)	Consiste en poner en contacto una corriente de gas (generalmente aire) con el líquido a limpiar (generalmente agua con contaminantes); la corriente de gas se introduce en una torre empacada en la parte inferior y el líquido por la parte superior; el líquido se distribuirá en toda la superficie interna formada por el empaque aumentando el área de contacto con el gas para favorecer la transferencia de los contaminantes del agua al seno del gas, fenómeno conocido como absorción. Esta técnica es efectiva para remover compuestos orgánicos e inorgánicos muy volátiles y relativamente poco solubles en agua, como benceno, tolueno, cloruro de metileno, tetracloruro de carbono, otros orgánicos clorados, aromáticos y amoníaco. En la práctica está limitada a una concentración de compuestos volátiles menor a 100 ppm; la torre empacada es susceptible de ser tapada por impurezas formando lodos que tienen que purgarse.
Arrastre con vapor	Si se utiliza vapor en lugar de aire, es posible aumentar la remoción de compuestos orgánicos volátiles y metales pesados (Fe, Cu, Al, Ni, Cr, As, Hg, Pb, Co, Cd, etc.) aunque solo corrientes con una concentración muy baja.
Adsorción con carbón activado	La adsorción es la propiedad de ciertas sustancias de retener en su superficie a otras moléculas. El carbón activado ha sido tratado para tener una gran área superficial en muy poco volumen, llegando a tener más de 2,500 m ² /g; se utiliza como material adsorbente, se puede utilizar para remover compuestos orgánicos acuosos con peso molecular elevado, alto punto de ebullición, baja solubilidad en agua y baja polaridad y ionización, como benceno, tolueno, xileno, naftalenos, antracenos, bifenilos policlorados, fenoles, cresoles, nitrofenoles, alquilfenoles, clorofenoles, anilina, 1,1,1-tricloroetano, hidroquinona, polietilenglicol, azul de metileno, carmín indigo, carbofurano, entre muchos otros. Si el influente a tratar contiene más del 1 % en peso de compuestos orgánicos o más de 50 ppm de sólidos, la eficiencia disminuye mucho y el método no es recomendable. No es efectiva con metales y para efluentes con aceites y grasas.
Tratamiento químico	El tratamiento químico, que generalmente tiene asociados procesos físicos, constituye un proceso de transformación del residuo mediante la adición de una serie de compuestos químicos para alcanzar el objetivo deseado. Entre los tratamientos químicos más utilizados tenemos: → Neutralización: Ajuste del pH utilizando ácidos o álcalis. Consiste en disminuir o aumentar según el caso (corriente básica o ácida respectivamente) el potencial hidrógeno de una corriente líquida para poder descargarla o para que pueda recibir un tratamiento posterior; la cantidad de ácido o base necesario está en función del grado de alcalinidad o acidez de la corriente. En las operaciones de neutralización se debe considerar que la variación de pH es altamente no lineal y que puede ser difícil de controlar, por lo que se recomienda hacer la neutralización por pasos cuando el cambio así lo amerite. → Existen varias formas de neutralizar una corriente; algunas de las más utilizadas son: ○ Mezcla de corrientes ácidas y básicas: Se mezclan en un ecualizador con cierta capacidad de retención de cargas fuertes (ácidas o básicas). ○ Lechos de piedra caliza: Se usa CaCO₃ principalmente para neutralizar corrientes ácidas. Cuando la reacción de neutralización inactiva al lecho (forma CaSO₄), se deben hacer las consideraciones pertinentes, igual que con la formación de CO₂, pues una producción excesiva produce un efecto tampón. ○ Lodos de cal: Usados para neutralizar corrientes ácidas, dependiendo del tipo de cal utilizada, será el proceso de neutralización; la misma se debe estudiar claramente en la curva de titulación de la cal a usar. ○ Ácidos fuertes: Para tratar residuos básicos, se puede utilizar cualquier ácido fuerte; en la práctica se utilizan el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico. Se debe cuidar el mezclado, pues es el factor limitante de la reacción. ○ Burbujeo de CO₂: Si se disponen de gases de combustión en los que el CO₂ sea de al menos un 14 %, se puede burbujear este en la solución alcalina de desecho; el CO₂ entra en equilibrio con el ion HCO₃⁻, que neutraliza la carga alcalina. La reacción es más lenta que la observada con ácidos fuertes, pero se elimina parte del CO₂ de los gases de combustión y se neutraliza o ayuda a neutralizar la carga alcalina.
Precipitación	Para el tratamiento de residuos peligrosos. Consiste en la separación de un contaminante, generalmente metales y otros contaminantes inorgánicos (como los fluoruros), de una corriente acuosa, mediante la formación de una fase sólida insoluble al adicionar diversas sustancias químicas que reaccionan con los contaminantes. El proceso se puede hacer en continuo o por lotes; los sólidos precipitados se retiran mediante operaciones físicas (sedimentación, filtración etc.).

Tipo de tratamiento	Descripción
Compuestos químicos	Algunos de los compuestos químicos utilizados para la precipitación son: Ca (OH) ₂ , NaOH, Na ₂ S, Na ₂ CO ₃ , fosfatos diversos y FeS. Requiere un buen mezclado de la corriente, un control de pH fino para optimizar la reacción y ayudar a la selectividad. Por lo general los sedimentos obtenidos requieren de otro tratamiento y no es una técnica adecuada para lodos, alquitranes y lechadas.
Descomposición por oxidación	Consiste en la reacción del contaminante con un oxidante como oxígeno, peróxido, ozono o hipoclorito. El contaminante se descompone en otras sustancias de menor toxicidad. Se basan en procesos fisicoquímicos que cambian de manera profunda a la estructura química de los contaminantes. En las diferentes técnicas se utilizan reactivos químicos o fotoquímicos que generan intermediarios con alto poder de oxidación sobre compuestos orgánicos y en algunas de estas, dentro de los procesos de oxidación avanzada, se tienen los siguientes: → La oxidación química se usa para eliminar contaminantes difíciles antes de un tratamiento biológico o para afinar o pulir a efluentes de otros tratamientos antes de descargar o reutilizar el agua. La determinación de la o las técnicas de oxidación avanzada está en función de las características de la corriente a tratar; requiere de condiciones de reacción controladas y es adecuado para corrientes líquidas y lodos. → Deshalogenación. Consiste en reducir el número de átomos de halógeno (F, Cl, Br, I) presentes en una molécula orgánica; esta técnica se puede aplicar a suelos (ex situ) y lodos parcialmente deshidratados, contaminados con dioxinas, bifenilos policlorados, pesticidas como el DDT y solventes clorados como el tetracloroetileno, entre otros. → Aplicación. Para aplicarla, el residuo que contenga estos contaminantes se mezcla con el reactivo APEG (polietilenglicol alcalino) y se calienta a aproximadamente 150 °C por 4 horas; el APEG reacciona con los orgánicos clorados sustituyendo los cloros por grupos funcionales del APEG y el cloro se queda como ion cloruro. En el proceso, se producen gases y vapores que se filtran con carbón activado para eliminarlos y los condensables se recuperan; posteriormente el residuo se lleva a un separador para recuperar el APEG que no reaccionó; el residuo se lava con agua. El efluente de este lavado generalmente necesita ser tratado antes de desecharse. No es posible aplicar esta técnica a grandes cantidades de desechos ni a aquellos con concentraciones mayores al 5 %. → Alternativas. Existen numerosas alternativas de tratamientos fisicoquímicos. Estos procesos serán diseñados para el tratamiento de uno o varios contaminantes específicos y tendrán restricciones particulares involucrando la totalidad de las características físicas y químicas del residuo.

Fuente: SEMARNAT, 2016.

4. 6. 2. Estabilización-solidificación

En el caso de lodos y sólidos de carácter inorgánico es posible la utilización de técnicas de estabilización-solidificación.

La **estabilización** consiste en un proceso por medio del cual los contaminantes de un residuo son transformados en formas menos tóxicas o menos móviles o solubles. Las transformaciones se dan por medio de reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en polímeros impermeables o en cristales estables. Los productos utilizados en este proceso permiten:

- Mejorar las características físicas del residuo.
- Disminuir el área superficial a través de la cual se transfieren los contaminantes.
- Reducir la solubilidad de los contaminantes.
- Reducir la toxicidad (la disponibilidad) de los contaminantes.

La **solidificación** consiste en un tratamiento que genera una masa sólida monolítica de residuos tratados. De esta manera se mejora su integridad estructural, sus características físicas y se facilita su manejo, transporte y disposición final. El empleo de aditivos permite:

- Encapsular
- Aumentar su resistencia a la compresión
- Disminuir la permeabilidad

Por lo tanto, la **estabilización-solidificación** tiene por objetivo mejorar las características físicas y disminuir el área superficial. De esta forma se reduce la transferencia de masa y la solubilidad de los contaminantes presentes.

Esta técnica es utilizada para residuos básicamente inorgánicos con no más de 10 a 20 % de materia orgánica. Los residuos orgánicos generalmente sufren degradación, por lo que no es viable la utilización de estas técnicas.

Las tecnologías aplicadas se clasifican en fijación inorgánica y técnicas de encapsulamiento.

Para la fijación inorgánica se utilizan materiales como cemento portland, materiales puzolánicos y cal. Para el encapsulamiento son utilizados polímeros como asfalto, polietileno, urea formaldehído, poliéster y butadieno. Se utiliza también la técnica de transformación en vidrio por medio de la mezcla y fusión con materiales como la sílice.

Como ejemplos de estas tecnologías se pueden mencionar: Procesos en base a cemento portland con base en cal y materiales puzolánicos; técnicas en base a polímeros termoplásticos, polímeros orgánicos y de transformación en vidrio.

4. 6. 3. **Tratamientos biológicos**

Los tratamientos biológicos consisten en la descomposición de contaminantes por acción de un conjunto de microorganismos. En el caso de los residuos tóxicos, estos tratamientos tienen una aplicación limitada, ya que los microorganismos suelen ser muy sensibles a las sustancias tóxicas. Generalmente la capacidad de procesamiento de estos sistemas es limitada y se restringe a situaciones en las que es posible trabajar con bajas concentraciones de contaminantes. Los ejemplos más comunes son el tratamiento en suelo y el tratamiento in situ de suelos contaminados o biorremediación. En algunos casos de lodos orgánicos que contienen bajas concentraciones de sustancias tóxicas es posible realizar un tratamiento de digestión anaerobia, en el cual la materia orgánica se estabiliza y en forma simultánea se produce una degradación de las sustancias tóxicas.

Tratamiento en suelo

La técnica de tratamiento de residuos en el suelo involucra la utilización de las propiedades físicas, químicas y biológicas naturales del mismo para degradar residuos, constituyéndose el elemento suelo en el medio de tratamiento.

La técnica consiste en la aplicación de un residuo cuya base de composición sea orgánica y biodegradable, a una tasa de aplicación controlada, en la capa superficial del suelo. Las condiciones climatológicas (temperatura y precipitación) serán variables externas que condicionarán el tratamiento. El tratamiento en suelo tendrá como principales restricciones las siguientes: que el residuo no contenga contaminantes persistentes y que la cantidad sea pequeña en atención al área necesaria para implementar el tratamiento.

La utilización de esta técnica solo podrá ser realizada mediante una evaluación previa de la capacidad de degradación del contaminante en el suelo y los potenciales productos intermedios que pueden generarse en el proceso de tratamiento.

En los casos en los que exista riesgo de contaminación de aguas subterráneas será necesario la impermeabilización de la base donde se realizará el proceso. También

es necesario controlar los escurrimientos superficiales. En este tipo de técnicas se utiliza maquinaria para inyectar o esparcir los residuos y equipamiento para remover y mezclar la capa de suelo involucrada en el tratamiento.

4. 6. 4. Tratamiento térmico–Destrucción y métodos de transformación irreversible

Cuando no existen las condiciones para la recuperación de recursos, el reciclado o la regeneración, el Convenio de Basilea considera la destrucción y transformación irreversible de compuestos orgánicos, a través de procesos que alteran permanentemente la estructura química original, sin posibilidad de retornar a las condiciones iniciales. A continuación, se describen varios de estos métodos de transformación, en los que predominan los tratamientos térmicos como la incineración, por ser reconocida como la mejor alternativa para la destrucción de residuos orgánicos.

Reducción de metales alcalinos: Implica el tratamiento de desechos con metales alcalinos dispersos. Los metales alcalinos reaccionan con el cloro en los residuos halogenados para producir sales y residuos no halogenados. Normalmente, el proceso funciona a presión atmosférica y a temperaturas de entre 60 °C y 180 °C. El tratamiento puede tener lugar *in situ* o *ex situ* en recipientes de reacción. Aunque el potasio y la aleación de potasio-sodio se han utilizado como agentes reductores, el sodio metálico es el agente reductor más utilizado (UNEP, 2023).

Incineración a altas temperaturas: Se entiende por incineración al procesamiento de residuos en cualquier unidad técnica, equipo fijo o móvil que involucre un proceso de combustión a altas temperaturas. En dicho proceso la materia orgánica es oxidada con el oxígeno del aire, generando emisiones gaseosas que contienen mayoritariamente dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno. En el proceso se generan residuos sólidos (cenizas y escorias constituidas por el material no combustible).

La incineración es un proceso complejo que debe ser cuidadosamente diseñado y operado, requiere de altos costos de inversión, operación y mantenimiento, así como mano de obra calificada. Sin embargo, se trata de una tecnología demostrada y disponible comercialmente para el tratamiento de residuos peligrosos. De hecho, es claramente aceptada como la mejor alternativa disponible para la destrucción de la mayoría de los residuos orgánicos peligrosos.

Existen diferentes tipos de incineradores y cada uno de ellos tendrá sus limitaciones en cuanto al tipo y cantidad de residuos a procesar. Los comunes son los de inyección líquida y los hornos rotatorios, los primeros empleados para residuos líquidos y los segundos para todo tipo de residuos.

Desde el punto de vista de la efectividad de la combustión, las variables operativas más importantes para un incinerador son: la temperatura, el tiempo de residencia y la turbulencia. Estas variables repercutirán directamente en la eficiencia de la destrucción del sistema y por ende en la generación de productos de combustión incompleta que formarán parte de las emisiones gaseosas del incinerador.

Dentro de la amplia gama de compuestos que pueden estar presentes en los residuos peligrosos, algunos son compuestos orgánicos que se destruyen eficientemente a bajas temperaturas (por ejemplo, madera, papel, aceites); sin embargo, otros constituyentes requieren de altas temperaturas para una combustión completa. Es así como los incineradores para residuos peligrosos son diseñados para que los gases de combustión alcancen temperaturas en el rango de 850 °C a 1600 °C, con un tiempo de estadía de al menos 2 segundos. A efectos de cumplir con los estándares de emisión que se manejan a nivel internacional, los incineradores deben contar con

sofisticados sistemas de tratamiento de emisiones atmosféricas y el correspondiente sistema de control de emisiones.

La alternativa de incineración como sistema de tratamiento de residuos dependerá de las características del residuo y de la instalación de incineración. En particular se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

Que el residuo sea apto para ingresar a un proceso de incineración (mayoritariamente orgánico y no contener cantidades de metales que puedan volatilizarse en el proceso). Además de estos aspectos generales, se deberían verificar las condiciones específicas de incineración para los contaminantes presentes, como:

Que el incinerador esté diseñado para el tratamiento de residuos peligrosos, en particular que se cumplan los parámetros de temperatura, turbulencia y tiempo de residencia necesarios. En caso de ser así, se debe verificar si existen restricciones específicas para algunos grupos de compuestos.

- Que la operación del incinerador sea la adecuada. En caso de dudas, este hecho se puede corroborar a través de la realización de un test de quema.
- Que cuente con sistema de tratamiento y control de emisiones atmosféricas acorde con los residuos que procesa.
- Que cumpla con los estándares de emisiones atmosféricas que rigen en el país o, en caso de no existir normas nacionales, se sugiere comparar sus emisiones con estándares internacionales.

Costos asociados a las plantas de incineración de RSU

De acuerdo con GIZ (2017), diversas variables pueden definir tanto el costo de capital (CAPEX) como el costo de operación (OPEX) de una planta de incineración de RSU. Por lo tanto, los valores particulares pueden variar sustancialmente debido por ejemplo a factores como son el tipo de instalación y las condiciones locales, entre otros. En los costos que se reportan en la presente sección se ha contemplado el uso de la tecnología de combustión en parrillas, tecnología considerada como madura por los especialistas y quizá la más usada en el mundo.

Los costos de capital y de operación son función (**f**) de varios factores, y los más significativos para cada uno de ellos son:

CAPEX = f (preparación de sitio; obra civil; chimenea; horno de parrillas; caldera; equipo para manejo de cenizas; sistemas eléctricos y mecánicos; generador de energía; equipo de control de emisiones a la atmósfera; contingencias; terreno, etc.).

OPEX = f (eliminación de cenizas; productos químicos; servicio de limpieza; mantenimiento; sueldos y salarios; electricidad, combustible, agua, contingencias, etc.).

A partir de datos obtenidos de fuentes diversas (2010-2017), en la Tabla 23 se describen los datos relativos a los costos de capital en plantas ubicadas en diferentes países.

Tabla 23. Capacidad y costo de capital de diferentes plantas de incineración.

Lugar	Capacidad (t/año)	Costo de capital por tonelada de capacidad (USD/t)
Moscú, Rusia	360.000	800
París, Francia	460.000	1.313
Shanghái, China	500.000	331
Países de bajos ingresos	-	300–500
Países de ingreso medio	-	400–600
País de alto ingreso	-	600–900
Valparaíso, Chile	336.000	670
Toluca, México	160.000	750
Buenos Aires, Argentina	990.000	595

Fuente: GIZ (2017).

Los costos de operación para las tres últimas plantas incluidas en la tabla anterior son los siguientes:

- Valparaíso, Chile: 39 USD/t
- Toluca, México: 47,5 USD/t
- Buenos Aires, Argentina: 31,8 USD/t

Descomposición catalizada por bases (BCD): El proceso BCD implica el tratamiento de residuos en presencia de una mezcla de reactivos que consiste en un aceite donante de hidrógeno, un hidróxido de metal alcalino y un catalizador patentado. Cuando la mezcla se calienta por encima de 300 °C, el reactivo produce hidrógeno atómico altamente reactivo. El hidrógeno atómico reacciona con los residuos para eliminar los componentes que confieren toxicidad a los compuestos.

Hidrodecloración catalítica (CHD): La CHD consiste en el tratamiento de residuos con gas hidrógeno y un catalizador de paladio sobre carbono (Pd/C) disperso en aceite de parafina. El hidrógeno reacciona con el cloro de los residuos halogenados para producir cloruro de hidrógeno (HCl) y residuos no halogenados. El proceso opera a presión atmosférica y a temperaturas de entre 180 °C y 260 °C.

Coprocesamiento en hornos de cemento: La incineración de residuos en hornos de cemento entra en la categoría de coprocesamiento de residuos. Esta denominación deriva del hecho de utilizar la misma unidad de producción de clínker (producto intermedio en la producción de cemento) para la combustión de residuos. La industria de cemento es de alto consumo energético, en la que se utilizan varios tipos de combustibles tradicionales, y es común el uso de ciertas fracciones de residuos como combustibles alternativos.

El cemento es producido en un horno de alta temperatura a través de la calcinación de una mezcla de minerales compuesta básicamente por carbonato de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, produciendo un producto intermedio denominado clínker, que alcanza temperaturas en el entorno de 1.450 °C. Para este proceso es necesario que los gases de combustión alcancen temperaturas del orden de 1.650 °C, manteniéndose por encima de 1.100 °C por un periodo de 2 a 5 segundos.

Los hornos de cemento suelen consistir en un cilindro largo de 50 a 150 metros de longitud, ligeramente inclinado con respecto a la horizontal (pendiente del 3 al 4 por ciento), que gira a unas 14 revoluciones por minuto. Las materias primas como la piedra caliza, la sílice, la alúmina y los óxidos de hierro se introducen en el extremo superior o "frío" del horno rotatorio. La pendiente y la rotación hacen que los materiales se

muevan hacia el extremo inferior o "caliente" del horno. Todo se cuece en el extremo inferior del horno, donde las temperaturas del material alcanzan los 1400 °C–1500 °C. A medida que los materiales se mueven a través del horno, se someten a reacciones de secado y piropcesamiento para formar clínker. La longitud del horno asegura un tiempo de residencia suficiente de los gases de incineración a altas temperaturas: unos 8 segundos a temperaturas superiores a 1200 °C.

Reducción química en fase gaseosa (GPCR): El proceso GPCR, que también puede denominarse hidrogenación, implica la reducción termoquímica de compuestos orgánicos. A temperaturas superiores a 850 °C y a bajas presiones, el hidrógeno reacciona con compuestos orgánicos clorados para producir principalmente metano, cloruro de hidrógeno (si los residuos están clorados) y cantidades menores de hidrocarburos de bajo peso molecular (benceno y etileno). El ácido clorhídrico se neutraliza mediante la adición de sosa cáustica durante el enfriamiento inicial del gas de proceso, o se puede quitar en forma ácida para su reutilización. La tecnología GPCR se puede dividir en tres operaciones unitarias básicas: un sistema de front-end (en el que los contaminantes se transforman en una forma adecuada para su destrucción en el reactor), un reactor (que reduce los contaminantes, en esta etapa en fase gaseosa, utilizando hidrógeno y vapor) y un sistema de lavado y compresión de gases.

Arco de plasma: Los residuos, en forma líquida o gaseosa, se inyectan directamente en el plasma y se calientan rápidamente (<1 ms) hasta unos 3.100 °C y se pirolizan durante unos 20 ms en la cámara de reacción refrigerada por agua (tubo de vuelo). La alta temperatura hace que los compuestos se disocien en sus iones elementales y átomos. La recombinación ocurre en un área más fría de la cámara de reacción, seguida de un enfriamiento, lo que resulta en la formación de moléculas simples. El sistema de arco de plasma requiere un dispositivo de reducción de óxidos de nitrógeno (NOx), ya que la llama de alta temperatura produce cantidades importantes de NOx. La tecnología es aplicable a residuos orgánicos líquidos finamente divididos y puede ser utilizada para residuos con alto contenido de cloro, pesticidas, PCBs, dioxinas y furanos.

Pirólisis: La pirólisis se produce a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, obteniendo la ruptura térmica de las moléculas presentes en el residuo. El sistema consiste en dos cámaras; en la primera el residuo es calentado separando los compuestos volátiles de las cenizas, mientras que en la segunda se realiza la combustión de los componentes volátiles en condiciones de oxígeno, temperatura, tiempo y turbulencia que garanticen la destrucción de los contaminantes. Esta tecnología se utiliza para tratar líquidos viscosos, lodos, materiales con alto contenido de cenizas, residuos contenidos en carcasas, entre otros. Se requiere de combustibles auxiliares y generalmente tienen poca capacidad de tratamiento.

Oxidación de agua supercrítica (SCWO) y oxidación de agua subcrítica: El SCWO y la oxidación subcrítica del agua tratan los desechos en un sistema cerrado utilizando un oxidante (como oxígeno, peróxido de hidrógeno, nitrito, nitrato, etc.) en el agua a temperaturas y presiones por encima del punto crítico del agua (374 °C y 218 atmósferas) y por debajo de condiciones subcríticas (370 °C y 262 atmósferas). En estas condiciones, los materiales orgánicos se vuelven altamente solubles en agua y se oxidan para producir dióxido de carbono, agua y ácidos o sales inorgánicos.

Producción térmica y metalúrgica de metales: Son procesos de producción de metales diseñados principalmente para la recuperación de hierro y metales no ferrosos (NFM), por ejemplo, aluminio, zinc, plomo y níquel de concentrados de minerales, así como de materias primas secundarias (intermedios, desechos, chatarra). Sin embargo, debido a su naturaleza, en algunos casos los procesos también se utilizan con fines comerciales para la destrucción de ciertos desechos con contenido de COP. En los

documentos de referencia sobre las MTD europeas para la producción de hierro y acero³⁰ y las industrias NFM³¹ se puede encontrar una descripción general de algunos de los procesos.

Oxidación en sal fundida: Consiste en un proceso de oxidación sin llama, desarrollado a temperaturas entre 1500 y 2000 °C, en el que las sustancias orgánicas son oxidadas por el oxígeno en una cámara de reacción donde se encuentra una sal alcalina fundida (carbonato de sodio). La materia orgánica es oxidada a dióxido de carbono y agua, mientras que otros elementos como fósforo, sulfuros, arsénico y halógenos reaccionan con el carbonato de sodio, siendo retenidos como sales inorgánicas. Puede ser utilizado para tratar residuos con bajo contenido de cenizas o alto contenido de cloro.

4. 6. 5. Otros métodos de eliminación cuando la destrucción o la transformación irreversible no sean la opción preferible desde el punto de vista ambiental

Cuando la destrucción o la transformación irreversible no sea la opción ambientalmente preferible para los desechos con un contenido de COP, se podría permitir que esos desechos se eliminen de manera ambientalmente racional mediante métodos distintos de los mencionados en el punto anterior, como ser:

Vertedero especialmente diseñado: Todo depósito de desechos que contengan, estén compuestos por o contaminados con COP en vertederos especialmente diseñados (confinamientos controlados o rellenos de seguridad) debe realizarse de acuerdo con las *Directrices Técnicas para la Eliminación Ambientalmente Racional de Desechos Peligrosos y otros residuos en vertederos modificados*³² del PNUMA (2022). En este sentido, cuando sea necesario, dichos residuos deberán someterse a un tratamiento previo, como la solidificación, antes de ser aceptados en estos vertederos, con el fin de minimizar el riesgo de que los COP presentes se liberen al medio ambiente.

Un vertedero especialmente diseñado es una obra de ingeniería diseñada, construida y operada para confinar en el terreno residuos peligrosos. Consiste básicamente en una o varias celdas de disposición final y un conjunto de elementos de infraestructura para la recepción y acondicionamiento de residuos, así como para el control de ingreso y evaluación de su funcionamiento.

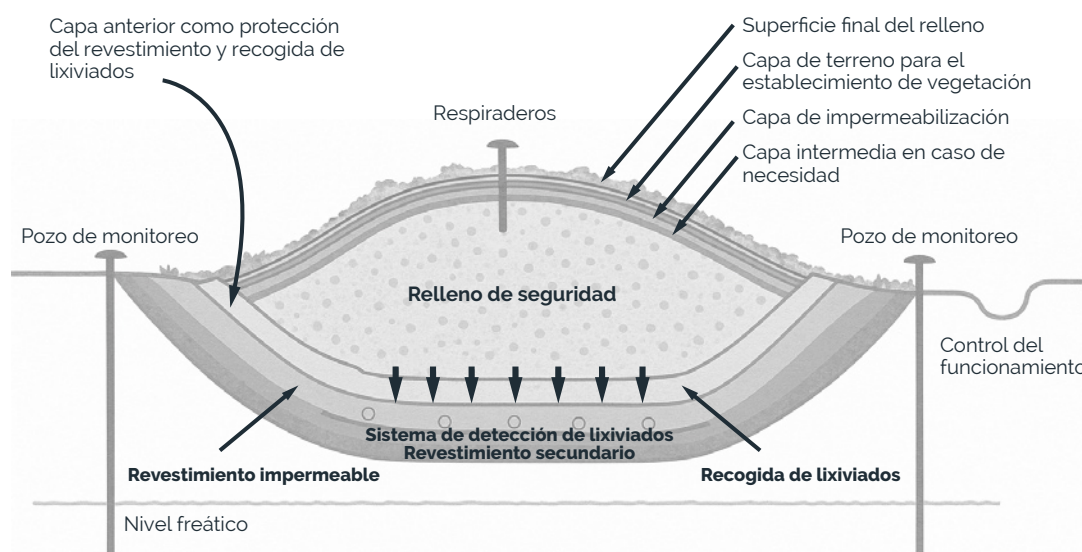
Para ser considerado como un relleno de seguridad, el mismo debe contar como mínimo con los siguientes elementos (Figura 11):

- Sistema de impermeabilización de base y taludes de doble barrera.
- Sistema de captación, conducción y tratamiento de lixiviados.
- Sistema de detección de pérdidas.
- Sistema de captación y conducción de gases.
- Elementos de control de ingreso de agua de lluvia por escurrimiento.
- Sistemas de impermeabilización para la clausura.

30 Disponible en: http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2013/163/oj

31 Disponible en: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041_NFM_bref2017.pdf

32 Disponible en: <https://synergies.pops.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.15-6-Add.5-Rev.1.Spanish.pdf>

Figura 11. Diseño de un vertedero especialmente diseñado o relleno de seguridad.

Fuente: Martínez (2005).

Cada relleno contará con criterios de aceptación de residuos en base a las características de las celdas y la compatibilidad de los residuos recibidos. Contará además con planes de contingencia y un programa de monitoreo ambiental.

La evaluación de esta opción como sistema de destino final deberá tener en cuenta que el relleno cumpla con las condiciones mínimas de seguridad para manejar residuos peligrosos y que los residuos a disponer cumplan con las condiciones de aceptación.

Almacenamiento permanente en minas y formaciones subterráneas: El *almacenamiento* permanente en instalaciones situadas bajo tierra en minas de sal hidrogeológicamente aisladas y formaciones rocosas duras es una opción para separar los desechos peligrosos de la biosfera durante períodos de tiempo geológicos. Debe realizarse una evaluación de la seguridad específica del emplazamiento de conformidad con la legislación nacional pertinente. Los desechos deben eliminarse de manera que se excluya toda reacción indeseable entre los diferentes desechos o entre los desechos y los revestimientos de almacenamiento, entre otras cosas, mediante el almacenamiento de los desechos en contenedores química y mecánicamente seguros. Los desechos líquidos, gaseosos, que emiten gases tóxicos o que son explosivos, inflamables o infecciosos no deben almacenarse bajo tierra en las minas.

4. 6. 6. Otros métodos de eliminación cuando el contenido de COP es bajo

Bajo contenido de COP en residuos

Las definiciones de bajo contenido de COP deben establecerse teniendo en cuenta el objetivo principal del Convenio de Basilea y el Convenio de Estocolmo, que es la protección del medio ambiente y la salud humana. Se han reconocido los siguientes factores en la determinación del bajo contenido de COP que se definen en función de un límite umbral específico (UNEP, 2023):

- a. Consideraciones ambientales y de salud humana;
- b. Disponibilidad de capacidad de análisis adecuada;
- c. Rango de concentraciones en artículos, materiales y residuos;
- d. Valores límite establecidos en la legislación nacional;
- e. Disponibilidad de capacidad de tratamiento;
- f. Limitaciones de conocimientos y datos;
- g. Consideraciones económicas.

Es importante mencionar que, para reducir las emisiones de COP al medio ambiente, existe la obligación de destruir o transformar irreversiblemente el contenido de COP de los residuos que supere un determinado límite umbral. En casos excepcionales, los residuos que contengan COP por encima de los límites podrán gestionarse de otro modo mediante operaciones específicas para tipos de residuos específicos si la destrucción o la transformación irreversible no representan la opción ambientalmente preferible y la concentración de COP es inferior a un valor umbral máximo (EC, 2019)³³. En la Tabla 24 se plasman los límites de bajo contenido de COP para algunos de estos (UNEP, 2023)³⁴.

Tabla 24. Definiciones provisionales de bajo contenido de COP.

Tipo de COP	Bajo contenido de COP
PCDD y PCDF	1 µg EQT/kg o 15 µg EQT/kg [1 µg EQT/kg o 5 µg EQT/kg]
PCDD, PCDF y PCB similares a las dioxinas	[EQT de 1 µg/kg] [EQT de 5 µg/kg]
PFOA, sus sales y compuestos relacionados con el PFOA	[50 mg/kg] [1 mg/kg (PFOA y sus sales), 40 mg/kg (suma de compuestos relacionados con el PFOA)] [0,025 mg/kg para PFOA y sales; 10 mg/kg para compuestos relacionados] [en espumas formadoras de película acuosa de desecho (AFFF)] 0,025 mg/kg para el PFOA y sus sales, y 1 mg/kg para compuestos relacionados]
Ácido perfluorohexano sulfónico (PFHxS), sus sales y compuestos relacionados con PFHxS	1 mg/kg (PFHxS y sus sales), 40 mg/kg (suma de compuestos relacionados con PFHxS)
PFOS, sus sales y PFOSF	[5 mg/kg o] 50 mg/kg

Fuente: UNEP, 2023.

³³ European Commission, DG Environment, Directorate, 2019. B3. Study to support the review of waste related issues in annexes IV and V of regulation (EC) 850/2004. Final report. 394 pp.

³⁴ UNEP, 2023. General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. UNEP/CHW.16/6/Add.1/Rev.1. UNEP-BC. 79 pp.

Los desechos con un contenido de COP inferior al límite establecido deben ser eliminados de manera ambientalmente racional, conforme a la legislación nacional y directrices internacionales, incluyendo las del Convenio de Basilea. El método de eliminación debe seleccionarse de acuerdo con el tipo de corriente de desechos y gestionarse de forma que proteja el medio ambiente. Se han desarrollado guías técnicas específicas en el marco del Convenio de Basilea para distintos tipos de desechos³⁵.

La aplicación en suelo de residuos que contengan COP, especialmente PCDD/PCDF y PCB similares a las dioxinas, en concentraciones menores a los límites establecidos, debe evaluarse con mucho cuidado, incluso aplicando el principio precautorio se deben eliminar totalmente para evitar riesgos a la salud y al medio ambiente, particularmente en relación con la contaminación de la cadena alimentaria.

35 Disponibles en www.basel.int

Notas

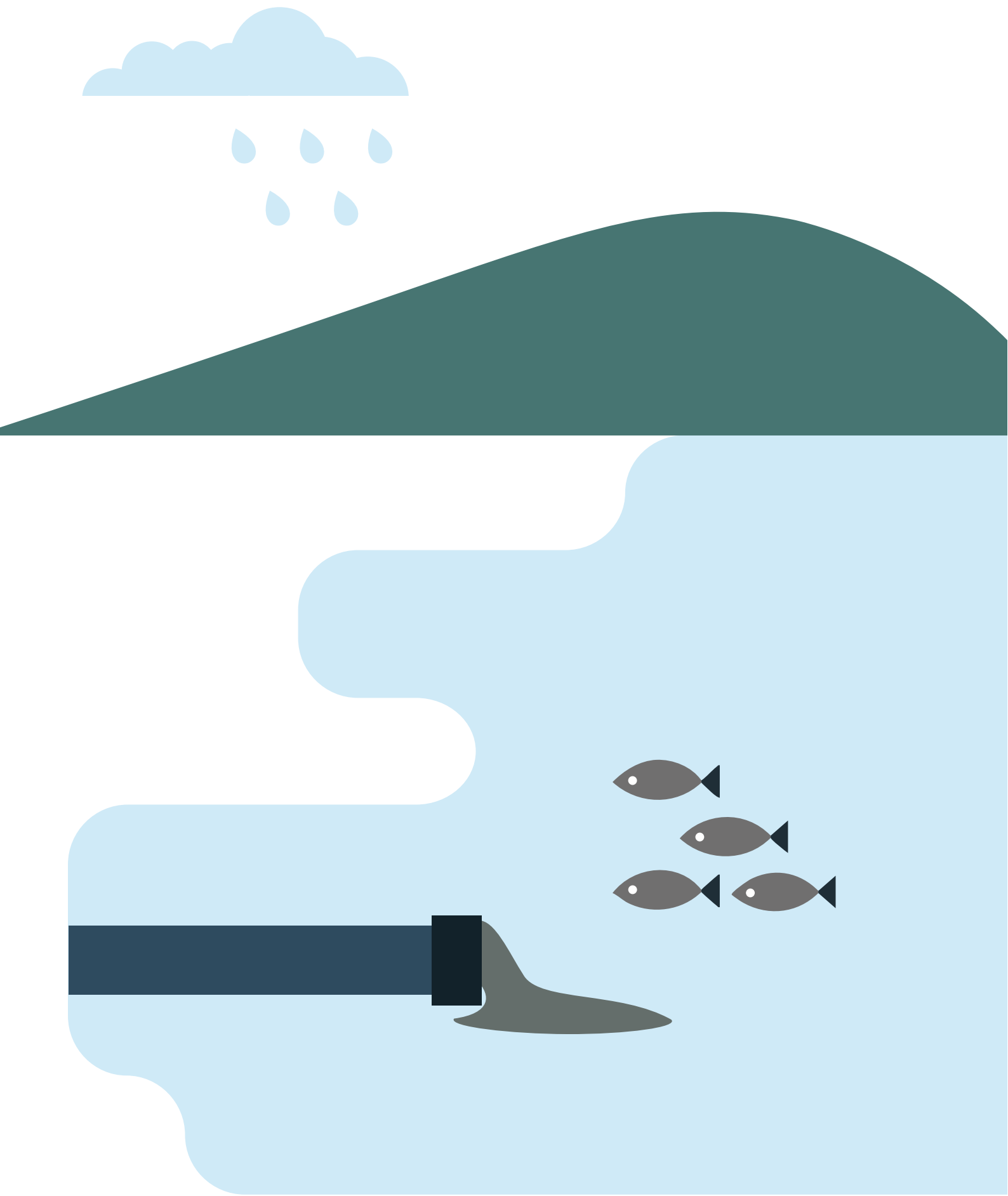
Notas

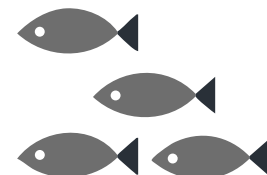
Notas

Notas

Notas

CAR COP





5. Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA) para la gestión de COP

Según el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (PNUMA, 2020), las **Mejores Técnicas Disponibles (MTD)** se definen como:

Mejores Técnicas Disponibles

La etapa más eficaz y avanzada en el desarrollo de actividades y sus métodos de operación que indican la idoneidad práctica de técnicas específicas para proporcionar, en principio, la base de las limitaciones de las liberaciones destinadas a evitar, y cuando no sea posible, reducir en general las liberaciones de las sustancias COP y sus efectos en el medio ambiente en su conjunto, se entiende por:

Mejores: Se entiende más eficaces para lograr un alto grado general de protección del medio ambiente en su conjunto.

Técnicas: Incluye tanto la tecnología utilizada como el modo en que la instalación es diseñada, construida, mantenida, operada y desmantelada.

Disponibles: Son aquellas técnicas que resultan accesibles al operador y que se han desarrollado a una escala que permite su aplicación en el sector industrial pertinente en condiciones económica y técnicamente viables, teniendo en consideración los costos y las ventajas.

El concepto de MTD no está dirigido a la prescripción de una técnica o tecnología específica, sino para tener en cuenta, entre otros aspectos, su variable económica, las características técnicas de la instalación de que se trate, su ubicación geográfica y las condiciones ambientales locales. En tanto, las Mejores Prácticas Ambientales (MPA) se definen como:

Mejores Prácticas Ambientales (MPA)

La aplicación de la combinación más adecuada de medidas y estrategias de control ambiental.

Lineamientos generales por considerar cuando se aplican esquemas de MTD/MPA

- Proporcionar lineamientos claros y prácticos para la gestión integral de residuos sólidos y peligrosos, incluyendo tecnologías de recuperación, tratamiento y disposición final.
- Promover la implementación de MTD/MPA adaptadas a las condiciones socioeconómicas específicas del país, para maximizar la recuperación de materiales y minimizar la generación de residuos.
- Fomentar la responsabilidad extendida del productor y los principios de la economía circular en la gestión de residuos, asegurando que los productores y generadores sean responsables de los residuos post-consumo.
- Incorporar estrategias de medición y evaluación para asegurar la efectividad de las prácticas implementadas.

5.1. Medidas generales de prevención relativas a las MTD/MPA

De acuerdo con el Convenio de Estocolmo (Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2007), se han identificado diversas medidas que pueden implementarse como un mecanismo de prevención relativas a las MTD/MPA, las cuales se mencionan a continuación:

- Utilizar tecnologías que generen pocos desechos o residuos.
- Utilizar sustancias menos peligrosas.
- Fomentar la regeneración y el reciclado de los desechos y las sustancias generadas y utilizadas en los procesos.
- Sustituir materias primas que sean contaminantes orgánicos persistentes, o en el caso de que exista un vínculo directo entre los materiales y las liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes de la fuente.
- Establecer programas de buen funcionamiento y mantenimiento preventivo.
- Mejorar de la gestión de desechos con miras a poner fin a la incineración de desechos a cielo abierto y otras formas incontroladas de incineración, incluida la incineración de vertederos.
- Reducir al mínimo de esos productos químicos como contaminantes en otros productos.
- Evitar el cloro elemental o productos químicos que generan cloro elemental para blanqueo.

5.2. Contaminantes orgánicos persistentes de producción no intencional

En el anexo C del Convenio de Estocolmo, en su parte I relativa a los COP no intencionales señalados en el artículo 5 del Convenio que establece las Medidas para reducir o eliminar las liberaciones derivadas de la producción no intencional, se mencionan las siguientes sustancias: dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF), hexaclorobenceno (HCB), bifenilos policlorados (PCB). Las siguientes categorías de fuentes tienen un potencial de formación y liberación

relativamente elevadas de estos productos químicos al medio ambiente (Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2007):

Categorías de fuentes con potencial de formación y liberación relativamente elevados de PCDD/PCDF, HCB y PCB.

- Incineradoras de desechos, incluidas las coíncineradoras de desechos urbanos peligrosos o médicos o de fango cloacal.
- Desechos peligrosos procedentes de la combustión en hornos de cemento.
- Producción de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que producen cloro elemental para el blanqueo.
- Los siguientes procesos térmicos de la industria metalúrgica:
 - Producción secundaria de cobre.
 - Plantas de sinterización en la industria del hierro e industria siderúrgica.
 - Producción secundaria de aluminio.
 - Producción secundaria de zinc.
- Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos.
- Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en la parte II.
- Fuentes de combustión domésticas.
- Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas o calderas industriales.
- Instalaciones de combustión de madera u otros combustibles de biomasa.
- Procesos de producción de productos químicos determinados que liberan de forma no intencional COP formados, especialmente la producción de clorofenoles y cloranil.
- Crematorios.
- Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible.
- Destrucción de carcasas de animales.
- Teñido (con cloranil) y terminación (con extracción alcalina) de textiles y cueros.
- Plantas de desguace para el tratamiento de vehículos una vez acabada su vida útil.
- Combustión lenta de cables de cobre.
- Desechos de refinerías de petróleo.

Para el caso de Paraguay, las fuentes relevantes de COP son la incineración de residuos (urbanos, peligrosos, médicos), la quema de residuos agrícolas, incendios forestales, la quema a cielo abierto de residuos, incluyendo vertederos. Con base en lo anterior, se describirán las MTD/MPA aplicables a este tipo de fuentes.

5.3. **MTD/MPA de la incineración de residuos**

Con la finalidad de tener un mayor entendimiento sobre las MTD/MPA para la incineración de los distintos tipos de residuos, en este apartado se plasma lo descrito en el documento **“Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación**

provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme al Artículo 5 y Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes³⁶.

5.3.1. Residuos sólidos urbanos, peligrosos y lodos de alcantarillado

En el Convenio de Estocolmo se señala a las incineradoras de desechos como industrias con un potencial de formación y liberación relativamente alto de sustancias que figuran en su Anexo C.

Los objetivos previstos de la incineración son la reducción del volumen de los desechos, recuperación de energía, destrucción o –al menos– disminución de componentes peligrosos, desinfección y recuperación de algunos residuos.

Para el caso de la construcción de plantas de incineración nuevas, se deben priorizar estrategias de gestión integral de residuos, incluyendo la incorporación de criterios de economía circular, la reducción de la generación, a través de la separación, recuperación, reutilización, reciclaje y la promoción de productos que generen menos desechos y con mayor vida útil. También se deben priorizar los métodos que prevengan la formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes.

Las mejores prácticas ambientales para incineración de residuos comprenden procedimientos ex situ (como la gestión integral, como se mencionó en el párrafo anterior y el estudio de las repercusiones ambientales del emplazamiento) y procedimientos in situ (como la inspección, manipulación, funcionamiento de incineradores y prácticas de gestión y manipulación de residuos adecuadas).

Las mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos son la selección apropiada del sitio, ingreso y control de desechos, técnicas adecuadas de combustión, tratamiento de los gases de combustión, de los residuos sólidos y de los efluentes.

Los residuos domésticos contienen una gran variedad de materiales, incluso elementos no combustibles, por lo que es necesario que los incineradores tengan una construcción sólida y sean versátiles para tratar material de alimentación muy variable en cuanto a composición y valor calorífico de los desechos. Por lo general, se trata de hornos con parrillas de cadena o parrillas de agitación, y, aunque son menos frecuentes, hornos giratorios. Para los lodos de alcantarillado y desechos industriales se utiliza la combustión en lecho fluidizado. Para garantizar una alta eficacia de combustión, debe haber un estricto control del rango de temperatura al que el horno opera y quema los desechos, del tiempo de residencia para alcanzar la temperatura del horno y se mantienen en ella, así como de la turbulencia en la cámara del horno. El principio de “las tres tes” –temperatura, tiempo y turbulencia en presencia de suficiente oxígeno– es fundamental para una buena combustión.

Para evitar emisiones de gases o partículas, los incineradores deben estar equipados con sistemas eficaces de limpieza de gases de combustión que, en muchos casos, funcionan con convertidores catalíticos o añadiendo carbón activado a los gases de combustión o depuradores. Si se descarga agua de los depuradores, debe ser tratada. Las cenizas volantes de los precipitadores electrostáticos y los residuos de los equipos de contaminación atmosférica casi siempre contienen cantidades considerables de COP no intencionales.

36 [https://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP\(new\)/UnintentionalPOPsreleases\(new\)/BATandBEPGuidance/ tabid/9647/Default.aspx](https://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP(new)/UnintentionalPOPsreleases(new)/BATandBEPGuidance/ tabid/9647/Default.aspx)

Técnicas de tratamiento de gases de combustión (dispositivos de control de la contaminación atmosférica)

En principio, se puede lograr la reducción de emisiones de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) mediante los siguientes procesos de limpieza de gases de escape:

- Cámaras de postcombustión
- Sistemas de enfriamiento brusco
- Separación de polvos
- Procesos de depuración
- Procesos de sorción
- Oxidación catalítica

Los procesos de control de la contaminación atmosférica pueden ser húmedos, secos o semihúmedos, dependiendo del papel del agua en el proceso. Los dispositivos de control de la contaminación atmosférica en húmedo y, algunas veces, en semihúmedo, implican procesos adicionales para limpiar las aguas residuales generadas antes de que salgan de las instalaciones. Los desechos sólidos derivados de procesos semihúmedos y secos (y también de procesos húmedos después del tratamiento de aguas residuales) tienen que eliminarse de modo ambientalmente racional, o recibir un tratamiento complementario antes de su eliminación o reutilización potencial.

Comparación de las técnicas de control de PCDD/PCDF

Las técnicas que han resultado más efectivas para reducir contaminantes orgánicos persistentes en los gases de combustión son las que utilizan adsorbentes y control de partículas y las que utilizan catalizadores. En la Tabla 25 se resumen las eficiencias de recolección de determinadas técnicas de control de PCDD/PCDF.

Los costos del control de PCDD/PCDF en instalaciones existentes pueden reducirse aprovechando los dispositivos de control de contaminación atmosférica:

- Mediante la inyección de coque activado se puede extender un filtro de tela o un precipitador electrostático existente a un reactor de inyección de lechada para reducir PCDD/PCDF. Los costos adicionales de la reducción de PCDD/PCDF provienen del almacenamiento, transporte, inyección y eliminación de coque activado que se utiliza como adsorbente adicional, y de la manipulación libre de riesgos del carbono y los residuos para eliminación, que pueden ser distintos.
- Los PCDD/PCDF pueden ser destruidos con un catalizador de oxidación. Para tal fin, se puede utilizar un catalizador existente empleado para la eliminación selectiva de óxidos de nitrógeno (NOx). Puede generar costos adicionales la ampliación de la superficie del catalizador agregando una o dos capas para obtener concentraciones de PCDD/PCDF por debajo de 0.1 ng EQT-I/Nm³.

Además de la eliminación o destrucción de PCDD/PCDF, también se reducirán otros contaminantes como metales pesados, aerosoles u otros contaminantes orgánicos.

Tabla 25. Comparación de los sistemas de control de PCDD/PCDF.

Opción de control	Eficiencia de eliminación de PCDD/PCDF	Cobeneficios
Ciclón	Eficiencia baja	Eliminación de polvo grueso
Precipitador electrostático	Eficiencia baja	Diseñado para eliminar polvo
Filtro de manga	Eficiencia media	Diseñado para eliminar polvo
Depurador en húmedo	Eficiencia media	Diseñado para eliminar polvo o gases ácidos
Enfriamiento brusco seguido de un depurador en húmedo de gran eficiencia	Eficiencia media a alta	Reducción simultánea de polvo, aerosoles, HCl, HF, metales pesados y SO ₂
Cámara de postcombustión	Eficiencia alta	Cero residuos, pero se requiere el enfriamiento brusco de gases de combustión.
Oxidación catalítica (reacción catalítica selectiva)	Eficiencia alta; destrucción de PCDD/PCDF y otros compuestos orgánicos	Cero residuos, reducción simultánea de NOx
Filtros de manga catalíticos	Eficiencia alta	Eliminación simultánea de polvo
Adsorción seca en resinas (partículas de carbón dispersas en una matriz polimérica)	Depende de la cantidad de material instalado	Selectivo para PCDD/PCDF; el material puede incinerarse una vez utilizado.
Reactor de arrastre de flujo con agregado de carbón activado o coque/cal o soluciones de piedra caliza y posteriormente filtro de tela	Eficiencia media a alta	Reducción simultánea de diversos contaminantes como PCDD/PCDF y mercurio; el material puede incinerarse una vez utilizado.
Reactor de lecho fluidizado fijo o circulante, adsorción con carbón activado o coque de horno de solera abierta	Eficiencia alta	Reducción simultánea de diversos contaminantes como PCDD/PCDF y mercurio; el material puede incinerarse una vez utilizado.

Fuente: Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2007.

Para obtener los mejores resultados para la protección integral del medio ambiente es esencial coordinar el proceso de incineración de desechos con las etapas anteriores (ej., técnicas de gestión de desechos) y las etapas posteriores (ej., eliminación de residuos sólidos derivados de la incineración de desechos).

Las liberaciones de las sustancias del Anexo C provenientes de las incineradoras de desechos sólidos urbanos concebidas y operadas según las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales se generan principalmente por cenizas volantes, cenizas de fondo y tortas de filtro del tratamiento de aguas residuales. Por ello es de suma importancia prever el depósito de estos tipos de desechos en condiciones de seguridad, con un pretratamiento y eliminación final en rellenos sanitarios exclusivos, preparados y operados según las mejores técnicas disponibles.

Con una combinación apropiada de medidas principales y secundarias, se asocian a las mejores técnicas disponibles niveles de desempeño no superiores a 0.1 ng EQT⁻¹ Nm³ (con 11 % de O₂) para PCDD/PCDF, en emisiones atmosféricas. Se ha observado además que, en condiciones normales de funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien concebida.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de

depuración de gases de combustión, se asocian con niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT⁻¹/L.

5.3.2. Residuos médicos

La incineración de desechos médicos (desechos sanitarios infecciosos, desechos biológicos y objetos cortantes) se efectúa en plantas incineradoras de desechos exclusivas a fin de evitar al máximo los riesgos químicos, biológicos y físicos, y reducir el volumen de desechos como etapa de tratamiento previo a la expedición a rellenos sanitarios ambientalmente racionales.

En el caso de pequeñas incineradoras de desechos médicos, suele ser difícil aplicar mejores técnicas disponibles por lo elevado de los costos asociados a la construcción, funcionamiento, mantenimiento y vigilancia de estas instalaciones.

Las alternativas posibles a la incineración son la esterilización (vapor, sistemas mejorados, calor seco), el tratamiento por microondas, la hidrólisis alcalina, el tratamiento biológico o, en ciertos casos, el vertido en rellenos sanitarios. El paso más importante en la gestión de desechos médicos consiste en separar los distintos tipos de desechos desde su origen. En vista de que de 75 % a 90 % de los desechos de hospitales son comparables a los desechos sólidos urbanos, la separación disminuye enormemente la cantidad de desechos médicos. Es esencial una gestión eficaz de los desechos, en particular la reducción y separación de los desechos desde su origen.

El tratamiento adecuado de cenizas de fondo y residuos generados por la depuración de gases de combustión es primordial para disminuir las liberaciones de PCDD/PCDF al medio ambiente. El uso de mejores técnicas disponibles en las incineradoras reducirá asimismo las emisiones de ácido clorhídrico y metales (en particular, mercurio) y, de hecho, también reducirá las posteriores emisiones de los residuos depositados en vertederos sanitarios.

5.3.3. Hornos de cemento que queman desechos peligrosos

La finalidad principal de los hornos de cemento es la producción de clinker. Con la combustión de desechos en hornos de cemento se busca recuperar energía y sustituir combustibles fósiles o minerales. En algunos casos se eliminan desechos peligrosos en estas plantas.

El proceso de fabricación comprende la descomposición de carbonato de calcio (CaCO_3) a 900 °C aproximadamente para obtener óxido de calcio (CaO , cal) (calcinación), seguida de un proceso de clinkerización a unos 1450 °C, en horno rotatorio. A continuación, se muele el clinker junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. Según las condiciones físicas y químicas, los principales procesos de fabricación de cemento se conocen como proceso seco, húmedo, semiseco y semihúmedo.

El proceso de combustión en el horno tiene el potencial de producir y luego liberar sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. Además, se pueden producir liberaciones en los lugares de almacenamiento.

Un buen diseño de las condiciones del proceso así como la aplicación de medidas primordiales adecuadas deberían permitir que los hornos de cemento que incineran desechos peligrosos funcionen de manera tal que la formación y liberación de sustancias del Anexo C sean lo bastante reducidas para lograr concentraciones de PCDD y PCDF en gases de combustión de <0.1 ng EQT⁻¹/Nm³ (10 % de contenido de oxígeno), dependiendo de factores como el uso de combustibles limpios, alimentación

de desechos, temperatura y eliminación de polvo. Cuando sea necesario, deberían aplicarse medidas secundarias adicionales para reducir las emisiones.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión son <0.1 ng EQT⁻¹/Nm³ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 10 % de O₂ y gas seco.

5.3.4. **Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos**

La quema a cielo abierto es un proceso inaceptable en términos ambientales, que genera sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo y varios otros contaminantes, producto de combustión incompleta; lo más recomendable es aplicar la normatividad vigente en el Paraguay, la Ley 3956/09 de Gestión Integral de Residuos Sólidos que prohíbe la quema bajo esas condiciones, sancionando a los infractores. Así mismo, si se tienen Programas de gestión de residuos, que minimicen la generación y favorezcan esquemas de reciclaje, recuperación y tratamiento, se reducirá la cantidad de material que se elimina por quema a cielo abierto.

Otras técnicas que pueden significar avances con respecto a la quema de materiales son: evitar materiales no combustibles, como vidrio y metales en masa, desechos húmedos y materiales de baja combustibilidad, evitar cargas de desechos con alto contenido de cloro, sean cloruros inorgánicos como la sal, sean compuestos orgánicos clorados como el cloruro de polivinilo (PVC), y evitar materiales que contengan metales catalíticos como cobre, hierro, cromo y aluminio, incluso en cantidades pequeñas. Los materiales por quemar deberían ser secos, homogéneos o bien mezclados, y de baja densidad, como los desechos sin compactar.

Con respecto al proceso de combustión, los objetivos deberían ser: suministrar el aire suficiente, mantener una combustión o tasa de pérdida de masa estable, evitar la combustión lenta, apagando incluso directamente el fuego, y solo hacer fuegos pequeños, bien ventilados, revolviendo los materiales, en lugar de hacerlos en vertederos grandes, mal ventilados o en contenedores.

5.3.5. **Mejores prácticas ambientales (MPA) para prevenir incendios en vertederos**

Los incendios en vertederos de RSU son muy comunes, generando emisiones de gases contaminantes para el ambiente, así como el riesgo para la integridad de las personas que operan el vertedero sobre todo cuando el fuego se propaga de manera incontrolada por acción de los vientos. Debido a que son procesos de combustión incompleta en presencia de residuos plásticos y otros que pueden contener cloro, se presentan las condiciones para la generación de dioxinas y furanos, por lo que es importante evitar en lo posible que se presenten incendios en esos sitios de disposición final. Las fuentes de incendio son diversas, pero básicamente se deben a la combinación de factores tales como:

- La falta de segregación de residuos que llegan al vertedero permite la presencia de residuos combustibles (papeles, envases plásticos varios, envases de aerosoles, cartones, entre otros). También se puede mencionar a un material no combustible pero que por acción del calor puede producir conatos de incendios, como es el vidrio.
- Las condiciones del tiempo. En el país se tienen largas temporadas con temperaturas muy altas y baja humedad relativa ambiente, que favorecen la ignición. El viento norte predominante favorece la propagación de las llamas.

→ La falta de gestión adecuada del vertedero:

- Falta de cobertura diaria de los residuos.
- Falta de control de ingreso de residuos: cantidad y composición.

A continuación, se enlistan las medidas asociadas a la prevención de incendios en vertederos:

Medidas asociadas a la prevención de incendios en vertederos

1. Ejercer controles operacionales en los vertederos, llevándolos a operar con criterios de rellenos sanitarios:
 - Disponer en las celdas solo los residuos orgánicos.
 - Realizar la cobertura diaria de los residuos situados en las celdas.
 - Contar con un plan de vectores que incluya fumigaciones contra insectos y control de roedores.
2. Segregación de residuos combustibles, sean en fuente (lo ideal) o in situ mediante la instalación de infraestructura adecuada (planta de reciclado).
3. Señalización adecuada sobre la prohibición del uso de fuego dentro del vertedero.
4. Supervisión permanente sobre la ausencia de focos de incendios.
5. Habilitar un mecanismo de comunicación permanente a las autoridades y grupos de respuesta a casos de incendios, así como una lista de contactos.
6. Habilitar un medio de transporte de uso permanente, para casos de necesidad de traslados de personas a centros asistenciales de salud, por causas de incendios.
7. Contar con un plan de respuestas para casos de incendios, validado y socializado dentro de la organización.
8. Contar con plano de prevención de incendios aprobados, así como los diferentes artefactos y equipos establecidos en el mencionado plano.
9. Realizar prácticas o simulacros de respuestas ante casos de emergencias vinculadas a los incendios. Registrar eventos de simulacros y realizar las evaluaciones a fin de mejorar las acciones vinculadas.

5.3.6. Prácticas ambientales para prevenir la quema de biomasa

La quema no controlada de pastizales, áreas forestales y zonas agrícolas son una fuente de emisión de contaminantes atmosféricos, incluyendo a las dioxinas y furanos, por lo que a continuación se mencionan algunas prácticas ambientales para prevenir incendios:

Medidas preventivas para evitar la quema de biomasa

1. Prevenir el inicio de fuego en áreas de esparcimiento que contengan pastizales, mediante señalización y concienciación a usuarios.
2. En áreas productivas agrícolas disponer de un Plan de Gestión Ambiental, que aborde el manejo de residuos vegetales y de restos de combustibles, que podrían favorecer la expansión de incendios vegetales.

3. Ejecutar tareas de difusión sobre la importancia de realizar quemas controladas y autorizadas por las instituciones, cuando la misma se encuentre justificada plenamente.
4. Reemplazar la quema de barbechos y restos vegetales en la etapa de preparación del suelo, por la incorporación de residuos orgánicos.
5. Controlar el cumplimiento de la Ley 3956/09 de Gestión Integral de Residuos Sólidos, que entre otras cosas prohíbe la quema.

5. 4. Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA) para la gestión de PFOS

Para un mayor entendimiento de las MTD/MPA para la gestión de PFOS, a continuación, se enlistan:

MTD/MPA para la gestión de PFOS

1. Implementar y adherirse a un sistema de gestión ambiental (SGA) internacionalmente aceptado, como ISO 9001 e ISO 14001.
2. En la etapa de diseño de la planta, considerar el impacto ambiental del eventual desmantelamiento de la unidad.
3. Considerar el desarrollo de tecnologías más limpias.
4. Disponer en todo momento de personal suficiente para el servicio con las cualificaciones requeridas.
5. Educación adecuada de los trabajadores sobre la manipulación, el almacenamiento, el uso y la eliminación de productos químicos y auxiliares, especialmente en el caso de sustancias peligrosas.
6. Capacitación específica sobre procesos y maquinaria para aumentar el nivel de conciencia ambiental.
7. Mantenimiento regular de los equipos técnicos (máquinas en producción, así como dispositivos de reducción y recuperación, como filtros y depuradores); mantenimiento general (por ejemplo, bombas, válvulas, interruptores de nivel).
8. Calibración de equipos de medición y dispensación de productos químicos.
9. El desagüe nunca es un sistema de eliminación adecuado para los productos químicos.
10. Garantizar la provisión de todos los detalles de las actividades realizadas en el lugar, tales como:
 - Descripción de los métodos y procedimientos de tratamiento de residuos en el lugar de instalación.
 - Diagramas de los principales elementos de la planta que tienen alguna relevancia ambiental, junto con diagramas de flujo de proceso (esquemas).
 - Detalles sobre la filosofía del sistema de control y cómo el sistema de control incorpora la información de monitoreo ambiental.

Detalles sobre cómo se proporciona la protección durante condiciones de funcionamiento anormales, como paradas momentáneas, arranques y paradas. Encuesta anual de las actividades realizadas y de los residuos tratados, que contiene un balance trimestral de los flujos de materiales, productos y residuos, incluyendo los materiales auxiliares utilizados para cada centro.

5. 4. 1. **Condiciones de manejo de los PFOS**

Los PFOS no se producen de manera natural, su existencia se origina en la producción antropogénica. Este ciclo considera tanto su producción intencional, como el almacenamiento, transporte, consumo y disposición final. El ciclo de vida de los PFOS va de producción, almacenamiento, transporte, consumo y tratamiento y disposición final. Por sus impactos en la salud, la producción de PFOS se debe realizar con altos estándares de seguridad y el uso de protección personal y sistemas de ventilación adecuados (INECC, 2017).

En Paraguay se reportan existencias de productos con PFOS, tales como: cuero, papel y cartón, productos de limpieza, recubrimientos de pintura, textiles y tapicería. Alfombras sintéticas, dispositivos médicos, tóner y tinta para impresora, espumas contra incendios, aceites de aviación, plaguicidas (sulfloramida), por lo que a continuación, se hace una breve descripción de las condiciones de manejo de esos productos (PNUMA, 2017):

Condiciones de manejo de productos con PFOS

Para el caso de la fabricación de artículos como productos textiles, muebles, ropa, envases de alimentos, entre otros, se tiene un riesgo potencial para la salud humana, ya que la exposición con los PFOS es directa y propicia liberaciones en aguas residuales tanto domésticas como industriales y emisiones al aire por medio del polvo doméstico. Como no se eliminan con alternativas viables de sustitución de PFOS, para todos los productos se recomienda minimizar el uso de estos. En dispositivos médicos los PFOS se encuentran presentes en endoscopios, por lo que se deben recolectar los dispositivos existentes en el mercado. Afortunadamente, existen alternativas técnicamente viables que permiten sustituir a los PFOS en esta aplicación (INECC, 2017).

Las espumas contra incendios con PFOS tienen una vida útil de entre 10 y 20 años o inclusive mayores periodos de tiempo. En su ciclo de vida, el uso es la etapa crítica, ya que produce emisiones elevadas al medio ambiente, afectando no solo al aire sino también cuerpos de agua y extensiones de suelo, según el área que haya sido afectada por los incendios o los lugares donde se lleven a cabo simulacros. Para la etapa de almacenamiento es un lugar crítico donde se pueden encontrar grandes cantidades de estos productos, por ejemplo: centros de entrenamiento de bomberos, aeropuertos, industrias diversas, fuerzas armadas, barcos y transbordadores, etc. (SFT, 2004). Existen alternativas químicas que comienzan a sustituir el uso de los PFOS en las espumas, por lo que se recomienda el desuso y eliminación de productos con PFOS.

Se usa en insecticidas como agente tensoactivo de la sulfonamida de perfluorooctano N-etilo o EtFOSA. Este uso está presente como una exención específica para ciertos cultivos, por lo cual lo que se debe hacer es capacitar a los aplicadores del producto y proveerlos de EPP, disminuyendo los tiempos de exposición y cuidando que no existan personas menores, embarazadas o ancianos que trabajen en contacto con el material.

Toda industria que maneje productos relacionados con PFOS o tenga acceso a su disposición de residuos debe contar con la información completa de datos de seguridad, rotulando cada envase y utilizando contenedores especiales para evitar fugas y derrames. Se debe solicitar a las empresas involucradas con dichos productos la cantidad de PFOS utilizada en sus procesos/productos, aun cuando sus usos estén incluidos en las exenciones dispuestas por la Conferencia de las Partes del Convenio de Estocolmo. No se recomienda el reciclaje, por lo que se deben eliminar los productos impregnados con PFOS. Existen diversas tecnologías para la eliminación de productos con PFOS, dependiendo de la naturaleza y los tipos de residuos como son métodos de adsorción, nanofiltración, osmosis inversa, lavado con disolventes e incineración, entre otros. Las principales alternativas para sustitución de PFOS pueden ser sustancias no fluoradas u otros materiales y tecnologías que aporten propiedades similares dependiendo del uso que se le proporcione (INECC, 2017).

5. 4. 2. **Alternativas del uso del PFOS**

El PFOS se ha utilizado en diversos productos debido a sus propiedades tensioactivas y su resistencia/repelencia superficial al aceite, el agua, la grasa o la suciedad. El PFOS se produce y forma intencionalmente mediante la degradación de un amplio grupo de sustancias relacionadas, conocidas como sustancias relacionadas con el PFOS. Los usos intencionales del PFOS se pueden encontrar en componentes eléctricos y electrónicos, espumas contra incendios, sistemas de imágenes fotográficas, fluidos hidráulicos, cuero, papel y textiles (UNEP, 2020).

La información contenida en esta sección se basa en las Orientaciones del Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes del Convenio de Estocolmo establecida en su sexta reunión (UNEP, 2010).

El PFOS en los artículos sigue siendo, y posiblemente seguirá siendo, un problema para todos los países que importan productos que contienen PFOS, aun cuando el PFOS no sea fabricado ni importado por el país. En esta sección se describe la gama de alternativas de las que se dispone en estos momentos y se explican diversos usos del PFOS para los cuales se han recomendado, presentado o introducido alternativas en el mercado de algunos países.

Estas alternativas no son necesariamente tan idóneas como el PFOS desde el punto de vista técnico ni están exentas de posibles riesgos. A veces, aunque no siempre, hay suficiente información para determinar si son suficientemente seguras. Para que se puedan comercializar, los productos sustitutivos deberán ser más seguros que el PFOS. Una alternativa más segura es aquella que, al ser comparada con el PFOS, o bien reduce la posibilidad de causar daño a la salud humana o al medio ambiente o no se ha demostrado que sea en sí misma un posible contaminante orgánico persistente.

A continuación, se mencionan las principales alternativas de usos de PFOS en Paraguay (Figura 12):

Figura 12. Alternativas de PFOS.

Alternativas de usos de PFOS	
Impregnación y protección superficial de las telas Los productos químicos polifluorados de cadena más corta (PFC) se utilizan ampliamente en la industria textil y por los consumidores para el tratamiento de ropa para todo tiempo, paraguas, bolsos, velas, tiendas de campaña, parasoles, estores, tapicería, cuero, calzado, alfombras, esterillas, moquetas y materiales de ese tipo para impermeabilizarlos del agua, el aceite y el polvo (manchas). El PFOS ha sido sustituido fundamentalmente con análogos de cadenas más cortas y fluorotelómeros, y también con productos químicos no fluorados como las siliconas, entre otros.	 Fuente: https://www.pexels.com/es-es/foto/monton-de-alfombras-de-area-365067/

Alternativas de usos de PFOS**Impregnación de embalajes (papel y cartón)**

Los productos químicos fluorados se utilizan en la industria del papel para producir papel impermeable al agua y al aceite. Para proteger el papel hace falta una concentración de 1,0 % a 1,5 % del producto químico fluorado, basada en el peso seco de las fibras. Los derivados del PFOS se han utilizado en aplicaciones que tienen contacto con alimentos como platos, envases de productos alimenticios, bolsas de palomitas de maíz, cajas para pizzas y papel para envolver y otras aplicaciones como cartones plegables, contenedores, formularios en papel de autocopia y papel de enmascaramiento.

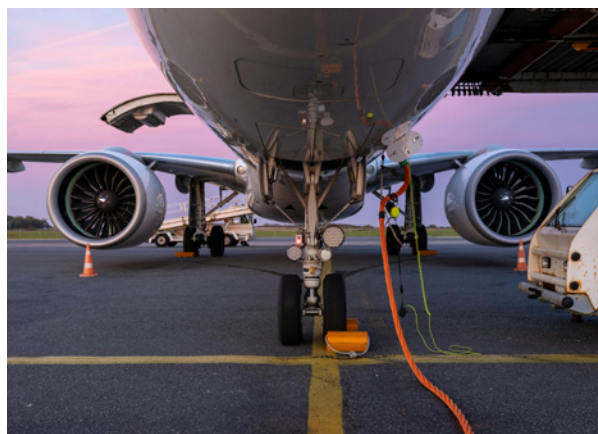
Los surfactantes alternativos conocidos para la impregnación de papel y cartón que se usa en embalajes son sustancias basadas en telómeros de cadena corta, fosfato de polifluoroalquilo, compuestos del tipo de fosfonatos y poli (dimetil siloxano). Los papeles parafinados existen desde antes de que se introdujera en el mercado la tecnología del PFOS, por lo que otras tecnologías obtienen el mismo resultado.



Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/comida-pizza-restaurant-hombre-5953555/>

Fluidos hidráulicos para aviación

Los aceites hidráulicos con contenido de sulfonato de perfluorooctano potásico de cerca del 0,1 % han sido utilizados en la aviación civil y militar desde los años setenta para prevenir la evaporación, los incendios y la corrosión. El mercado mundial total de compuestos fluorados en los fluidos hidráulicos para la aviación se aproxima a 2 toneladas anuales. Hay incertidumbre acerca de las sustancias alternativas en esta esfera. Existen fluidos hidráulicos para aviación sin productos químicos fluorados pero basados en, por ejemplo, ésteres de fosfato, y se pueden utilizar productos químicos fluorados distintos del PFOS. La sal potásica de sulfonato de perfluoroetilciclohexilo (Núm. de CAS 67584-42-3) no es una sustancia relacionada con el PFOS, y se ha utilizado en aceites hidráulicos en lugar del PFOS.



Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/mantenimiento-de-aviones-comerciales-al-atardecer-28513293/>

Espumas ignífugas

Las espumas ignífugas con surfactantes fluorados son muy eficaces para extinguir incendios de combustible líquido en los aeropuertos y las refinerías de petróleo, así como en almacenes. Actualmente, la mayoría de las espumas ignífugas se fabrican no solo con PFOS sino con telómeros fluoroquímicos a base de una cadena de perfluorohexano (C6). Las alternativas del uso de fluorosurfactantes que contienen PFOS en las espumas ignífugas son:

- a. Fluorosurfactantes que no contienen PFOS de cadena más corta.
- b. Volver a la tecnología que antes se utilizaba y que empleaba espumas ignífugas sin flúor.



Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/entrenamiento-de-bomberos-con-espuma-en-escena-de-accion-29103459/>

Evaluación económica de las alternativas a los PFOS

Las opciones para sustituir a los PFOS con sustancias más amigables con el medio ambiente presentan costos similares, pero son más costosas. En la Tabla 26 se ofrecen algunos ejemplos de precios para productos químicos de laboratorio. Los costos se representan en euro por cada 100 gramos, por lo que es posible que los precios del producto a granel sean inferiores.

Tabla 26. Precios de determinados productos químicos polifluorados básicos de laboratorio.

Producto químico	N.º CAS	Peso molecular	Precio en € por 100 g
Sulfonilfluoruro de perfluorobutano (PFBSF)	375-72-4	303,09	136
Sulfonato de perfluorobutano (PFBS)	59933-66-3	300,10	1.800
Sulfonato de perfluorooctano (PFOS)	1763-23-1	500,13	1.122
Sulfonilfluoruro de perfluorooctano (PFOSF)	307-35-7	502,12	92
Fluorotelómero 6:2 alcohol	647-42-7	364,10	130
Fluorotelómero 8:2 alcohol	678-39-7	464,12	187
Fluorotelómero 10:2 alcohol	865-86-1	564,14	1.440
Éter de metilnonafluorobutilo	163702-07-6	250,06	745

Fuente: Secretaría del Convenio de Estocolmo (2011).

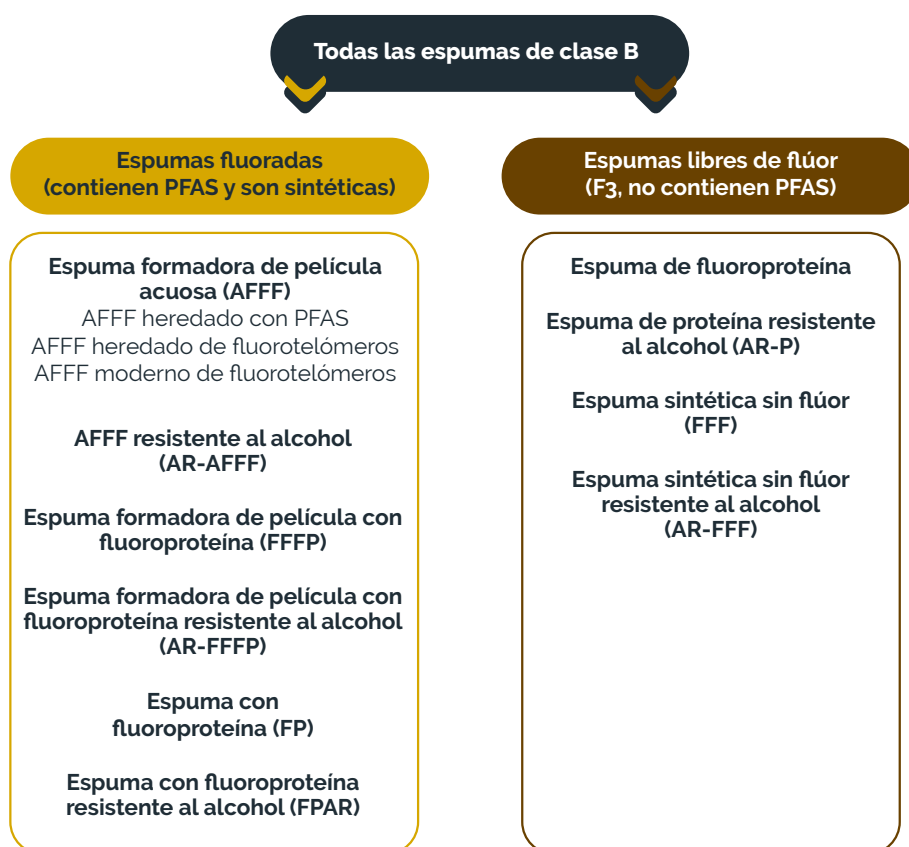
Especialmente al principio, las alternativas podrían ser más costosas al adquirirlas o utilizarlas; sin embargo, este posible aumento del costo a corto plazo podría ser un efecto colateral aceptable de la eliminación de un producto químico muy peligroso y persistente. Los precios de los sustitutos disminuirán a la larga con el crecimiento del mercado y el aumento de la competencia.

La necesidad o el "bien público" del uso podría ser también un factor al determinar si debería continuar o eliminarse en caso de no existir alternativas evidentemente buenas. Claro que el PFOS tiene aplicaciones útiles, pero para todas ellas hay alternativas viables.

5. 4. 3. Mejores Prácticas Ambientales (MPA) para la gestión de espumas contra incendios

De acuerdo con ITRC (2023), la espuma formadora de película acuosa (AFFF por sus siglas en inglés) es un agente contra incendios muy eficaz que se usa para extinguir incendios de líquidos inflamables. Los productos AFFF se sintetizan combinando espumas hidrocarburos con surfactantes fluorados; el producto se ha usado en instalaciones militares, aeropuertos civiles, refinerías de petróleo, instalaciones de almacenamiento y plantas productoras de químicos en los Estados Unidos.

Las espumas contra incendios de clase B son soluciones de surfactantes comerciales que están diseñadas y utilizadas para extinguir incendios de combustibles inflamables de clase B. No son iguales todas las espumas de clase B. Aunque del punto de vista del combate al incendio no se categorizan de esta manera, generalmente se pueden dividir en dos categorías generales desde la perspectiva de las sustancias polifluoroalquiladas (PFAS): las espumas fluoradas que contienen PFAS y espumas sin flúor (F3) que no contienen PFAS. Figura 13.

Figura 13. Tipos de Espumas Clase B.

Fuente: ITRC (2023).

La AFFF se considera una espuma fluorada, y cuando se mezcla con agua, la solución logra características de la tensión interfacial necesarias para producir una película acuosa que se extiende por la superficie de combustibles de hidrocarburo (grasas de petróleo, alquitranes, aceites y gasolinas; y solventes y alcoholes) para extinguir el fuego y formar una barrera de vapor entre el combustible y el oxígeno atmosférico para evitar que se vuelva a encender. La característica que define la AFFF es la formación de la película acuosa (ITRC, 2023).

Las mejores prácticas de gestión (BPM por sus siglas en inglés) deben considerar el ciclo de vida entero de la AFFF, incluyendo la adquisición e inventario, los sistemas y operaciones de espuma, la operación de la supresión de incendios, acciones inmediatas de investigación y limpieza, tratamiento y eliminación y reemplazo del sistema. Se debe considerar la adquisición e inventario de las espumas cuidadosamente. Se deben seleccionar espumas que cumplan con la especificación de rendimiento requerido por los reguladores. Las espumas adquiridas deben ser documentadas, etiquetadas claramente y contenidas adecuadamente. El uso y eliminación de las espumas debe ser rastreado y registrado cuidadosamente. Figura 14.

Figura 14. Consideraciones del ciclo de vida de las espumas tipo AFFF.

Fuente: ITRC (2023).

El tratamiento y la eliminación de los productos AFFF y medios ambientales contaminados por las PFAS pueden ser complejos, lentos y costosos. Además, actualmente las opciones de eliminación para materiales contaminados por los productos AFFF y las PFAS son limitadas.

El reemplazo de la espuma contra incendios es complejo y podría requerir una revisión del sistema y, potencialmente, el rediseño y modificación de los componentes del sistema para cumplir con los nuevos objetivos o requisitos de material y rendimiento. El reemplazo de la espuma debe incluir una evaluación de los peligros y objetivos de aplicación específicos, una revisión de los estándares de desempeño, una comprensión de los requisitos de ingeniería para el almacenamiento y aplicación de productos de espuma, y una revisión para asegurar que el producto de espuma está aprobado para usar contra los peligros específicos que se están mitigando.

Por otro lado, la Coalición de Espuma contra Incendios publicó una guía de mejores prácticas para el uso de espumas contra incendios de Clase B. Los puntos clave que representan MPA son:

MPA para el uso de espumas contra incendios de clase B

- Espumas de entrenamiento: Utilice espumas que no contengan tensioactivos fluorados.
- Pruebas y puesta en marcha de sistemas fijos y sistemas de distribución de vehículos: Utilice métodos de prueba de líquidos sustitutos que no contengan tensioactivos fluorados.
- Proporcionar contención, tratamiento y eliminación adecuada de cualquier solución de espuma: No se libere directamente al medio ambiente.
- Desarrollar planes de escorrentía de aguas contra incendios.
- Recoger y contener la escorrentía de agua de fuego.
- Tratar la escorrentía de agua refractaria con una combinación de coagulación, floculación, electrofloculación, ósmosis inversa y adsorción en carbón activado e incinerar el carbón activado o incinerar la escorrentía de agua contra incendios en el equipo adecuado.
- Eliminación de espumógeno de clase B: Envío para su destrucción térmica (incineración a alta temperatura) a una instalación autorizada para la manipulación de residuos halogenados o equivalentes.

5. 4. 4. **Mejores Prácticas Ambientales (MPA) en el manejo de aceites de aviación**

Algunas mejores prácticas para el manejo de aceites de aviación son:

MPA para el manejo de aceites de aviación

Medidas preventivas:

- Almacenar de manera adecuada los tambores y otros recipientes que contengan aceites de aviación.
- Área específica asignada, señalizada, de acceso restringido.
- Piso impermeable con contenedor de derrames.
- Señalización sobre medidas preventivas y de seguridad según los tipos de eventos que podrían desencadenarse.
- Disponer de las Fichas Técnicas y de Seguridad de cada sustancia.
- Tener en consideración la norma de compatibilidad química para casos de eventual almacenamiento conjunto con otras sustancias.
- Disponer y mantener medidas de detección y combate de incendios en condiciones apropiadas, según las normas vigentes.
- Disponer de material absorbente para casos de derrames y salpicaduras.
- Disponer de equipos de protección individual en el área de almacenamiento.
- Capacitación periódica al personal operativo en: Riesgos asociados al manipuleo de sustancias químicas, Buenas prácticas operativas, Prevención y combate de incendios.

Medidas correctivas:

- Colectar de manera segregada los restos que resulten de absorber derrames y salpicaduras, luego manejarlos como residuos peligrosos.
- Colectar los restos de aceites removidos de las aeronaves en recipientes apropiados, en condiciones de estanqueidad, con tapas y señalizados.

Disponer los aceites usados para usos permitidos y habilitados por el MADES. Mantener registros de eventos de disposición de estos restos.

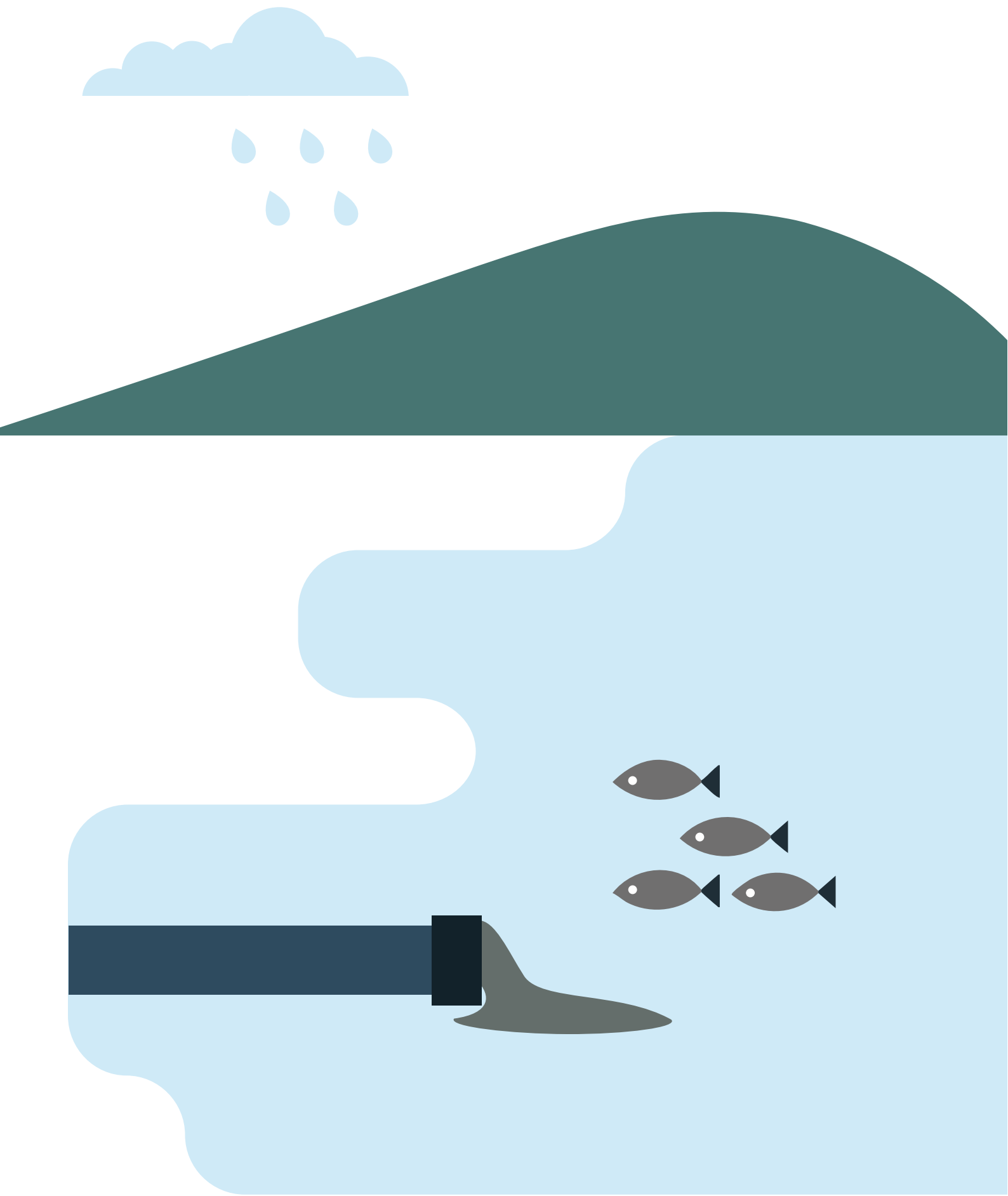
Notas

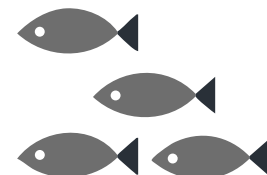
Notas

Notas

Notas

Notas





6. Directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional (GAR) de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos

6.1. **Ámbito de aplicación**

El anexo D del Convenio de Minamata establece las principales fuentes de emisión de mercurio. En Paraguay se reportan, de acuerdo con la Evaluación Inicial del Convenio de Minamata (PNUMA, 2019), las siguientes:

- La producción de cemento y cal.
- Plantas de incineración de residuos.
- Productos de consumo con uso intencional de mercurio, como termómetros con mercurio, interruptores eléctricos y electrónicos, contactos y relés con mercurio, fuentes de luz con mercurio, pilas que contienen mercurio, empastes de amalgamas dentales, manómetros y medidores, productos químicos y equipos de laboratorio.
- Depósito/vertido de desechos y tratamiento de aguas residuales.

Con base en dicha información se orientará la descripción de directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos, a este tipo de fuentes.

La descripción de la información contenida en este capítulo se desarrolla tomando como referencia los documentos "Directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales" (PNUMA, 2019) y "Liberaciones de mercurio: aprobación de las orientaciones sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las liberaciones procedentes de las fuentes pertinentes (artículo 9)" (PNUMA, 2023).

Los residuos de mercurio que son objeto de las directrices técnicas son (Convenio de Basilea, 2022):

- **A.** Desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio (por ejemplo, excedentes de mercurio procedentes del desmantelamiento de plantas de cloro-álcali, el mercurio recuperado de desechos que contienen mercurio o compuestos o desechos de mercurio contaminados con mercurio o compuestos de mercurio, o existencias sobrantes de mercurio designadas como desecho);

- **B.** Desechos que contienen mercurio o compuestos de mercurio con las siguientes subcategorías:
 - **B1:** Desechos de productos que contengan mercurio o compuestos de mercurio que liberen fácilmente el mercurio al medio ambiente, incluso cuando se rompen (por ejemplo, termómetros de mercurio, lámparas fluorescentes);
 - **B2:** Desechos de productos que contengan mercurio o compuestos de mercurio distintos de los mencionados en B1 (por ejemplo, las pilas); y
- **C.** Desechos contaminados con mercurio o compuestos de mercurio (es decir, residuos generados por procesos de extracción de minerales, procesos industriales o procesos de tratamiento de desechos).

6. 2. Prevención y reducción al mínimo de los residuos de procesos

Se resalta que, para efectos de este manual, solo se indicarán las directrices vinculadas a los residuos que fueron identificados en el Inventario Nacional de emisiones y liberaciones de mercurio. (CCCB-CRCE, 2017). Tampoco fue tomada en cuenta la corriente de residuos provenientes de la Minería Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE).

De acuerdo con el Convenio de Minamata, cuando se desarrolle una estrategia o plan para reducir o controlar las liberaciones de Hg al ambiente, se deben considerar una o varias medidas de las siguientes, según corresponda:

- a. Valores límite de liberación para controlar y, cuando sea viable, reducir las liberaciones procedentes de las fuentes pertinentes;
- b. El uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las liberaciones procedentes de las fuentes pertinentes;
- c. Una estrategia de control de múltiples contaminantes que aporte beneficios paralelos para el control de las liberaciones de mercurio;
- d. Otras medidas encaminadas a reducir las liberaciones procedentes de las fuentes pertinentes.

Mejores técnicas disponibles

En la selección de las mejores técnicas disponibles, que deben ser técnica y económicamente realizables, se debe tener en cuenta una serie de factores, entre ellos:

- Antigüedad de los equipos e instalaciones
- Procesos empleados
- Cambios en los procesos
- Efectos ambientales distintos de la calidad del agua
- Costo de aplicación de las técnicas

El proceso de selección y aplicación de las mejores técnicas disponibles puede englobar los siguientes pasos generales (PNUMA, 2023):

- **Etapas 1:** Reunión de información sobre la fuente o categoría de fuentes. Esto puede incluir, entre otras cosas, información sobre los procesos, insumos, materias primas o combustibles conexos y sobre el nivel de actividad real o previsto, incluida la productividad. Otra información pertinente podría ser

la vida útil prevista de la instalación, que probablemente será de especial relevancia cuando se considere una instalación existente, y cualquier requisito o plan relacionado con el control de otros contaminantes.

- **Etapa 2:** Determinación de toda la gama de opciones para la prevención de las liberaciones de mercurio en las aguas residuales o para su eliminación de estas y de las combinaciones de esas técnicas en función de su pertinencia para la fuente de que se trate.
- **Etapa 3:** Determinación de las opciones de control técnicamente viables, teniendo en cuenta las técnicas aplicables al tipo concreto de instalación dentro del sector y las limitaciones físicas u operacionales que puedan influir en la elección de la técnica.
- **Etapa 4:** Selección, entre las técnicas identificadas en la etapa 3, de las técnicas de control más eficaces para la eliminación y, cuando sea factible, la reducción de las liberaciones de mercurio, teniendo en cuenta los niveles de rendimiento mencionados en las presentes orientaciones, y para el logro de un nivel general elevado de protección de la salud humana y del medio ambiente.
- **Etapa 5:** Determinación de las técnicas que pueden aplicarse en condiciones económica y técnicamente viables, teniendo en cuenta los costos y beneficios y si las técnicas son accesibles para el operador de la instalación.

Mejores prácticas ambientales (PNUMA, 2023)

Por "mejores prácticas ambientales" se entiende la aplicación de la combinación más adecuada de medidas y estrategias de control ambiental.

1. Mantenimiento adecuado de las instalaciones y los equipos de medición
2. Operarios capacitados y calificados
3. Una planificación cuidadosa y el compromiso e involucramiento de todos los niveles de la organización

El establecimiento y funcionamiento de un sistema de gestión ambiental es una buena práctica que contribuye al control de las liberaciones. Un sistema de gestión ambiental es un enfoque estructurado para gestionar los aspectos ambientales de una operación, que engloba, por lo general, lo siguiente:

- Examinar los objetivos ambientales de la empresa.
- Analizar los riesgos ambientales, el impacto ambiental de la empresa y los requisitos jurídicos correspondientes.
- Fijar objetivos y metas ambientales para reducir el impacto ambiental y garantizar el cumplimiento de los requisitos jurídicos.
- Establecer programas para alcanzar esos objetivos y metas.
- Vigilar y medir los progresos realizados en la consecución de los objetivos.
- Fomentar la conciencia ambiental de los empleados, su conocimiento de la legislación ambiental nacional y su competencia.
- Cumplir con los criterios ASG (ambientales, sociales y de gobernanza).
- Revisar el funcionamiento del sistema y mejorarlo continuamente.

6.2.1. Técnicas para el control de las liberaciones de mercurio

La mayoría de las técnicas para controlar las liberaciones de mercurio al suelo y al agua están relacionadas con la eliminación del mercurio de las aguas residuales, donde el mercurio está disuelto en las aguas servidas, adsorbido en partículas en suspensión o presente dentro de la matriz mineral de las partículas en suspensión (PNUMA, 2023), las cuales se describen a continuación:

Eliminación del contenido sólido. Cuando el contenido de mercurio está presente en la matriz mineral de las partículas en suspensión, se requieren técnicas de separación que eviten su movilización o liberación. Las técnicas adecuadas de separación o clarificación incluyen: separación por gravedad (separación de arenas, sedimentación), coagulación y floculación, flotación, separación centrífuga, filtración.

Precipitación de metales. La precipitación es un proceso que forma materia particulada insoluble (precipitado sólido) en el agua, a lo que sigue un proceso adicional de separación de esas partículas en suspensión del agua. Los sistemas que utilizan la precipitación suelen requerir operarios cualificados, lo que significa que esta tecnología es más eficaz en función de los costos cuando se lleva a cabo a gran escala, de modo que los costos de mano de obra puedan repartirse entre una mayor cantidad de agua depurada. Puede complementarse con otras técnicas de tratamiento para mejorar su eficacia. Los mejores rendimientos se obtienen con una combinación de precipitación con filtración, coprecipitación y adsorción. La precipitación suele implicar el ajuste del pH y la adición de un precipitante químico o coagulante para transformar los metales solubles y los contaminantes inorgánicos en metales insolubles y sales inorgánicas.

Recuperación de mercurio por reducción y coalescencia. Como pretratamiento, antes de técnicas como la adsorción en carbón activado, pueden utilizarse agentes reductores como la hidroxilamina para convertir totalmente el mercurio iónico a su forma elemental. Posteriormente, puede eliminarse por coalescencia y recuperarse el mercurio metálico.

Intercambio iónico. El intercambio iónico es la eliminación de los componentes iónicos no deseados o peligrosos de las aguas residuales y su sustitución por iones más aceptables a partir de una resina intercambiadora de iones, en la que se retienen temporalmente y luego se liberan en un líquido de regeneración o retrolavado. Para ser eliminado por intercambio iónico, el mercurio debe oxidarse primero al catión mercúrico (Hg_2^{2+}) con agentes oxidantes como el hipoclorito, el cloro o el peróxido de hidrógeno.

Adsorción. La adsorción se ha utilizado para eliminar el mercurio inorgánico de las aguas subterráneas y residuales. Puede ser un método de tratamiento primario, pero a menudo se utiliza para eliminar el mercurio que queda en la corriente de desechos después de un proceso de tratamiento primario. La adsorción tiende a utilizarse más a menudo cuando el mercurio es el único contaminante por tratar, para sistemas con una capacidad relativamente menor y como tecnología de pulido para el efluente de sistemas más grandes.

Carbón activado. El carbón activado, una sustancia carbonosa muy porosa, suele utilizarse para eliminar materiales orgánicos de las aguas residuales, pero también tiene aplicaciones en la eliminación de mercurio y metales preciosos. Por ejemplo, el carbón activado granular tiene un amplio rango de eficacia y no está restringido a compuestos polares o no polares. Como pretratamiento, pueden utilizarse agentes reductores como la hidroxilamina para convertir totalmente el mercurio iónico en mercurio en su forma elemental para su posterior eliminación por coalescencia y la recuperación del mercurio metálico, seguida de la adsorción en carbón activado.

Resinas quelantes. Las resinas quelantes son resinas que contienen grupos orgánicos que forman quelatos (complejos) con iones de metales específicos. Se utilizan para eliminar metales pesados tóxicos como el mercurio, el cobre, el zinc y el cadmio y para recuperar metales preciosos y valiosos como el oro, el platino y el paladio. Las resinas quelantes solo adsorben los iones de mercurio disueltos en el agua. El mercurio que no está en forma iónica, como el que está en forma de mercurio metálico, necesita ser ionizado por medio de un agente oxidante y disuelto en agua para ser adsorbido por las resinas quelantes.

Tratamiento biológico. La reducción biológica de los contaminantes orgánicos implica el metabolismo por microorganismos, a diferencia de los tratamientos químicos, para realizar reacciones redox. Aunque el mercurio es un contaminante inorgánico, el tratamiento biológico puede utilizarse para convertir los peligrosos compuestos solubles de mercurio de las aguas residuales en formas menos solubles que luego pueden eliminarse mediante otras técnicas, como la adsorción o la precipitación. Esta técnica reduce las especies oxidadas de mercurio a mercurio elemental utilizando el metabolismo microbiano en condiciones anóxicas o anaeróbicas. El tratamiento biológico suele llevarse a cabo en biorreactores de película fija que utilizan carbón activado como soporte para las aguas residuales generadas por los sistemas de reducción de emisiones por vía húmeda de las grandes instalaciones de combustión. El tratamiento biológico anóxico/anaeróbico para la eliminación del mercurio se utiliza en combinación con otras técnicas, como la adsorción en carbón activado.

Filtración por membrana. La filtración por membrana puede eliminar una amplia gama de contaminantes del agua. Esta tecnología se ha utilizado en un número limitado de aplicaciones a escala real para tratar aguas residuales contaminadas con mercurio. Antes de la filtración por membrana, se puede utilizar una etapa de pretratamiento para hacer que el mercurio forme precipitados o coprecipitados que puedan ser eliminados más eficazmente por esta tecnología. La filtración por membrana es eficaz para el tratamiento del mercurio, pero se utiliza con menos frecuencia porque tiende a costar más y a producir un mayor volumen de residuos que otras tecnologías de tratamiento del mercurio.

6. 2. 2. Técnicas para fuentes específicas de liberación

Liberaciones procedentes de los sistemas de control de la contaminación del aire

Entre los sistemas de control de la contaminación del aire que se utilizan en las instalaciones de la lista de fuentes puntuales potencialmente pertinentes se encuentran (Figura 15):

Figura 15. Sistemas de control de la contaminación del aire.



Precipitadores electrostáticos. Los precipitadores electrostáticos utilizan fuerzas electrostáticas para separar las partículas de polvo de los gases de escape. Los gases cargados de polvo fluyen a través del pasaje formado por los electrodos de descarga y captación. Las partículas en suspensión en el aire reciben una carga negativa a medida que pasan a través del campo ionizado entre los electrodos. Estas partículas cargadas son atraídas hacia un electrodo conectado a tierra o cargado positivamente y se adhieren a este. El material captado en los electrodos se elimina sacudiendo o vibrando los electrodos captadores, ya sea continuamente o a intervalos predeterminados. Generalmente los precipitadores pueden limpiarse sin interrumpir el flujo de aire. (PNUMA, 2019).

Filtros de tela. Los filtros de bolsa (filtros de tela, filtros textiles) utilizan la filtración para separar el polvo en suspensión de los gases. Representan uno de los tipos más eficientes y eficaces en función de los costos de los dispositivos captadores de polvo disponibles y pueden lograr una eficiencia de captación superior a 99,99 % para materiales particulados muy finos. Los gases entran en el dispositivo filtrante y pasan a través de las bolsas textiles. Las bolsas pueden estar hechas de diferentes materiales (por ejemplo, algodón tejido o fieltro, material sintético o de fibra de vidrio) según las propiedades de los gases de combustión. El mercurio gaseoso principalmente pasará a través de un filtro de bolsa. Por consiguiente, para aumentar la eficiencia del proceso, en la medida de lo posible el mercurio gaseoso debe convertirse a su forma oxidada, la cual puede unirse a las partículas. La eficiencia del filtro de bolsa puede aumentarse de diferentes maneras; por ejemplo, uniéndola a una inyección de absorbente seco o semiseco (deshidratación por aspersión), y proporcionando filtración adicional y una superficie reactiva sobre la torta de filtración (PNUMA, 2019).

Depuradores de partículas en suspensión por vía húmeda. Se emplean dos tipos diferentes de depuradores húmedos, uno principalmente para desempolvar y el otro para eliminar compuestos gaseosos ácidos. En los depuradores húmedos para limpiar de polvo, el líquido depurador (generalmente agua) entra en contacto con una corriente de gas que contiene partículas de polvo. El contacto vigoroso del gas y las corrientes líquidas genera una elevada eficiencia de eliminación del polvo. La humidificación produce la aglomeración de partículas finas, lo cual facilita su captación. Entre los ejemplos de esos depuradores figuran los depuradores Venturi, los depuradores Theissen o los depuradores de flujo radial. La eficiencia de eliminación del polvo de esas unidades puede ser superior a 98 %, pero la concentración final del polvo es relativamente alta (más de 5 mg/Nm³).

Los depuradores húmedos dedicados principalmente a la eliminación de compuestos gaseosos ácidos (frecuentemente del tipo de torre de aspersión) eliminan contaminantes como el dióxido de azufre, el cloruro de hidrógeno y el ácido clorhídrico. Se emplea una solución para absorber los compuestos. Generalmente limpian el gas que previamente ha sido desempolvado. Normalmente los gases "limpios" expelidos por ambos tipos de depuradores pasan a través de un eliminador de neblina para eliminar las gotas de agua de la corriente de gas. El agua que sale del sistema depurador se limpia y descarga, o se recicla de vuelta al depurador. La absorción del mercurio elemental se puede mejorar agregando a la solución del depurador compuestos de azufre o carbón activado (Miller et al., 2014).

En la Tabla 27 se señala la eficacia de los dispositivos de eliminación del polvo.

Tabla 27. Eficacia de los dispositivos de eliminación del polvo expresada en concentraciones medias de polvo por hora.

Concentraciones de polvo tras la eliminación	
Filtros textiles	1 a 5
Precipitadores electrostáticos secos	1
Precipitadores electrostáticos húmedos	5 a 15
Depuradores de polvo de alta eficiencia	20

Fuente: PNUMA, 2019. Directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales.

6. 3. Mejores técnicas disponibles (MTD) para fuentes de liberación de mercurio

6. 3. 1. Procesamiento de petróleo crudo y gas natural

El petróleo crudo y el gas natural se componen principalmente de hidrocarburos. También contienen una amplia gama de elementos, incluido el mercurio, en concentraciones variables según el yacimiento, la fase de procesamiento y el modo en que se utilizan. El mercurio, en sus formas químicas, está presente en el petróleo crudo y el gas natural en bajas concentraciones, entre 0,1 y 20.000 partes por mil millones en el petróleo crudo y entre 0,05 y 5.000 microgramos por metro cúbico normal en el gas natural.

Como componente natural del petróleo crudo y el gas natural, el mercurio es perjudicial para los sistemas de procesamiento del petróleo. En el procesamiento de gases, el mercurio puede contaminar y dañar equipos como los intercambiadores de calor criogénicos. En la fabricación y el refinado de productos químicos, puede envenenar determinados catalizadores, contaminar los productos químicos de proceso (como el trietilenglicol, que puede reutilizarse en procesos de gas) y entrar en las aguas residuales (PNUMA, 2023).

La eliminación del mercurio recogido por un sistema de eliminación de mercurio (desechos de mercurio) varía en función del tipo de sistema utilizado. Los medios más utilizados para las unidades de eliminación de mercurio son los sulfuros metálicos sobre un material de soporte inerte (por ejemplo, alúmina) o carbón impregnado de azufre, que pueden considerarse sorbentes no regenerativos. El adsorbente usado debe eliminarse de forma ambientalmente racional y, por tanto, si los residuos se queman, el mercurio debe condensarse, capturarse y eliminarse (PNUMA, 2023).

6. 3. 2. Mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos

Introducción a la técnica general de incineración (PNUMA, 2019)

La incineración se emplea como tratamiento para un conjunto muy diverso de residuos. Su objetivo es tratar los residuos a fin de reducir su volumen y el peligro que representan y, al mismo tiempo, captar (y, por ende, concentrar) o destruir sustancias potencialmente peligrosas que son, o pueden ser, liberadas durante el proceso. En la actualidad es común que se lleve a cabo la incineración con recuperación de energía y se le conoce como termovalorización.

Los incineradores vienen con diversos tipos y tamaños de horno y combinaciones de tratamiento previo y posterior a la combustión. También hay una gran coincidencia

entre los diseños de preferencia para la incineración de desechos municipales sólidos, desechos peligrosos y fangos cloacales.

Los incineradores se suelen diseñar para la combustión oxidativa completa con rangos de temperatura de entre 850 °C y 1200 °C, que pueden incluir temperaturas en las que ocurren también la calcinación y la fusión. La gasificación y la pirólisis representan tratamientos térmicos alternativos que restringen la cantidad de aire de combustión primaria necesario para convertir los residuos en gases de proceso, que pueden usarse como materia prima química o incinerarse con recuperación de energía. Sin embargo, comparados con la incineración, estos sistemas se usan relativamente muy poco y se ha informado de dificultades en el funcionamiento en algunas instalaciones.

Las instalaciones se caracterizan con las siguientes funciones:

- suministro,
- almacenamiento,
- tratamiento previo e incineración de desechos,
- recuperación de energía,
- depuración de los gases de combustión,
- tratamiento de los residuos sólidos y tratamiento de las aguas residuales.

Los residuos son, por regla general, un material sumamente heterogéneo, que consiste en lo esencial en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante la incineración, se crean gases de combustión que contendrán la mayor parte de la energía combustible disponible en forma de calor. En la incineración totalmente oxidativa, los gases de combustión están constituidos principalmente por vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Según la composición del material incinerado, las condiciones de funcionamiento y el sistema de depuración de los gases de combustión instalado, se emiten gases ácidos (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cloruro de hidrógeno), partículas (incluidas las que han hecho enlace con metales) y metales volátiles, junto con una amplia variedad de compuestos orgánicos volátiles.

También se ha demostrado que la incineración de desechos municipales sólidos y desechos peligrosos es uno de los principales emisores potenciales de mercurio. Las emisiones pueden ser considerablemente elevadas cuando los insumos de las posibles fuentes (desechos que contienen mercurio, p. ej., en productos, residuos de madera tratados) no se controlan o eliminan antes de la incineración. Cabe señalar la presencia de mercurio en los gases de combustión en la forma de mercurio elemental, oxidado y en partículas. El mercurio presente en forma de óxido, fundamentalmente como cloruro de mercurio (II) en los gases de combustión de los incineradores, por regla general, es más fácil de eliminar que el mercurio elemental.

Según las temperaturas de combustión durante las principales etapas de incineración, los metales volátiles y los compuestos inorgánicos (p. ej., las sales) se evaporan total o parcialmente. Estas sustancias se transfieren de los desechos de entrada tanto a los gases de combustión como a las cenizas volátiles que contienen. Se crean cenizas volátiles (polvo) y cenizas sólidas más pesadas (cenizas de fondo). Las proporciones de residuos sólidos varían mucho según el tipo de desecho y el diseño pormenorizado del proceso. Otras liberaciones son residuos del tratamiento y depuración final de los gases de combustión, la torta del filtro resultante del tratamiento de las aguas residuales, las sales y las liberaciones de sustancias a las aguas residuales.

Al considerar las mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos, es importante tener en cuenta que la solución óptima para un tipo específico de

incinerador varía según las condiciones locales. Las técnicas que se recomiendan aquí no constituyen una lista que indique la mejor solución local, porque ello requeriría la consideración de las condiciones locales hasta un grado que no se puede explicar en un documento que trata sobre las mejores técnicas disponibles en general. De ahí que la simple combinación de los distintos elementos que se califican en esta sección como mejores técnicas disponibles, sin tomar en consideración las condiciones locales, probablemente no sea una solución local optimizada a los efectos del medio ambiente en su conjunto (Comisión Europea, 2019).

Con una combinación adecuada de las medidas primarias y secundarias relacionadas con las mejores técnicas disponibles, se ha informado de niveles de emisión de mercurio inferiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (a 11 % de O_2) (Daschner et al., 2011). Se hace notar además que, en condiciones de funcionamiento normales, se pueden lograr emisiones por debajo de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una planta de incineración bien diseñada.

Comportamiento del mercurio durante el proceso de incineración (PNUMA, 2019)

Debido a la inestabilidad termoquímica de los compuestos de mercurio a temperaturas que rebasen los 700°C a 800°C , solo existe mercurio elemental, lo que significa que, dentro de la cámara de combustión de un incinerador de desechos, el mercurio está presente solo en su forma elemental. El mercurio es muy volátil y, por tanto, está presente casi exclusivamente en la etapa de vapor de los gases de combustión. A su paso por la sección de recuperación del calor, los gases de combustión se enfrían y el mercurio elemental reacciona según la presencia de otros componentes que sean gases de combustión, la temperatura y la composición de las cenizas para oxidar el mercurio. Los compuestos de mercurio oxidado suelen ser inestables en los gases de combustión y en determinadas condiciones atmosféricas.

En determinadas circunstancias, el mercurio elemental se puede oxidar. El grado de conversión depende de la temperatura, el tiempo de residencia, las cenizas, el carbón sin utilizar, y la presencia de especies de fase gaseosa, en particular cloro o SO_2 . La distribución de mercurio elemental y mercurio oxidado en la forma de cloruro de mercurio (II) depende con mucho de la cantidad de HCl en los gases de combustión. La proporción de mercurio oxidado y mercurio total tiende a aumentar con el aumento de la concentración de cloruro de hidrógeno. Debido al contenido de ácido clorhídrico (HCl) más bajo en las plantas de incineración de fangos cloacales, el porcentaje de mercurio elemental es mucho mayor.

Condiciones generales aplicables a las técnicas de combustión

Para lograr una combustión óptima, es importante tomar en consideración las siguientes condiciones (PNUMA, 2019):

- Garantizar que el diseño del horno corresponda debidamente a las características de los desechos que se van a procesar.
- Mantener a niveles óptimos las temperaturas de las zonas de combustión en la etapa gaseosa para completar la oxidación de los desechos (por ejemplo, 850°C a 950°C en los incineradores de desechos municipales sólidos de parrilla, 1100°C a 1200°C cuando los desechos tengan un alto contenido de cloro).
- Prever un tiempo de residencia suficiente (p. ej., por lo menos dos segundos) y una mezcla turbulenta en las cámaras de combustión para completar la incineración.

- Precalentar el aire primario y secundario para ayudar a la combustión, de ser necesario.
- Usar un procesamiento continuo y no por tandas, siempre que sea posible, para minimizar las liberaciones en la puesta en marcha y las paradas.
- Establecer sistemas para monitorizar los parámetros críticos de combustión, como temperatura, caída de presión, niveles de CO y O₂ y, si procede, la velocidad de la parrilla.
- Prever intervenciones de control para ajustar la alimentación de los desechos, la velocidad de la parrilla y la temperatura, el volumen y la distribución del aire primario y secundario.
- Instalar quemadores auxiliares automáticos para mantener temperaturas óptimas en las cámaras de combustión.
- Usar aire de los búnkeres o las instalaciones de almacenamiento como aire de combustión.
- Instalar un sistema que automáticamente detenga el suministro de desechos, cuando los parámetros de combustión no sean los apropiados.

Técnicas de incineración de los desechos municipales sólidos (PNUMA, 2019)

Aunque en el país no se realiza la incineración de los desechos municipales, a continuación, se presentan consideraciones específicas que deberían considerarse, en la incineración de los desechos municipales sólidos:

- Se ha demostrado con creces la capacidad de los incineradores de combustión en masa (de parrilla móvil) en la combustión de desechos municipales sólidos y ya llevan muchos años funcionando.
- Los incineradores de parrilla enfriados por agua tienen la ventaja añadida de un mejor control de la combustión y la capacidad de procesar desechos municipales sólidos con un contenido calorífico más alto.
- Los hornos rotatorios con parrillas pueden admitir desechos municipales sólidos heterogéneos, pero su rendimiento es menor que el de los hornos de combustión en masa o los hornos de parrilla móvil.
- Los hornos de parrilla estática con sistemas de transporte (por ejemplo, pistones) tienen menos partes móviles, pero los desechos requieren más tratamiento previo (es decir, trituración, separación).
- Los diseños modulares con cámaras de combustión secundarias se usan en general para aplicaciones más pequeñas. Según su tamaño, algunas de estas unidades tal vez necesiten funcionar por tandas.
- Los hornos de lecho fluidizado y los hornos con cargador o esparcidor se usan mucho para desechos consistentes, finamente divididos, como el combustible derivado de desperdicios.

Técnicas de incineración de los desechos peligrosos (PNUMA, 2019)

Las consideraciones técnicas para la incineración de desechos peligrosos:

- Se ha generalizado el uso de hornos rotatorios para la incineración de desechos peligrosos, que pueden admitir líquidos y pastas, así como sólidos.
- Los incineradores por inyección de líquido son de uso común para la incineración de desechos peligrosos.
- Los hornos enfriados por agua pueden funcionar a temperaturas más altas y son capaces de admitir desechos con valores energéticos más altos.
 - La consistencia (y la combustión) de los desechos puede mejorar triturando los bidones y otros desechos peligrosos empacados.
 - Un sistema de compensación de carga (por ejemplo, transportadores de tornillo sinfín que pueden triturar y proporcionar una cantidad constante de desechos sólidos peligrosos al horno) contribuirá a garantizar la alimentación continua y controlada en el horno y a mantener condiciones de combustión uniformes.

Técnicas de incineración de desechos médicos (PNUMA, 2019)

Las siguientes consideraciones son específicas de la incineración de desechos médicos:

- Cuando se utilizan parrillas, en el diseño de la parrilla se debe incorporar suficiente enfriamiento que permita la variación del suministro de aire primario con la finalidad fundamental de controlar más bien la combustión y no tanto el enfriamiento de la parrilla propiamente dicha. Las parrillas enfriadas por aire con un flujo de enfriamiento por aire bien distribuido suelen ser apropiadas para desechos de un valor calorífico neto (VCN) de hasta aproximadamente 18 MJ/kg. Posiblemente, los desechos con valor calorífico neto más alto (p. ej., aproximadamente más de 18 MJ/kg) requieran enfriamiento por agua (u otro líquido) para evitar que haya que aumentar el aire primario que controla la temperatura de la parrilla a niveles excesivos, es decir, a niveles que obliguen a suministrar más aire que el óptimo necesario para el control de la combustión.
- Se debe usar una cámara de combustión diseñada para contener, agitar y transportar los desechos; por ejemplo, hornos rotatorios, con enfriamiento o sin él. El enfriamiento por agua en los hornos rotatorios tal vez sea más favorable en situaciones en las que: El valor calorífico neto de los desechos alimentados es más alto (p. ej., más de 15 a 17 GJ/tonelada).
- Se usan temperaturas más altas, de más de 1100 °C (p. ej., para la escorificación o la destrucción de desechos específicos).
- Los desechos médicos pueden ser incinerados en incineradores de desechos municipales que usan el tipo de incinerador de parrilla, aunque habrá que hacer algunas adaptaciones especiales. Cuando se vayan a incinerar desechos médicos infecciosos en un incinerador de desechos municipales, será necesario desinfectarlos y esterilizarlos con anterioridad o incorporarlos al incinerador en contenedores apropiados mediante carga automática (Convenio de Estocolmo, 2008). Se debe evitar la mezcla previa de desechos médicos que contengan mercurio o estén contaminados con este y otros tipos de desechos, así como su manipulación directa.

6.3.3. Mejores técnicas disponibles para el tratamiento de los gases de combustión (PNUMA, 2017)

Las MTD para el tratamiento de los gases de combustión son aplicables, en sentido general, a las instalaciones nuevas y en uso, a menos que se especifique otra cosa.

En general, se usan los filtros textiles que tienen la ventaja de que, cuando se utilizan junto con la inyección de materiales absorbentes semisecos o secos, proporcionan una filtración adicional y una superficie reactiva en la torta del filtro. También los precipitadores electrostáticos, en combinación con los sistemas húmedos, son empleados para lograr bajas emisiones de mercurio. En comparación con los precipitadores electrostáticos, los filtros textiles tienen la ventaja de que se les puede impregnar previamente con carbón activado para que absorban contaminantes volátiles; una ventaja adicional es una buena capacidad de reducción directamente desde la etapa de puesta en marcha. Los sistemas secos y semisecos tienen la ventaja de que no hay que someterlos posteriormente a tratamiento con efluentes. La temperatura de entrada a los filtros textiles es importante en estas combinaciones. Normalmente se requieren temperaturas por encima de 130 °C a 140 °C para prevenir la condensación y la corrosión de las bolsas.

Cuando se usa un sistema seco, la inyección de carbón activado (que también puede ser impregnado con materiales absorbentes como azufre, bromo u otros), mezclado con carbonato hidrosódico o hidróxido de calcio antes de pasar por el filtro textil, puede reducir las emisiones de mercurio en más del 95 %. Es esencial un mantenimiento eficaz y continuo de los sistemas de control del polvo.

En la primera etapa del depurador de alta eficacia, la eficacia de eliminación del mercurio oxidado como cloruro de mercurio (II), que suele ser el principal componente del mercurio después de la combustión de los desechos, registra más del 95 %. La eficacia general de eliminación del mercurio (tanto elemental como oxidado) ronda el 85 %.

Como medida adicional para minimizar el mercurio en el agua del depurador y evitar que se vuelva a emitir el mercurio soluble, se puede usar la precipitación del mercurio oxidado con un agente adecuado para la precipitación, p. ej., sulfuro, y la adición de carbón activado.

Con estas aplicaciones, se ha informado de concentraciones de mercurio inferiores a 10 µg/m³ (promedio anual) (European Commission, 2013). En general, cuando se usan filtros textiles se pueden lograr bajos niveles de emisiones hasta ese máximo. Para que se logren estos niveles de emisión, por regla general, hay que someter los desechos a adsorción por medio de reactivos a base de carbón. Algunas corrientes de desechos contienen concentraciones muy variables de mercurio, por lo que posiblemente sea necesario en esos casos tratar previamente los desechos para prevenir una sobrecarga máxima de la capacidad del sistema de tratamiento de los gases de combustión.

En el caso de desechos con altos niveles de mercurio, como los desechos médicos o peligrosos, tal vez sea apropiado combinar distintas etapas de tratamiento de gases de combustión. Por ejemplo, se puede usar un depurador con ingredientes para la oxidación e inyección de carbón activado antes de pasarlos por un filtro textil.

La reducción catalítica selectiva para el control de los óxidos de nitrógeno reduce también las emisiones de mercurio como beneficio paralelo, al cambiar el mercurio a una forma que se pueda recoger en un filtro textil o precipitar mediante depuradores húmedos.

La caída de presión en los filtros textiles y la temperatura de los gases de combustión (si se usa un sistema de depuración al inicio del proceso) deben monitorizarse para garantizar que se forme la torta del filtro y que las bolsas no tengan fugas ni estén húmedas.

En la Tabla 28 se describen las medidas secundarias de reducción de las emisiones más importantes. Cuando haya que volver a incinerar residuos del tratamiento de los gases de combustión, se deben adoptar medidas adecuadas para evitar la recirculación y la acumulación de mercurio en la instalación.

Tabla 28. Medidas de control y eficacias de reducción en la incineración de desechos municipales, médicos y peligrosos en relación con los gases de chimenea.

Medida de control	Eficacia de reducción
Depuradores de alta eficacia con ingredientes en la solución depuradora.	> 85 %
Depurador + inyección de productos químicos que contienen bromo en la cámara de combustión.	> 90 %
Inyección de carbón activado + filtro textil.	> 95 %

Fuente: European Commission, 2006.

6.3.4. Mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos

La aplicación de las mejores prácticas ambientales, según la definición del Convenio de Minamata, significa que se aplicará la combinación más apropiada de medidas y estrategias de control ambiental. Al aplicar las mejores prácticas ambientales, se debe tomar en consideración el conjunto de medidas escalonadas, que se indican a continuación:

Mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos

- Infraestructura regulatoria con suficiente capacidad para que los incineradores puedan controlar y monitorizar periódicamente las emisiones de mercurio.
- Suministro de información y educación del público, los usuarios y los encargados de adoptar decisiones acerca de las consecuencias ambientales de la elección de actividades específicas y la selección de productos, así como la eliminación final.
- Establecimiento y aplicación de códigos de buenas prácticas ambientales, que abarquen todos los aspectos de la actividad durante el ciclo de vida útil del producto.
- Aplicación de etiquetas que guíen a los que manipulen la corriente de desechos para que remitan los componentes hacia el tratamiento apropiado.
- Aplicación de etiquetas que informen a los consumidores de los riesgos ambientales para que puedan adoptar decisiones fundamentadas sobre sus opciones.
- Uso de los recursos, en particular la energía.
- Integración de los sistemas de recogida y eliminación de desechos en los hogares, el comercio y la industria para garantizar la gestión de todos los desechos de manera ambientalmente racional.
- Evitar el uso de sustancias peligrosas o productos que contengan sustancias peligrosas y la generación de desechos peligrosos.
- Reciclado, recuperación y reutilización.
- Aplicación de instrumentos económicos, sistemas de concesión de licencias, restricciones, prohibiciones, certificaciones, normas u otros instrumentos normativos.
- Evaluación del ciclo de vida útil del mercurio como perspectiva importante para la gestión ambientalmente racional de los desechos de mercurio, en la tarea de reducir la presencia de mercurio en el proceso de incineración de los desechos.
- Reconocimiento de la importancia de la participación del público en los procesos de aprobación de permisos. Son prácticas eficaces para aumentar el conocimiento y la participación del público: la publicación en la prensa de avisos con antelación, la distribución de información a los hogares de la zona, la solicitud de observaciones sobre el diseño y las opciones operacionales, la colocación de vallas informativas en los espacios públicos, el mantenimiento de registros de la liberación y transferencia de contaminantes y la celebración de reuniones públicas y foros de debate frecuentes. Las autoridades y los patrocinadores de proyectos de incineración deben hacer participar a todos los interesados, en particular a los grupos de interés del público. Las consultas con la opinión pública deben ser transparentes y francas y tener un propósito, para que sean eficaces.

6.3.5. Prácticas de gestión de los desechos que contengan mercurio

Para que sea sostenible, la gestión de los desechos no se puede abordar solo con soluciones técnicas al final del proceso; es necesario, en cambio, aplicar un enfoque integrado, que puede calificarse de enfoque jerárquico. La metodología de las mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos que contengan mercurio o estén contaminados con este se resume de la manera siguiente:

- I. Prevención de los desechos antes de la incineración.
- II. Prácticas de funcionamiento y gestión del incinerador.
- III. Prácticas de funcionamiento y gestión después de la incineración.

6. 4. Fabricación de cemento

Introducción

La producción de cemento requiere la alimentación de cantidades considerables de materia prima para quemar el clinker, que se mezcla con determinados aditivos para formar el producto final. El cemento se ha convertido en un material indispensable en la construcción de edificios y de elementos de la infraestructura (puentes, túneles, represas, sistemas de alcantarillado, centrales eléctricas, etc.). Por el momento no existe sustituto a la vista. Durante decenios, se han desplegado esfuerzos para mejorar y optimizar el proceso de producción de clinker. Desde el punto de vista del medio ambiente, esto guarda relación fundamentalmente con la reducción del consumo de energía y la minimización de las emisiones, sobre todo a la atmósfera (PNUMA, 2017).

Desde el punto de vista económico, el interés gira en torno a la sustitución de los combustibles convencionales por alternativos, sobre todo el uso de combustibles derivados de desechos con suficiente valor calorífico, llamados también combustibles alternativos. En menor grado, las materias primas convencionales son sustituidas también por diferentes tipos de desechos llamados asimismo materias primas alternativas. En algunos casos, los combustibles alternativos y las materias primas alternativas se procesan como parte de la infraestructura de gestión de los desechos o debido a su disponibilidad.

El uso de combustibles alternativos o de materias primas alternativas no aumentará (o disminuirá) necesariamente las emisiones de mercurio. El nivel de esas emisiones depende simplemente del contenido relativo de mercurio de esos materiales. El uso de materias primas derivadas de los desechos y combustibles para el proceso de transformación del clinker se denomina coprocesamiento, mientras que el uso de combustibles derivados de los desechos se conoce a veces como coincineración.

En lo esencial, el proceso de producción de clinker consiste en su combustión como tal (precalentamiento, proceso de caldeo del horno con precalcinación o sin ella y con desvío o no de los gases del horno), seguida de su enfriamiento. El clinker quemado se alimenta en el molino de cemento, en el que se produce la molturación de este con aditivos para lograr el producto final (a saber, el cemento).

6. 4. 1. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para la fabricación de cemento (PNUMA, 2019).

Las emisiones de mercurio se pueden reducir aplicando medidas primarias como el control de la cantidad de mercurio que entra al horno, y medidas secundarias como la extracción de polvo mediante sacudidas y la inyección de materiales absorbentes. El mercurio se puede controlar también como beneficio paralelo de la aplicación de técnicas de control de múltiples contaminantes, como los depuradores húmedos, la reducción catalítica selectiva y los filtros de carbón activado.

Las emisiones de mercurio notificadas demuestran que la mayoría de las fábricas de cemento del mundo registran emisiones de mercurio inferiores a 0,03 mg/Nm³. En un informe sobre el mercurio en la industria del cemento (Renzoni et al., 2010), se llegó a la conclusión de que muchos valores estaban por debajo de 0,001 mg de Hg/Nm³ (por debajo del límite de detección) y muy pocos valores rebasaban 0,05 mg Hg/Nm³.

El grado de eficacia indicativo logrado con las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales en las instalaciones de producción de clinker nuevas y ya establecidas para el control de las emisiones de mercurio a la atmósfera es

inferior a 0,03 mg Hg/Nm³ como promedio diario o la media durante el período de muestreo, en las condiciones de referencia de 273 °K, 101,3 kPa, 10 % de oxígeno y gas seco.

Este grado de eficacia indicativo se logra, por regla general, aplicando técnicas mencionadas en el presente documento de orientación. Sin embargo, los factores específicos que tal vez impidan que una planta logre el nivel de emisión son, por ejemplo:

- Un alto contenido de mercurio en el yacimiento de piedra caliza local.
- Diseño y modo de funcionamiento, así como las condiciones de la instalación.
- Los períodos de muestreo, en que se monitorizan las emisiones de mercurio a la atmósfera.

Las emisiones de mercurio a la atmósfera se pueden reducir mediante la sacudida y recogida del polvo en lugar de reincorporarlo a la materia prima. Una manera de seguir aumentando la eficacia de la extracción del polvo mediante sacudidas es bajar la temperatura de descarga del gas al salir de la torre de tratamiento a menos de 140 °C para acelerar la precipitación de mercurio y sus componentes durante la filtración del polvo. El polvo recogido se puede usar en el acabado del cemento o en la fabricación de otros productos. De no ser posible, tiene que ser tratado como desecho y eliminado según lo establecido.

Con la extracción del polvo mediante sacudidas, en combinación con la inyección de materiales absorbentes, se logra una eficacia de eliminación del mercurio más alta que con la extracción mediante sacudidas por sí sola. Normalmente los materiales absorbentes se inyectan cuando el molino de materia prima está fuera de servicio a fin de reducir la emisión máxima en esta etapa de la operación. Este procedimiento puede lograr niveles de emisión de mercurio muy bajos; las emisiones se pueden reducir en 70 % a 90 %. El nivel de emisiones depende de la meta de concentración que se haya programado lograr con el sistema.

Cuando se usa la inyección de materiales absorbentes con una cámara de filtros pulidores, el absorbente se inyecta en los gases de combustión. Situada después del control principal de polvo, se usa un segundo filtro de polvo o una cámara de filtros pulidores para captar el absorbente agotado. Según el requisito general obligatorio de eliminar las emisiones de mercurio, se puede inyectar el absorbente de forma continua o reducir las emisiones máximas, que suelen producirse mientras el molino de crudo se encuentra fuera de servicio. El uso de inyección de carbón activado junto con una cámara de filtros pulidores puede lograr una eficacia de control del 90 % en la eliminación del mercurio. Cuando se emplean estas tecnologías, hay que tomar en consideración que la valorización del polvo extraído mediante sacudidas en la producción de cemento puede verse limitada y que posiblemente se produzcan desechos adicionales.

Aditivos como el bromo, que intensifican la oxidación del mercurio, pueden aumentar también la eficacia de eliminación del mercurio lograda por la inyección de materiales absorbentes.

Medidas primarias

La selección y el control cuidadosos de la materia prima y los combustibles que entran en el horno constituyen una manera eficaz de reducir y limitar las emisiones de mercurio. Para reducir la entrada de mercurio en el horno, se pueden adoptar las medidas siguientes:

- Aplicar los requisitos de límites del contenido de mercurio en las materias primas y los combustibles.
- Usar un sistema de control de la calidad de la materia prima, sobre todo en el caso de materias primas derivadas de desechos y combustibles, para el control del contenido de mercurio en la materia prima.
- Emplear materias primas con bajo contenido de mercurio, de ser posible, y evitar el uso de desechos con alto contenido de mercurio.
- Aplicar la extracción selectiva, si las concentraciones de mercurio varían en el yacimiento, de ser posible.
- Seleccionar el lugar donde se instalará la nueva planta, teniendo en cuenta el contenido de mercurio del yacimiento de piedra caliza.

Medidas secundarias

Se debe tomar en consideración la posibilidad de aplicar algunas medidas secundarias, de ser necesario.

Las emisiones de mercurio a la atmósfera se pueden reducir mediante la sacudida y recogida del polvo en lugar de reincorporarlo a la materia prima. Una manera de seguir aumentando la eficacia de la extracción del polvo mediante sacudidas es bajar la temperatura de descarga del gas al salir de la torre de tratamiento a menos de 140 °C para acelerar la precipitación de mercurio y sus componentes durante la filtración del polvo. El polvo recogido se puede usar en el acabado del cemento o en la fabricación de otros productos. De no ser posible, tiene que ser tratado como desecho y eliminado según lo establecido.

Con la extracción del polvo mediante sacudidas, en combinación con la inyección de materiales absorbentes, se logra una eficacia de eliminación del mercurio más alta que con la extracción mediante sacudidas por sí sola. Normalmente los materiales absorbentes se inyectan cuando el molino de materia prima está fuera de servicio a fin de reducir la emisión máxima en esta etapa de la operación. Este procedimiento puede lograr niveles de emisión de mercurio muy bajos; las emisiones se pueden reducir en 70 % a 90 %. El nivel de emisiones depende de la meta de concentración que se haya programado lograr con el sistema.

Cuando se usa la inyección de materiales absorbentes con una cámara de filtros pulidores, el absorbente se inyecta en los gases de combustión. Situada después del control principal de polvo, se usa un segundo filtro de polvo o una cámara de filtros pulidores para captar el absorbente agotado. Según el requisito general obligatorio de eliminar las emisiones de mercurio, se puede inyectar el absorbente de forma continua o reducir las emisiones máximas, que suelen producirse mientras el molino de crudo se encuentra fuera de servicio. El uso de inyección de carbón activado junto con una cámara de filtros pulidores puede lograr una eficacia de control del 90 % en la eliminación del mercurio. Cuando se emplean estas tecnologías, hay que tomar en consideración que la valorización del polvo extraído mediante sacudidas en la producción de cemento puede verse limitada y que posiblemente se produzcan desechos adicionales.

Aditivos como el bromo, que intensifican la oxidación del mercurio, pueden aumentar también la eficacia de eliminación del mercurio lograda por la inyección de materiales absorbentes.

Medidas de control de múltiples contaminantes

Los dispositivos de control de la contaminación atmosférica instalados para eliminar óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno también pueden lograr beneficios paralelos de la captación de mercurio.

El depurador húmedo es una técnica establecida para la desulfuración de los gases de combustión en el proceso de fabricación de cemento. Los compuestos gaseosos de mercurio oxidado son solubles en agua y pueden ser absorbidos en la suspensión acuosa de un depurador húmedo y, por consiguiente, se podrá eliminar con más eficacia una fracción mayor de los vapores de mercurio oxidado en estado gaseoso. Sin embargo, el mercurio elemental en estado gaseoso es insoluble en agua y, por esa razón, no es absorbido en esas suspensiones acuosas a menos que se usen aditivos para oxidar el mercurio.

La técnica de RCS reduce catalíticamente el NO y el NO₂ a N₂ en los gases de escape y, como efecto secundario, el mercurio elemental se oxida hasta cierto punto. Este mercurio oxidado se puede eliminar mejor del flujo de gases en otro filtro de polvo o en un depurador húmedo. Este efecto colateral se puede usar con la técnica de RCS en caso de un alto contenido de polvo, pero no con la RCS cuando el contenido de polvo es bajo (tratamiento final).

Los contaminantes como el SO₂, los compuestos orgánicos, los metales (entre ellos los volátiles como el mercurio y el talio), el NH₃, los compuestos de NH₄, el HCl, el HF y el polvo residual (después de pasar por el precipitador electrostático o un filtro textil) se pueden eliminar de los gases de escape mediante adsorción con carbón activado. El filtro de carbón activado se construye como lecho empacado con paredes de partición modulares. El diseño modular permite adaptar los tamaños de los filtros a diferentes flujos de gases y capacidades de hornos.

Cuando se usan estas técnicas, se deben considerar los efectos recíprocos entre los distintos medios, como el cambio de los flujos de mercurio a productos como el yeso en un depurador húmedo, o la posibilidad de producir desechos adicionales como el carbón activado agotado que debe eliminarse debidamente.

6. 5. Prevención y reducción al mínimo de los desechos de productos que contienen mercurio y compuestos de mercurio

La introducción de alternativas que no contienen mercurio y la prohibición de los productos que contienen mercurio y compuestos de mercurio son maneras importantes de prevenir la generación de desechos de mercurio. De hecho, el Art. 4, junto con el Anexo A del Convenio de Minamata, prevé la eliminación de algunos productos con mercurio agregado y la eliminación gradual del uso de mercurio en la amalgama dental. Como medida de transición, el establecimiento de límites máximos al contenido de mercurio en los productos para los que en el futuro previsible no se dispone de alternativas sin mercurio ayudaría a reducir la generación de desechos de mercurio del sector de productos que contienen mercurio o compuestos de mercurio.

6. 5. 1. Productos que no contienen mercurio

La sustitución del mercurio en los productos depende de factores como la eficacia o el desempeño de los sustitutos, el costo de los sustitutos y el costo total del producto, los efectos en el medio ambiente y la salud humana de los sustitutos, la tecnología, las políticas oficiales y las economías de escala. Ya se dispone de muchos tipos de alternativas que no contienen mercurio.

En los documentos que se indican a continuación figura información pormenorizada acerca de las alternativas que no contienen mercurio:

- Reemplazo de los termómetros y de los tensiómetros de mercurio en la atención de salud³⁷. Disponible en el sitio web de la Organización Panamericana de la Salud (OPS).
- *"Listings of Alternatives for Mercury Added and Mercury Contaminated Products"*³⁸ en el sitio web del Instituto Nacional de Salud del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU.

Alternativas de los termómetros y tensiómetros de mercurio

De acuerdo con la OPS (OPS, 2013), las alternativas comerciales disponibles para los termómetros de mercurio incluyen los termómetros digitales con termistor, los termómetros con colorante alcohólico, los termómetros timpánicos infrarrojos, los termómetros infrarrojos de arteria temporal, los termómetros con base en termocuplas, entre otros.

Según la OPS (OPS, 2013), existen dos alternativas comunes para el tensiómetro de mercurio: los instrumentos aneroides y los oscilométricos. Los instrumentos aneroides están libres de líquido y utilizan partes mecánicas para transmitir la presión sanguínea al medidor. Este instrumento usa el manguito y el estetoscopio de la presión sanguínea normal para determinar las presiones sistólica y diastólica.

Alternativas de los tubos fluorescentes con mercurio

Los tubos LED (diodo emisor de luz) son la opción más popular para reemplazar los tubos fluorescentes con mercurio. Son altamente eficientes, consumen menos energía y tienen una vida útil más larga. Además, proporcionan una luz de alta calidad que mejora la experiencia visual y la productividad.

Alternativas de las pilas y baterías con mercurio

Según SEMARNAT (2017), en el pasado, la mayoría de las tecnologías de pilas contenían mercurio, cadmio o plomo. En el caso del mercurio, este se añadía para evitar la gasificación interna y la fuga o escurrimiento de materiales de la carcasa, e incluso para prevenir la explosión de estas.

Sin embargo, desde principios de los años 90, la tecnología para su fabricación evolucionó, permitiendo eliminar el mercurio añadido y el cadmio en las pilas.

6. 5. 2. Adquisición de productos que no contienen mercurio

Se deberán alentar los programas de adquisición de productos que no contienen mercurio a fin de procurar la prevención de los desechos y promover el uso de productos que no contienen o que contienen poco mercurio. El objetivo de las prácticas de adquisición deberá ser, siempre que sea posible, adquirir productos que no contienen mercurio, con excepción de los pocos casos en que no se disponga práctica o tecnológicamente de alternativas a los productos que contienen mercurio o compuestos de mercurio o adquirir productos con un contenido mínimo de mercurio.

Los grandes consumidores de productos que contienen mercurio o compuestos de mercurio, como las instituciones oficiales y los centros de salud, pueden desempeñar una importante función de estímulo a la demanda de productos que no contienen mercurio poniendo en práctica programas de adquisición que no perjudiquen el

37 Disponible en: <https://www3.paho.org/hq/dmdocuments/2013/Reemplazo-de-los-termometros-de-mercurio.pdf>

38 Disponible en: <https://orf.od.nih.gov/EnvironmentalProtection/MercuryFree/Pages/Alternatives.aspx>

ambiente. En algunos casos, se podrían utilizar incentivos financieros para alentar esos programas de adquisición.

6. 5. 3. Manipulación, separación, recogida, empaque, etiquetado, transporte y almacenamiento de desechos de mercurio

Los procedimientos de manipulación, separación, recogida, empaque, etiquetado, transporte y almacenamiento de los desechos de mercurio pendientes de eliminación en general son parecidos a los establecidos para los desechos peligrosos. Sin embargo, debido a que las propiedades físicas y químicas del mercurio le confieren gran movilidad en el medio ambiente, la responsabilidad ampliada del productor de los desechos de mercurio requiere otras precauciones y otras técnicas de manipulación. Los encargados de manipular desechos contaminados con mercurio no deberán mezclarlos con otros desechos.

Para garantizar que las liberaciones de mercurio o compuestos de mercurio se mantengan al mínimo, es importante primero concienciar a las personas que intervienen en la manipulación, separación, recolección, empaque, etiquetado, transporte y almacenamiento (por ejemplo, transportistas, recicladores y operadores de tratamiento) sobre los riesgos del mercurio. Dicha concienciación se puede lograr mediante actividades de capacitación, tales como seminarios, que brinden información sobre nuevos sistemas, reglamentos y oportunidades de intercambio de información, preparación y distribución de folletos y difusión de información por Internet.

En los materiales de consulta que figuran a continuación se puede obtener orientación sobre la manipulación, la separación, la recogida, el empaque, el etiquetado, el transporte y el almacenamiento de desechos de mercurio:

- a) PNUD, 2010. Guía para la limpieza, almacenamiento temporal o intermedio y transporte de desechos de mercurio desde las instalaciones de salud.³⁹
- b) OMS, 2010. Uso futuro de materiales de restauración dental.⁴⁰
- c) Mercury Lamp Recycling Outreach Project. (2003). Training Module (1-hour version) for Generators and Handlers of Fluorescent and Mercury-Containing Lamps (and Ballasts). USEPA.⁴¹

39 <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Guidance%20on%20Cleanup%20Storage%20and%20Transport%20of%20Mercury%20from%20Health%20Care%20July%202010.pdf>

40 Capítulo 6. Mejores prácticas para el manejo de los desechos de amalgama: <https://iris.who.int/handle/10665/202500>

41 <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/web/html/outreach.html>

6. 5. 4. **Eliminación ambientalmente racional**

La mayor parte de información que se plasma en este apartado proviene de los documentos PNUMA (2022)⁴² y de PNUMA (2017)⁴³. Las siguientes operaciones de eliminación, previstas en las partes A y B del anexo IV del Convenio de Basilea, facilitan el manejo ambientalmente racional de desechos de mercurio:

- **D5**: Vertederos controlados
- **D9**: Tratamiento fisicoquímico
- **D12**: Almacenamiento permanente
- **D13**: Combinación o mezcla antes de someterlos a las operaciones D5, D9, D12, D14 o D15
- **D14**: Reempaque antes de someterlos a las operaciones D5, D9, D12, D13 o D15
- **D15**: Almacenamiento hasta que se realice alguna de las operaciones previstas en D5, D9, D12, D13 o D14
- **R4**: Reciclado/recuperación de metales y compuestos metálicos
- **R5**: Reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas
- **R7**: Recuperación de componentes utilizados para reducir la contaminación
- **R8**: Recuperación de componentes provenientes de los catalizadores
- **R12**: Intercambio de desechos para someterlos a las operaciones R4, R5, R8 o R13
- **R13**: Acumulación de materiales destinados a las operaciones R4, R5, R8 o R12

6. 5. 5. **Procesos de recuperación de mercurio**

La recuperación del mercurio a partir de los desechos sólidos por regla general abarca: 1) tratamiento previo, 2) tratamiento térmico y 3) purificación (Figura 16). A los efectos de reducir al mínimo las emisiones de mercurio durante el proceso de recuperación de mercurio, las instalaciones deben emplear sistemas cerrados. La poca cantidad de aire de escape que se emite en el proceso tiene que pasar por una serie de filtros de partículas y un lecho de carbón que absorbe el mercurio antes de que el aire se escape al medio ambiente.

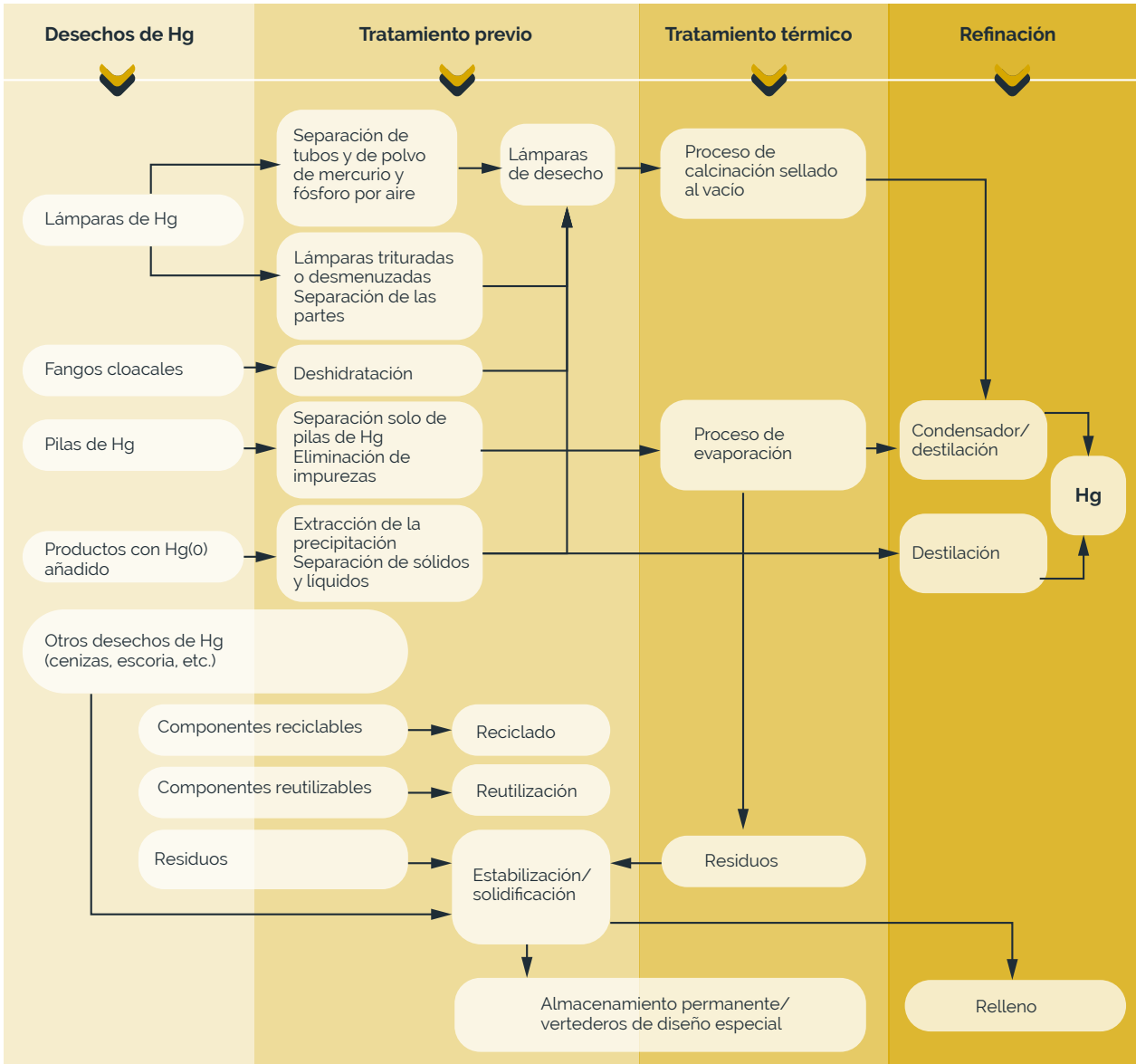
Los residuos derivados de dispositivos de medición que contienen mercurio (termómetros, esfigmomanómetros y manómetros) y los interruptores y relés con mercurio, e incluso lámparas que contienen mercurio son ejemplos de desechos de mercurio cuya recuperación podría generar emisiones de mercurio.

42 PNUMA, 2022. Directrices técnicas sobre el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos.

43 PNUMA, 2017. Directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. PNUMA. 201. pp

El proceso de selección y aplicación de las mejores técnicas disponibles puede englobar los siguientes pasos generales (PNUMA, 2023):

Figura 16. Diagrama de recuperación del mercurio a partir de desechos sólidos.



Fuente: PNUMA, 2022.

Tratamiento previo

Antes de ser sometidos a tratamiento térmico, los desechos que contienen o están contaminados con mercurio reciben un tratamiento a fin de aumentar la eficacia del tratamiento térmico. A continuación, se exponen ejemplos de operaciones de tratamiento previo por tipo de desecho.

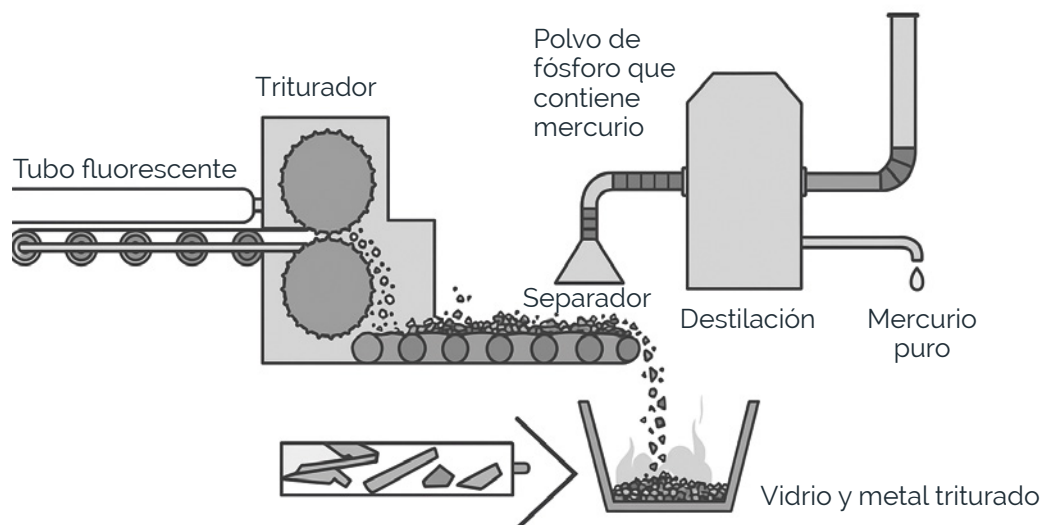
Trituración mecánica (lámparas fluorescentes): Las lámparas que contienen mercurio se deberán procesar en una máquina que las triture y separe en tres categorías: vidrio, capacetes y mezclas de mercurio y fósforo en polvo. Esto se logra inyectando las lámparas en una cámara hermética de triturado y cribado. Terminado este proceso, la cámara extrae automáticamente los productos finales para evitar la contaminación mutua. Los capacetes y el vidrio se deben extraer y enviar para su reutilización en la manufactura. Sin embargo, los pasadores metálicos de los capacetes se deberán eliminar y tratar por separado debido a que el contenido de mercurio puede ser considerable. La mezcla de mercurio y fósforo en polvo se podrá eliminar o procesar posteriormente para separar el mercurio del fósforo (PNUMA, 2022).

El vidrio triturado de las lámparas puede contener importantes cantidades de mercurio, y se deberá tratar térmicamente o de otra manera para eliminar el mercurio antes de enviar el vidrio para su recuperación o eliminación. Si este vidrio se envía a una unidad de derretido para refundirlo como parte del proceso de reutilización, la unidad deberá tener controles de la contaminación del aire destinados específicamente a captar el mercurio liberado (por ejemplo, inyección de carbón activado). Un sistema colector de aire de escape de alta eficiencia deberá impedir la emisión de vapores de mercurio o de polvo durante todo el proceso (Figura 17).

Separación por aire (lámparas fluorescentes): Los capacetes de aluminio de las lámparas fluorescentes (tubos rectos, circulares y compactos) se cortan con quemadores de hidrógeno. Luego se sopla aire en las lámparas fluorescentes cortadas desde el fondo de las lámparas para extraer el polvo de mercurio y fósforo adsorbido en el vidrio de la lámpara. El polvo de mercurio y fósforo va a un precipitador en el que las partes de vidrio son trituradas y lavadas con ácido; el polvo de mercurio y fósforo adsorbido en el vidrio se elimina del todo. Además, los capacetes son compactados, y el aluminio, el hierro y los plásticos separados magnéticamente para ser reciclados (PNUMA, 2022).

Eliminación de impurezas (pilas que contienen mercurio): Para reciclar el mercurio de las pilas que contienen mercurio, antes del tratamiento y el reciclado, estas se deberán recoger y almacenar por separado en contenedores adecuados. Sin embargo, cuando una instalación puede tratar baterías que contienen mercurio, otros tipos de baterías y RAEE juntos sin emitir mercurio al exterior de la instalación, es posible que esta separación no sea necesaria. Antes del tratamiento a base de calcinación, se deberán eliminar las impurezas mezcladas y adsorbidas con las pilas que contienen mercurio, preferiblemente mediante un proceso mecánico. Además, es necesario separar mecánicamente las pilas por tamaño para que el proceso de calcinación sea eficaz (PNUMA, 2022).

Deshidratación (fangos cloacales): Los fangos cloacales tienen un alto contenido de agua (de más del 95 %). Por eso, los fangos contaminados con mercurio tienen que ser deshidratados hasta alcanzar del 20 al 35 % de sólidos antes de cualquier tratamiento térmico. Tras la deshidratación, los fangos cloacales con alto contenido de mercurio se deberán tratar mediante un proceso de calcinación (Nomura Kohsan Co. Ltd., 2007). El agua extraída probablemente necesite ser tratada como desecho de mercurio, dependiendo del contenido de mercurio que posean.

Figura 17. Tratamiento de residuos de tubos fluorescentes.

Fuente: Martínez (2005).

Extracción (desechos de productos que contienen mercurio): Cuando se recojan desechos de productos que contienen mercurio, como termómetros y barómetros, se deberá procurar en lo posible que no se rompa ningún producto. Tras la recogida de estos desechos, se deberá extraer el mercurio de los productos y destilarlo para su purificación bajo presión reducida.

Desmontaje (desechos que contienen mercurio adherido a los aparatos): Algunos aparatos eléctricos suelen tener empotrados interruptores y relés eléctricos que son desechos de mercurio. Por eso, esos desechos se deben extraer de los aparatos sin romper el vidrio exterior. Los monitores de computadoras y los televisores con visualizadores de cristal líquido (LCD) de pantalla plana contienen una o más lámparas pequeñas para la iluminación que suelen colocarse junto al borde exterior de la pantalla. Pese a que las tecnologías actuales utilizan diodos emisores de luz (LED) en estas pequeñas lámparas, las pantallas de LCD antiguas contienen lámparas fluorescentes. Estas lámparas pueden romperse durante la manipulación y el procesamiento mecanizado y liberan entonces vapores de mercurio, por lo que se deberán sacar manualmente con cuidado y no deberán ser objeto de procesamiento mecanizado, como la fragmentación, a menos que las fragmentadoras cuenten con el equipo de control de la contaminación necesario para realizar ese tipo de operaciones.

Tratamiento térmico

Si se utilizan instalaciones de tratamiento térmico para la recuperación de mercurio de los desechos que contienen mercurio o compuestos de mercurio o que están contaminados con estos, como los fangos cloacales, los suelos contaminados y otros desechos de sitios contaminados, deberán dotarse de equipos con tecnología de captación de vapores de mercurio (ITRC, 1998; Chang y Yen, 2006).

Desorción térmica es un proceso que utiliza intercambio de calor ya sea indirecto o directo para calentar los contaminantes principalmente orgánicos a una temperatura suficientemente alta para volatilizarlos y separarlos de una matriz sólida contaminada y posteriormente captarlos o destruirlos. La desorción térmica mediante intercambio térmico indirecto es una opción que se recomienda para el mercurio y sus compuestos.

Como medio de transferencia para los componentes vaporizados se utilizan aire, gas de combustión o gas inerte. Los sistemas de desorción térmica implican procesos de separación física que transfieren los contaminantes de una fase a otra. Los sistemas tienen dos componentes principales, un desorbedor y un sistema de tratamiento de los gases de salida.

Destilación en horno rotatorio sirve para extraer y recuperar el mercurio de desechos como fangos minerales industriales, fangos del movimiento del gas natural, carbón activado, catalizadores, pilas de botón entre otros. En el proceso de destilación en horno rotatorio los desechos alimentados son transportados por una cadena de arrastre directamente hacia la tolva alimentadora del horno rotatorio. Los desechos son tratados continuamente a temperaturas de hasta 800 °C. Como resultado de ello, el mercurio se transforma en fase gaseosa y puede ser extraído del vapor de escape del horno rotatorio. El tratamiento se lleva a cabo bajo presión para evitar emisiones de polvo. El gas de escape del horno rotatorio es transportado por un ciclón, el cual separa las partículas de polvo hacia una cámara de poscombustión. Después de la combustión, el gas de escape restante pasa a un tratamiento de tres etapas, en el que se enfría para lograr una condensación del mercurio y del agua, pasa por un electrofiltro para lograr la deposición de aerosoles, y es alimentado entonces a un sistema de filtros de carbón activado para su limpieza final.

Calcinación. Los desechos tratados previamente, como el polvo de mercurio y azufre de las lámparas fluorescentes, el vidrio de las lámparas trituradas, las pilas que contienen mercurio purificadas, los fangos cloacales deshidratados y el suelo cribado, pueden ser tratados en instalaciones de calcinación/retorta, equipadas con una tecnología que capta los vapores de mercurio y mediante la cual se puede recuperar el mercurio. Sin embargo, cabe señalar que durante la calcinación y otros tratamientos térmicos se emiten metales volátiles (incluidos contaminantes orgánicos persistentes), los cuales se trasladan desde los desechos alimentados a los gases de combustión resultantes y a las cenizas volantes. Por eso se deben emplear dispositivos para el tratamiento de los gases de combustión a fin de captar los contaminantes volatilizados y evitar que se emitan contaminantes al medio ambiente.

Procesamiento térmico al vacío permite el tratamiento de termómetros, pilas, especialmente las de botón, amalgama dental, conmutadores y rectificadores eléctricos, polvo fluorescente, tubos de escape, vidrio triturado, suelos, fangos cloacales, residuos de la minería, en especial de la extracción de mercurio primario, y materiales catalizadores, entre otros. El proceso térmico al vacío abarca, por regla general, las siguientes etapas:

1. **Calentamiento de los desechos alimentados** en un horno especial o en una operación de carga a temperaturas de entre 340 °C y 650 °C y presiones de pocos milibares para que se evapore el mercurio contenido en los desechos.
2. **Tratamiento térmico posterior del vapor** que contiene mercurio a temperaturas que fluctúan entre 800 °C y 1000 °C, en el que, por ejemplo, se pueden destruir los componentes orgánicos.
3. **Captura y enfriamiento del vapor** que contiene mercurio.
4. **Destilación** para generar mercurio líquido puro.

El residuo al final del procesamiento térmico al vacío, en lo esencial, no contiene mercurio y se puede reciclar o eliminar de otra manera, según su composición.

Otros procesos, distintos al tratamiento térmico que permiten el reciclado/regeneración del mercurio o los compuestos de mercurio son: oxidación química, precipitación química y tratamiento por adsorción.

Destilación de mercurio–purificación

Tras el tratamiento de los desechos, el mercurio recogido es purificado mediante destilación sucesiva (USEPA, 2000). La destilación para producir mercurio de gran pureza consta de muchas etapas, cada una de las cuales permite ir logrando cada vez un mayor grado de pureza. El mercurio de alta pureza es necesario para muchos de sus usos o si el mercurio se ha de almacenar durante varios años, ya que ese alto grado de pureza va a contribuir a evitar reacciones químicas entre el contenedor y las impurezas.

6. 5. 6. Métodos de eliminación definitiva

Los desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio se deberán estabilizar y/o solidificar antes de su eliminación definitiva. Se pueden aplicar dos procedimientos químicos fundamentales al proceso de estabilización/solidificación (E/S) de los desechos de mercurio (Hagemann, 2009):

- Conversión química del sulfuro mercúrico.
- Amalgamación (formación de una aleación sólida con los metales idóneos).

Cuando los desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio resultantes de la E/S son eliminados en un vertedero controlado (D5), se deberá prestar especial atención a la estabilidad térmica de dichos desechos. La cobertura final de un vertedero puede ser permeable al aire a largo plazo, por lo que el sulfuro de mercurio puede entrar en contacto con el oxígeno atmosférico y oxidarse para formar mercurio y sulfato. La formación de metilmercurio puede ocurrir en ciertas condiciones geoquímicas. Tanto el mercurio gaseoso como el metilmercurio pueden salir del vertedero a través del circuito de gas (gas de vertedero).

Además de la prevención de incendios, los métodos para estabilizar y solidificar los desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, así como la estructura y la cobertura final del vertedero donde se vayan a depositar los desechos, deberán responder al mecanismo mencionado en los párrafos anteriores a fin de garantizar la reducción al mínimo de las emisiones de mercurio resultantes de los desechos eliminados.

6. 6. Costos asociados a la gestión de Hg y productos con mercurio añadido

A continuación, se expresan costos referenciales de gestión de Hg y productos con mercurio añadido correspondientes al condado de Boulder, perteneciente al estado de Colorado de los EE. UU. (Tabla 29). Estos costos son los asociados a los generadores de muy pequeñas cantidades de residuos peligrosos (VSQG por sus siglas en inglés).

Tabla 29. Costos de gestión de residuos peligrosos con mercurio del Condado de Boulder.

Residuo peligroso	Costo con impuesto incluido (USD)	Costo sin impuesto incluido (USD)
Compuestos de mercurio	23,85 por libra	13,25 por libra
Mercurio elemental	23,85 por libra	13,25 por libra
Bulbos con mercurio	1,80 por libra	1,00 por libra
Termostatos con Hg	0,11 por libra	0,11 por libra
Termómetros con Hg	1,00 por artículo	0,50 por artículo

1 libra = 0,4535 Kg

Fuente: <https://bouldercounty.gov/environment/hazardous-waste/disposal-costs-for-businesses/#.20032025>

Por otro lado, con relación al costo de disposición final de pilas, se hace referencia a la ficha técnica (correspondiente al año 2017) de Servicio de Pilas y Baterías en Desuso elaborado por la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP), responsable de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Quito, Ecuador. En la misma se indica que el costo correspondiente a la recolección, transporte y disposición final de pilas en desuso es igual a 1,80 USD/Kg (sin IVA); por tanto, el costo final IVA incluido asciende a 1,98 USD/Kg.

Por último, con relación al costo de reciclaje de pilas recargables en desuso, se obtuvo información del documento denominado "La contaminación por pilas y baterías en México", elaborado por José Castro Díaz y María Luz Díaz Arias (Tabla 30). En dicha publicación se mencionan los costos de reciclado de pilas secundarias por parte de la empresa International Metal Reclamation Company (INMETCO), ubicada en los Estados Unidos de América (EE. UU.).

Tabla 30. Costos por reciclado de baterías recargables en EE. UU.

Tipo de batería	Costo de reciclado (USD/Kg)*
Níquel-cadmio (seca) (reciclada en EE. UU. por INMETCO)	1,20
Ion litio (con cobalto) (reciclada en EE. UU. por INMETCO)	1,00
Ion litio (sin cobalto) (reciclada en EE. UU. por INMETCO)	8,70
*Incluye 15 % por gastos de transporte sin considerar utilidades del prestador del servicio nacional.	

Fuente: Castro y Díaz (2003).

6. 7. Almacenamiento de mercurio

Una alternativa para un manejo seguro del mercurio es su almacenamiento seguro; para ello se debe contar con un diagnóstico de las principales fuentes de Hg y sus movimientos transfronterizos, para contar con inventarios que permitan determinar las cantidades de mercurio que podrán almacenarse (LATU, 2010).

Las prioridades de almacenamiento deben establecerse de acuerdo con las cantidades, los niveles de exposición de la comunidad y los principales riesgos derivados del posible uso del mercurio para otros fines que impliquen un mayor riesgo ambiental, como la minería de oro. Es importante conocer las características del mercurio que se almacenará, como el grado de pureza, la contaminación por sodio y el grado de humedad. Estas características determinan la necesidad y el tipo de pretratamiento requerido para facilitar la reducción de costos y contemplar los requisitos ambientales y sociales del almacenamiento.

Se deben tener en cuenta algunas condiciones como la ubicación, el concepto de almacenamiento o disposición final, los costos anuales, la inversión necesaria. El mercurio puede almacenarse transitoriamente en forma líquida, debidamente envasado y protegido. Se puede establecer una secuencia de acciones a adoptar para el almacenamiento de mercurio (LATU, UNEP, 2010):

- Diagnóstico e identificación de las principales fuentes de generación de exceso de mercurio.
- Inventario de las características y cantidades de mercurio generado por fuente y región.
- Identificación de los posibles tipos de almacenamiento en el país o, alternativamente, posibles exportaciones.
- Planificación del proceso de almacenamiento en el país según las prioridades, la ubicación y la infraestructura necesaria.
- Identificación de las necesidades y los tipos de pretratamiento aplicables al mercurio para garantizar su adecuación para el almacenamiento.
- Determinación del sistema de envasado y transporte de mercurio.
- Definición de los criterios de aceptación del mercurio y su gestión en el lugar de almacenamiento.

De acuerdo con la literatura, el almacenamiento de los residuos de mercurio se puede realizar de la siguiente forma (LATU, 2010):

- Almacenamiento en minas de sal adaptadas para la disposición de mercurio metálico o sus compuestos. El concepto de disposición subterránea se basa en la consideración de aislar los residuos de la biosfera en formaciones geológicas, donde se espera que permanezcan estables durante un período muy prolongado. Se considera que la mejor manera de aislar el mercurio es depositándolo a profundidades considerables bajo tierra. La contención y el aislamiento del mercurio se proporcionan tanto mediante los contenedores, en los que se depositan los residuos antes de su almacenamiento en el depósito, como mediante diversas barreras artificiales adicionales, además de la barrera natural que proporciona la roca huésped, lejos de la biosfera. La esencia de esta forma de disposición reside en que la mejor protección para las generaciones presentes y futuras, y para el medio ambiente, se proporciona mediante un sistema pasivo compuesto por barreras artificiales y naturales.

- Almacenamiento en formaciones rocosas que provean un nivel de seguridad o contención equivalente al de las minas de sal. El procedimiento es similar al almacenamiento en minas de sal, pero en diversas formaciones geológicas como son la arcilla, las rocas magmáticas duras, metamórficas o volcánicas, como el granito, el gneis y el basalto.
- Almacenamiento en instalaciones superficiales para el almacenamiento de mercurio metálico o sus compuestos. Las instalaciones de ingeniería especialmente diseñados y equipados para almacenar mercurio durante un período prolongado, evitando emisiones al medio ambiente. Deben contar con barreras de protección artificiales y de ingeniería contra la liberación de mercurio metálico en forma de lixiviados, vapores o sólidos contaminados.

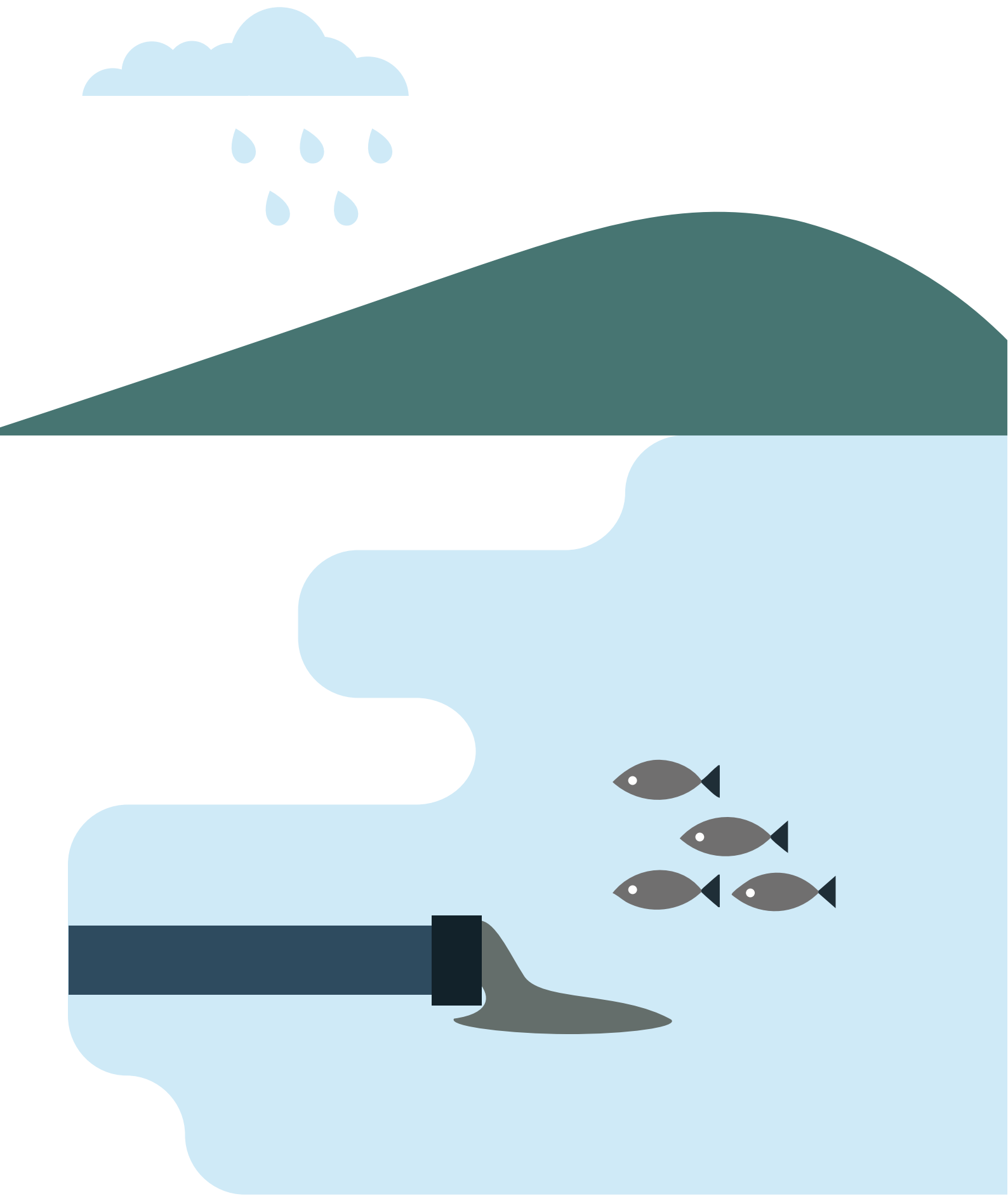
Notas

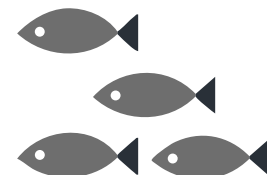
Notas

Notas

Notas

Notas





7. Conclusiones generales y recomendaciones

Contar con un manual técnico para la gestión ambientalmente racional (GAR) de residuos y productos que contienen contaminantes orgánicos persistentes (COP) y mercurio representa un avance fundamental para el país. Esta herramienta proporciona a los operadores, profesionales del sector, consultores, personal técnico y gestores de residuos, una guía integral con los elementos técnicos, jurídicos y económicos esenciales para abordar de manera segura y eficaz los desafíos que implican estos residuos peligrosos.

Desde una perspectiva empresarial, el documento ofrece una base técnica robusta que facilita la mejora de aspectos clave en la gestión de residuos peligrosos:

- **Diagnóstico y caracterización de residuos:** Proporcionando criterios técnicos actualizados para la identificación de COP y mercurio en productos y residuos, de manera a que las empresas implementen diagnósticos precisos que permitan tomar decisiones basadas en riesgos y cumplimiento normativo.
- **Diseño de procesos operativos más seguros y eficientes:** Al presentar flujos de decisión, esquemas de jerarquización de residuos y directrices sobre almacenamiento, tratamiento y disposición final, el manual apoya la reestructuración de procesos internos para reducir la peligrosidad, mejorar la eficiencia en el manejo y minimizar el riesgo de exposición ocupacional o ambiental.
- **Adopción de tecnologías apropiadas:** El enfoque en las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y Mejores Prácticas Ambientales (MPA) permite a las empresas identificar tecnologías viables para incineración, estabilización, tratamiento físico-químico o sustitución de sustancias peligrosas, según sus condiciones operativas y capacidades.
- **Fortalecimiento del cumplimiento regulatorio:** La sistematización del marco legal nacional e internacional aplicable al manejo de COP y Hg facilita el alineamiento con las obligaciones vigentes en Paraguay, reduciendo el riesgo de sanciones, mejorando la trazabilidad y facilitando procesos de auditoría o certificación ambiental.
- **Planificación estratégica y gestión integral:** A través del enfoque de ciclo de vida y principios de economía circular, el manual estimula una visión preventiva y de largo plazo para la gestión de residuos, promoviendo la reducción desde el origen, la revalorización donde sea viable y el diseño de productos más seguros.

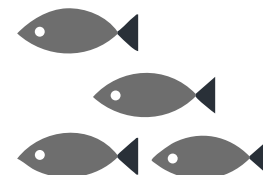
- **Gestión de riesgos y comunicación interna:** La incorporación de matrices de riesgo y procedimientos normalizados también puede ayudar a las empresas a implementar sistemas de gestión más estructurados, fortalecer sus planes de contingencia y mejorar la capacitación de su personal técnico y operativo.

La adecuada gestión de productos y residuos con presencia de COP y mercurio es crucial para prevenir riesgos significativos para la salud humana, los ecosistemas y la calidad ambiental del país. El manejo inadecuado de estas sustancias puede generar impactos graves y persistentes en el aire, el agua, el suelo, la flora y la fauna, así como en las condiciones de vida de las personas.

Este manual también expone las desigualdades de género existentes en el manejo de residuos peligrosos, destacando que las mujeres, especialmente aquellas involucradas en sectores informales, agrícolas y sanitarios, suelen estar más expuestas a estos compuestos, lo que incrementa su vulnerabilidad y la de sus familias.

Si bien Paraguay dispone de un marco jurídico que regula los productos y residuos que contienen COP y mercurio, es necesario avanzar en su actualización e implementación efectiva. Para lograr una gestión ambientalmente racional, se requiere la participación activa de todos los sectores involucrados: público, privado, académico y social, así como la aplicación de las mejores técnicas disponibles (MTD) y las mejores prácticas ambientales (MPA), adaptadas a las realidades económicas, sociales y políticas del país.

Este manual constituye, por tanto, un instrumento estratégico que consolida la situación actual del país en la materia y orienta el camino hacia una gestión segura, eficiente y sostenible de los residuos peligrosos con COP y mercurio, en línea con los compromisos ambientales internacionales y la protección de la salud de la población paraguaya.



Referencias

- Benefice, E., Luna-Monrroy, S., & Lopez-Rodriguez, R., 2010. Fishing activity, health characteristics and mercury exposure of Amerindian women living alongside the Beni River (Amazonian Bolivia). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213(6), 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.08.010>.
- BRE, 2021. Gender, Chemicals and Waste. Gender dimensions of chemicals and waste policies in Bolivia in relation to the Minamata, Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions. Case study Bolivia, 2019-2020. BRE. 58 pp.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2023. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de México.
- Castro, José, Díaz, María Luz. La contaminación por pilas y baterías en México. *Gaceta Ecológica* [en línea]. 2004, (72), 53-74 [fecha de Consulta 27 de febrero de 2021]. ISSN: 1405-2849. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907205>
- CCCB-CRCE, 2014. Report. The Minamata Convention on Mercury and its implementation in the Latin America and Caribbean region. CCCB-CRCE-UNEP. 43 pp.
- CCCB-CRCE, 2019. Evaluación Inicial del Convenio de Minamata en Paraguay. CCCB-CRCE para América Latina y el Caribe. 65 pp. https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/minamata_initial_assessment/Paraguay-MIA-2019-SP.pdf
- Convenio de Basilea, 2022. Directrices técnicas sobre el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos. PNUMA. 90 pp.
- Chang, T. C. and J. H., Yen, 2006. *On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology*, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 128(2-3), 208-217.
- Cristina Cortinas, 2025. Manejo integral de los residuos y economía circular en México y el mundo. Presentación en el Diplomado "Protección de la naturaleza, cambio climático y derechos humanos" de la Suprema Corte de Justicia de la Nación
- Daschner, Robert & Faulstich, Martin & Quicker, P. & Gleis, M., 2011. Emissions and exhaust gas purification processes in waste incineration. 52. 46-51.
- Díaz, S. M., Palma, R. M., Muñoz, M. N., Becerra-Arias, C., & Fernández Niño, J. A. (2020). Factors Associated with High Mercury Levels in Women and Girls from The Mojana Region, Colombia, 2013–2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1827. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061827>.
- Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos, 2018. www.datos.gov.py, consultado el 2 de abril de 2025
- Environmental Protection Agency 40 CFR Part 302 [EPA-HQ-OLEM-2019-0341; FRL-7204- 03-OLEM] RIN 2050-AH09 Designation of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS) as CERCLA Hazardous Substances. *Federal Register*/ Vol. 89, No. 90/Wednesday, May 8, 2024/Rules and Regulations.
- European Commission, 2006. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration, July 2005, Seville, Spain, eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm.
- European Commission, 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants Draft 1 (June 2013) Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- European Commission, DG Environment, Directorate, 2019. B3. Study to support the review of waste related issues in annexes IV and V of regulation (EC) 850/2004. Final report. 394 pp.
- Fundación Ellen MacArthur, 2019. Diagrama de sistemas de Economía circular. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>
- GIZ, 2017. Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios. Programa de aprovechamiento energético de residuos urbanos en México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos_y_emisiones_Plantas_de_incineracion.pdf
- Hagemann, S., 2009. "Technologies for the stabilization of elemental mercury and mercury-containing wastes", *Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS)*. GRS Report 252.
- IPEN, bri, 2017. Contenido de mercurio en mujeres en edad reproductiva de 25 países, IPEN. 24 pp.
- ITRC, 1998. Technical Guidelines for On-site Thermal Desorption of Solid Media and Low-Level Mixed Waste Contaminated with Mercury and/or Hazardous Chlorinated Organics.
- ITRC, 2023. PFAS Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1. Washington, D.C.:

Interstate Technology & Regulatory Council, PFAS Team. Disponible en: <https://pfas-1.itrcweb.org/>.

INECC, 2017. Diagnóstico nacional del uso de nuevos contaminantes orgánicos persistentes (COP) en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 79 pp.

LATU, UNEP, 2010. Options Analysis and Feasibility Study for the Long-Term Storage of Mercury in Latin America and the Caribbean FINAL DRAFT REPORT. LATU. 147 pp.

MADES/PNUD/FMAM, 2020. Guía de Buenas Prácticas Ambientales y Mejores Tecnologías Disponibles para el Manejo de Residuos Peligrosos. Proyecto "Asunción Ciudad Verde de las Américas – Vías a la Sustentabilidad". Asunción, Paraguay. 124 p.

MADES/PNUD/FMAM, 2020. Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Proyecto "Asunción ciudad verde de las Américas–Vías a la sustentabilidad". Asunción, Paraguay. 140 p. Disponible en: <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2021/12/Plan-Nacional-Residuos-Peligrosos-PNGIRP.pdf>

MADES/PNUD/FMAM, 2023. Guía de Capacitación sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes No Intencionales (COPNIs). 14 p. Disponible en: <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2022/05/Guia-de-Capacitacion-COPNIs-3.pdf>

Martínez, J., 2005. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos Tomo I. Montevideo, Uruguay. 164 p. Disponible en: http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/centers/proj_activ/stp_projects/08-02.pdf

Martínez, J., 2005. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fichas Temáticas Tomo II. Montevideo, Uruguay. 140 p. Disponible en: <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Fichas-tematicas-Flujos-de-residuos-RESPEL-Tomo-2-Centro-Regional-Basilea-Uruguay.pdf>

Municipalidad de Asunción-MADES-PNUD-FMAM, 2022. Clasificando los residuos de Asunción–Actualización del estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Asunción. 248 pp.

NAP, PNUMA, GEF, 2019. Informe Final Estudio de Panorama Nacional del Sector MAPE, en el sector salud, junto con las medidas y estrategias a ser incluidas en el PAN, validado por el Comité Nacional de Mercurio. 55 pp.

Nomura Kohsan Co. Ltd., 2007. Treatment of Mercury-containing Wastes at Itomuka Plant of Nomurakohsan Co., Ltd. Tokyo, Japan.

OMS, 2010. Uso futuro de materiales de restauración dental (Capítulo 6. Mejores prácticas para el manejo de los desechos de amalgama) <https://iris.who.int/handle/10665/202500>

OPS, 2013. Reemplazo de los termómetros y de los tensiómetros de mercurio en la atención de salud. Guía Técnica. OMS, 50 pp

PNUD, 2010. Guía para la limpieza, almacenamiento temporal o intermedio y transporte de desechos de

mercurio desde las instalaciones de salud; <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Guidance%20on%20Cleanup%20Storage%20and%20Transport%20of%20Mercury%20from%20Health%20Care%20July%202010.pdf>

PNUMA, 2004. Guidance Document on the Preparation of Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Subject to the Basel Convention. PNUMA. 17 pp.

PNUMA, 2007. Guía para el Análisis de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), PNUMA. 24 pp.

PNUMA, 2013. Kit de herramientas para la identificación y cuantificación de vertidos de dioxinas, furanos y otros COP no intencionales. PNUMA-CE. 295 pp.

PNUMA, 2017. Actualización de las directrices técnicas generales para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos (COP). PNUMA. 70 pp.

PNUMA, 2017. Directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. PNUMA. 201 pp

GEF-PNUMA, 2017. Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo para Paraguay. PNUMA-GEF. 300 pp. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/par218112.pdf#:~:text=El%20presente%20documento%20fue%20desarrollado%20en%20el,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C3%A9s%20y%20ejecutado>

PNUMA, 2019. Convenio de Minamata sobre el Mercurio. PNUMA. 73 pp.

PNUMA, 2020. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. PNUMA. 81pp. UNEP/CHW.15/6/Add.6/Rev.1. 90 pp.

PNUMA, 2020. Género y medio ambiente: un análisis preliminar de brechas y oportunidades en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ciudad de Panamá: PNUMA.

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34929/GEN_ES.pdf?sequence=2&isAllowed=y

PNUMA, 2020. Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. PNUMA. 106 pp.

PNUMA, 2022. Directrices técnicas sobre el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos.

Renzoni, R., Ullrich, C., Belboom, S., & Germain, A. (2010). Mercury in the cement industry. Université de Liege. Independently commissioned by CEMBUREAU-CSI.

Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2008. Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme al Artículo 5 y Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Introducción: Secciones I-IV. 108 pp. Disponible en: <http://chm.pops.int/Portals/o/>

Repository/batbep_guideline08/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-1.Spanish.PDF.

SEMARNAT, 2016. Guía para la elaboración de la cédula de operación anual. Tratamiento de Residuos. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/guias/g_trat.pdf

SEMARNAT, 2017. Guía para el consumo y manejo sustentable de pilas. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300512/Gu_a_para_el_consumo_sustentable_de_pilas.pdf

UNEP. 2004. Guidance for a Global Monitoring Programme for Persistent Organic Pollutants. UNEP. 105 pp.

UNEP, 2010. Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its sixth meeting. Addendum. Guidance on alternatives to perfluorooctane sulfonate and its derivatives. UNEP.

UNEP and IUCN, 2018. Gender and environment statistics: Unlocking information for action and measuring the SDGs. UN Environment, Nairobi, Kenya. 161 pp.

UNEP, 2020. POPs Chemicals. Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride (PFOSF). UNEP. 1 pp.

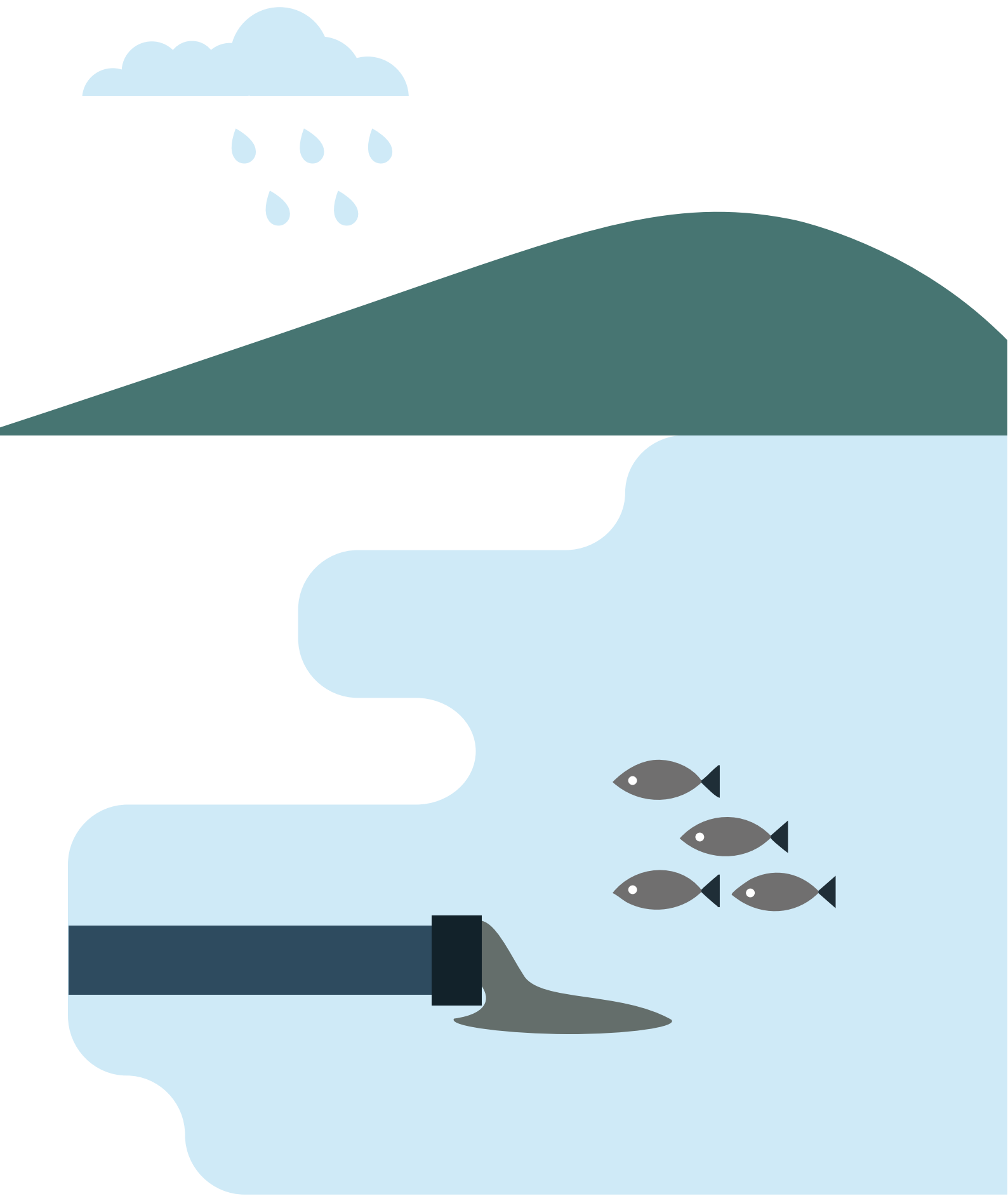
UNEP, 2021. Guidance on the global monitoring plan for persistent organic pollutants. UNEP/POPS/COP.10/INF/42. UNEP. 153 pp.

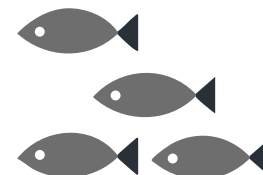
UNEP, 2023. General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. UNEP/CHW.16/6/Add.1/Rev.1. UNEP-BC. 79 pp.

UNEP (n/d). BRS Conventions. Gender Overview. <https://www.brsmeas.org/Implementation/Gender/Overview/tabid/3651/language/en-US/Default.aspx>

USEPA, 2000. Proceedings and Summary Report–Workshop on Mercury in Products, Processes, Waste and the Environment: Eliminating, Reducing and Managing Risks from Non-Combustion Sources. Disponible en: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=64075

USEPA, 2003. Mercury Lamp Recycling Outreach Project. Training Module (1-hour version) for Generators and Handlers of Fluorescent and Mercury-Containing Lamps (and Ballasts). <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/web/html/outreach.html>





ANEXOS

Plantillas para la gestión de los residuos peligrosos generados en establecimientos

Las plantillas para la gestión de residuos peligrosos generados en establecimientos están diseñadas como herramientas clave para apoyar a los profesionales en la implementación de una gestión ambientalmente racional (GAR), especialmente en relación con residuos que contienen contaminantes orgánicos persistentes (COP), como dioxinas y furanos no intencionales, y compuestos perfluorados (PFOS), así como mercurio (Hg). Estas sustancias, debido a su peligrosidad, requieren un manejo estricto y controlado a lo largo de todo su ciclo de vida, desde su generación hasta su disposición final.

El uso adecuado de estas plantillas permite estandarizar y sistematizar el manejo de los residuos peligrosos, asegurando que se cumpla con las normativas establecidas en convenios internacionales como el Convenio de Basilea, Estocolmo y Minamata, y la legislación nacional correspondiente. Las plantillas proporcionan un marco práctico para registrar inventarios, etiquetar, almacenar, transportar y reaccionar ante emergencias, facilitando la trazabilidad y control en cada etapa del proceso. Además, incluyen mecanismos de capacitación y evaluación de cumplimiento legal, lo que asegura que las personas responsables estén debidamente formadas y que los procedimientos implementados prevengan o minimicen el riesgo de exposición a estas sustancias peligrosas.

a. Plantilla de inventario de residuos peligrosos

Objetivo: Registrar y monitorear los tipos y cantidades de residuos peligrosos generados en el establecimiento.

Plantilla de inventario de residuos peligrosos

Datos del establecimiento							
Nombre:		Dirección:					
Persona responsable:							
Fecha d/m/a	Tipo de residuo(a)	Cantidad generada (b)	Estado físico (c)	Código de peligrosidad (d)	Ubicación de generación	Método de almacenamiento (e)	Observación (f)

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Nombre específico del residuo, detallando su composición y origen y/o el código de categorías de los desechos por corriente de desecho según el Convenio de Basilea.

(b) Especificar en unidad de medida. Ejemplo: kilogramos o litros.

(c) Especificar según tipo: Sólido/Líquido/Gaseoso.

(d) Basado en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA). Ejemplo: corrosivo, inflamable, tóxico, etc.

(e) Indicar si el residuo es de corto, mediano o largo plazo en almacenamiento.

(f) Observaciones adicionales o cualquier información relevante que no esté incluida en los otros campos.

b. Plantilla de etiquetado de residuos peligrosos

Objetivo: Identificar y etiquetar correctamente los contenedores de residuos peligrosos.

Plantilla de etiquetado de residuos peligrosos

Datos del establecimiento					
Nombre:		Dirección:			
Persona responsable					
Nombre del residuo (a)	Código de peligrosidad (b)	Peso/Volumen del contenedor (c)	Fecha de almacenamiento (d) d/m/a	Área de almacenamiento (e)	Observaciones (f)

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Nombre específico del residuo, detallando su composición y origen y/o el código de categorías de los desechos por corriente de desecho según el Convenio de Basilea.

(b) Basado en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA). Ejemplo: corrosivo, inflamable, tóxico, etc.

(c) Indicar el peso o volumen total del residuo contenido en el envase. Ejemplo: kilogramos o litros.

(d) Fecha en la que el residuo fue colocado en el área de almacenamiento designada.

(e) Identificación del lugar específico dentro de las instalaciones donde el residuo está almacenado.

(f) Espacio para agregar información adicional sobre el residuo, como precauciones especiales de manejo, condiciones de deterioro del contenedor, incompatibilidades con otros materiales, u otra información relevante.

c. Plantilla de registro de almacenamiento temporal

Objetivo: Controlar la correcta segregación y almacenamiento temporal de los residuos peligrosos en el establecimiento.

Plantilla de registro de almacenamiento temporal

Datos del establecimiento							
Nombre:		Dirección:					
Persona responsable:							
Fecha d/m/a	Ubicación de almacenamiento (a)	Tipo de residuo (b)	Cantidad almacenada (c)	Capacidad del contenedor (d)	Fecha de retiro d/m/a	Destino final (e)	Comentarios (f)

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Ejemplo: Depósito A, B o C.

(b) Nombre específico del residuo, detallando su composición y origen y/o el código de categorías de los desechos por corriente de desecho según el Convenio de Basilea.

(c) Indicar el peso o volumen total del residuo contenido en el envase. Ejemplo: kilogramos o litros.

(d) Indicar el peso o volumen total de la capacidad de almacenamiento del envase. Ejemplo: kilogramos o litros.

(e) Indicar el tratamiento y disposición final del residuo. Ejemplo: fisicoquímico, estabilización-solidificación, biológico, térmico, relleno sanitario.

(f) Observaciones adicionales o cualquier información relevante que no esté incluida en los otros campos. Ejemplo: buen estado, contenedor lleno.

d. Plantilla de registro de transporte de residuos peligrosos

Objetivo: Controlar el transporte externo de residuos peligrosos a instalaciones de tratamiento o disposición final.

Plantilla de registro de transporte de residuos peligrosos

Datos del establecimiento							
Nombre:		Dirección:					
Persona responsable:							
Fecha de salida d/m/a	Tipo de residuo (a)	Cantidad (b)	Transportista autorizado (c)	Licencia de transportista (d)	Destino final (e)	Fecha de recepción	Firma de recepción

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Nombre específico del residuo, detallando su composición y origen y/o el código de categorías de los desechos por corriente de desecho según el Convenio de Basilea

(b) Especificar en unidad de medida. Ejemplo: kilogramos o litros.

(c) Nombre de la empresa y/o del personal.

(d) Ejemplo: DINATRA y/o MADES.

(e) Indicar el tratamiento y disposición final del residuo. Ejemplo: fisicoquímico, estabilización-solidificación, biológico, térmico, relleno sanitario.

Observación: Para mayor información al respecto de las normativas sobre transporte de mercancías peligrosas.

e. Plantilla de plan de contingencia para residuos peligrosos

Objetivo: Definir acciones a seguir en caso de emergencia relacionada con residuos.

Plantilla de plan de contingencia para residuos peligrosos

Datos del establecimiento	
Nombre:	Dirección:
Tipo de emergencia: ^(a)	Fecha: d/m/a
Descripción del incidente: ^(b)	Residuos involucrados: ^(c)
Cantidad afectada: ^(d)	Medidas inmediatas tomadas: ^(e)
Equipos de protección utilizados: ^(f)	Autoridades notificadas: ^(g)
Acciones preventivas: ^(h)	Comentarios: ⁽ⁱ⁾
Persona responsable: ^(j)	

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Identificar la naturaleza del incidente ocurrido. Ejemplo: derrame, fuga, incendio, explosión.

(b) Resumir de manera clara y concisa los detalles del incidente, indicando cómo y cuándo ocurrió, las condiciones que lo generaron, y la magnitud del evento.

(c) Indicar si son corrosivos, inflamables, tóxicos, reactivos, entre otros, para tomar medidas de respuesta acordes a su peligrosidad y minimizar los riesgos.

(d) Especificar en unidad de medida. Ejemplo: kilos, litros.

(e) Describir las acciones iniciales realizadas para controlar la situación, como contener un derrame, extinguir un fuego, o evacuar el área afectada.

(f) Indicar qué equipos de protección individual (EPI) fueron utilizados por el personal durante la emergencia. Ejemplo: guantes, mascarillas, trajes de protección química, gafas de seguridad, etc.

(g) Detallar las autoridades competentes notificadas sobre el incidente. Ejemplo: MADES, Policía Nacional, Bomberos.

(h) Describir las medidas preventivas implementadas posteriormente para evitar que un incidente similar vuelva a ocurrir. Ejemplo: mejoras en los procedimientos de manejo, almacenamiento, o capacitación del personal.

(i) Observaciones adicionales sobre el incidente, lecciones aprendidas, o cualquier información relevante que no esté incluida en los otros campos.

(j) Nombre y puesto del responsable del manejo y control de la emergencia, quien supervisó las acciones de respuesta y la notificación a las autoridades.

f. Plantilla de registro de capacitación en manejo de residuos peligrosos

Objetivo: Mantener un registro histórico de las capacitaciones del personal encargado del manejo de los residuos peligrosos de manera segura.

Plantilla de registro de capacitación en manejo de residuos peligrosos

Fecha de capacitación d/m/a	Tema de capacitación ^(a)	Duración ^(b)	Facilitador ^(c)	Participantes ^(d)	Comentarios ^(e)

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Especificar tema. Ejemplo: Manejo seguro de residuos peligrosos; Almacenamiento temporal de residuos.

(b) Especificar la cantidad de horas o días.

(c) Especificar nombre y apellido, campo de especialización.

(d) Especificar cantidad de personas.

(e) Incluir aspectos importantes. Ejemplo: Incluye simulacros; Enfocado en corrosivos.

Observación: Lo más apropiado es que por cada actividad de capacitación se cuente con un registro de asistencia en el cual se hagan constar los datos de los participantes.

g. Plantilla de evaluación de cumplimiento legal en la gestión de residuos peligrosos

Objetivo: Asegurar que el establecimiento cumple con las normativas ambientales.

Plantilla de evaluación de cumplimiento legal en la gestión de residuos peligrosos

Normativa aplicable ^(a)	Requisitos específicos ^(b)	Cumplimiento (Sí/No)	Acciones correctivas necesarias ^(c)	Fecha de revisión d/m/a	Responsable

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

(a) Especificar los datos de la Ley, Decreto y/o Resolución aplicable.

(b) Especificar los requisitos u obligaciones definidas en la norma aplicable.

(c) Asignar acciones correctivas cuando no se cumpla con las normativas.

Observación: Para mayor información al respecto del Marco Jurídico vinculado a la gestión de residuos peligrosos, ver el Capítulo Marco Legal.

