

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA

Gestión de sitios Contaminados

PARTE 2 – REMEDIACIÓN
Y MANEJO

Este documento fue elaborado en el marco del estudio “Actualización guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes” (licitación pública 608897-28-LE23), a partir de la guía desarrollada por Fundación Chile en 2013.

Elaboración **EnSoil**

Autores

Jorge Alcaíno
Francisca Mihovilovic

Colaboradores

Alfonso Álvarez
Pablo Moya
Francisco Díaz
Simón Burgos

Contraparte técnica

**División de Recursos Naturales y Biodiversidad del
Ministerio del Medio Ambiente**

Carla Riveros

Revisión técnica

Ministerio de Vivienda y Urbanismo

María Ester Arancibia

Ministerio de Salud

Roxana Tessada

IdeAmbiente

Lilian Veas

Diseño y diagramación

Juan Samuel Pino

Fotografía

EnSoil

Ministerio del Medio Ambiente

2025



EnSoil

La Guía metodológica para la gestión de sitios contaminados consta de 3 partes:

Parte 1 - Evaluación

Se refiere al desarrollo de la Fase I, Fase II y Fase III para la evaluación de sitios donde exista, haya existido o se planee el desarrollo de una actividad potencialmente contaminante (APC).

Parte 2 - Remediación y manejo

Se refiere al desarrollo de medidas de remediación y manejo para sitios donde se haya comprobado la existencia de riesgos a la salud o el medio ambiente.

Parte 3 - Catastro e información suplementaria

Provee indicaciones para la actualización de Catastros de sitios con potencial presencia de contaminantes por parte del Ministerio del Medio Ambiente, además de información adicional en cuanto a metodologías, estándares y otras consideraciones relativas a la evaluación, remediación y remediación de sitios.

***Este documento corresponde a la Parte 2 - Remediación y manejo.**

Índice

06 **Parte 2: Remediación y manejo**



08 **Prólogo**

09 **1- Introducción**

11 **2- Glosario**

17 **3- Objetivos**

19 **4-Consideraciones y alcances**

25 **5-Proceso de remediación y manejo de sitios**

26 **6-Recopilación de información base**

6.1 Información del
sitio de estudio
6.2 Características del
medio
6.3 Delimitación de
la extensión de la
contaminación (área y
profundidad)
6.4 Matrices
impactadas,
contaminantes
existentes y
concentraciones
representativas
6.5 Delimitación del
área a remediar y
cálculo de volumen
impactado

28 **7-Diseño y ejecución de plan de remediación y/o manejo**

7.1 Establecimiento de
objetivos
7.2 Selección de
tecnologías
7.2.1 Tecnologías
de remediación y/o
manejo
7.2.2 Criterios para la
elección de tecnologías
7.2.3 Elección de
alternativa(s) y
evaluación
7.2.4 Optimización y
diseño
7.3 Desarrollo de plan
de remediación y/o
manejo
7.3.1 Logística
7.3.2 Permisos y
regulaciones

7.3.3 Cronograma
7.3.4 Costos
7.3.5 Monitoreo
7.3.6 Validación y
seguimiento
7.3.7 Comunicación del
riesgo y participación
ciudadana
7.4 Estructura del plan
de remediación y/o
manejo
7.5 Implementación
de la remediación y/o
manejo

45 **8-Validación de la remediación y/o manejo**

8.1 Planificación
8.2 Diseño del
programa de validación
8.3 Implementación
8.4 Análisis de datos
8.5 Interpretación de
los resultados
8.6 Remediación o
manejo adicional
8.7 Validación repetida
8.8 Documentación
final
8.9 Certificación, cierre
y seguimiento

47 **9-Seguimiento de medidas de manejo**





PARTE 2 REMEDIACIÓN Y MANEJO





Prólogo

La "Guía metodológica para la gestión de sitios contaminados" (también referida como Guía Metodológica), corresponde a una actualización de la "Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes" desarrollada por Fundación Chile el año 2012, aprobada mediante la Resolución Exenta N° 406 del 15 de mayo 2013.

Busca exponer de manera práctica y clara los principales procedimientos involucrados en la evaluación, remediación y manejo de sitios contaminados, en base a un enfoque basado en riesgos, principalmente los asociados a la salud de las personas. Esto implica que los procedimientos para la identificación, evaluación y control de sitios contaminados que se presentan en la guía están orientados a la determinación de la presencia de fuente(s) de contaminación, vía(s) de exposición y población humana eventualmente expuesta a los contaminantes. En palabras simples, a corroborar la existencia de los tres eslabones básicos necesarios para que se manifieste un riesgo (fuente-ruta-receptor) en los sitios en estudio.

La presente edición de la Guía Metodológica consta de 3 partes:

Parte 1 – Evaluación

Parte 2 – Remediación y manejo

Parte 3 – Catastro e información suplementaria

Esperamos que la presente edición de la Guía Metodológica sea de utilidad como instrumento de referencia para los aspectos relativos a la gestión de sitios contaminados. Esto ya sea en procesos llevados a cabo por entidades del sector público, empresas privadas, universidades u otros pertenecientes al sector académico, organizaciones no gubernamentales, y la comunidad en general interesada en la gestión de sitios contaminados.

1 Introducción

La contaminación del suelo es un problema ambiental grave que tiene múltiples causas y efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. De acuerdo con el último catastro realizado por el Ministerio del Medio Ambiente en 2022, existen en el país 10.253 sitios con potencial presencia de contaminantes, de los cuales aproximadamente un tercio corresponde a sitios abandonados.

En el año 2013 el Ministerio del Medio Ambiente desarrolla la “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”, aprobada mediante Resolución Exenta N°406/2013, la cual tiene por objetivo definir los procedimientos para estandarizar la investigación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) en el país. Con la guía metodológica referida, se desarrollan desde entonces una multitud de investigaciones de SPPCs en Chile, especialmente en suelos abandonados, además de compilarse un catastro de SPPCs.

Cabe notar que la presente actualización de la Guía Metodológica contiene un cambio fundamental en la terminología utilizada hasta la fecha, donde se reemplaza la palabra “suelo”, cuando esta se refiera a la delimitación geográfica de un sector o área, por la palabra “sitio”. Esta modificación obedece a tres razones principales: 1) la necesidad de evitar confusión cuando se refiera a suelo como la corteza terrestre, o la matriz ambiental, en contraste a una delimitación de un sector o terreno en particular; 2) en consideración que una investigación de sitio puede contemplar análisis no solo del suelo, sino que además otras matrices ambientales tales como aguas superficiales o subterráneas, sedimentos, polvo depositado, entre otras; y 3) para dar consistencia a los procedimientos indicados en normativas internacionales las cuales se refieren en general a investigaciones de sitios o terrenos contaminados ej. “contaminated site” (USA, Australia), “siti contaminati” (Italia), “Altlasten” (Alemania), o “contaminated land” (Reino Unido).

Es importante entender, sin embargo, que las investigaciones de sitio se refieren en su gran mayoría a la matriz “suelo”, y en este contexto, se continúa utilizando este término en la Guía Metodológica de una manera general (ej. contaminación de suelos, uso de suelo, muestras de suelo, etc.), pero no, como mencionado anteriormente, para referirse a un área delimitada o al nombre formal del instrumento.

Otro cambio importante en la presente edición de la Guía Metodológica es que esta se provee en 3 partes: Parte 1 – Evaluación, la cual se refiere al





desarrollo de la Fase I, Fase II y Fase III para la evaluación de sitios donde exista o haya existido el desarrollo de una actividad potencialmente contaminante (APC) o donde se requiera desarrollar un nuevo proyecto o actividad residencial, recreacional, comercial o industrial; Parte 2 – Remedación y manejo, la cual se refiere al desarrollo de medidas de remediación y manejo para sitios donde se haya indicado la existencia de riesgos a la salud o el medio ambiente; y Parte 3 – Catastro e información suplementaria, la cual provee indicaciones para la actualización del Catastro de sitios con potencial presencia de contaminantes por parte del Ministerio del Medio Ambiente, e información adicional en cuanto a metodologías, estándares y otras consideraciones relativas a la evaluación, remediación y manejo de sitios. En este respecto y en comparación con la versión anterior, la Parte 1 corresponde a procedimientos de evaluación actualizados, la Parte 2 contiene principalmente información nueva sobre aspectos de remediación, mientras que la Parte 3 se refiere a aspectos suplementarios.

Otro cambio significativo adicional con respecto a su versión anterior se refiere al objetivo en sí del documento. Mientras que la versión anterior apuntaba a ser una herramienta que ayudara principalmente a funcionarios del Ministerio del Medio Ambiente a catastrar y priorizar terrenos potencialmente impactados, el objetivo de esta versión es ser la principal referencia en Chile en estas materias, para cualquier usuario interesado ya sea del sector público o privado. En este respecto, se debe notar que conforme ha ido avanzando la preocupación de la sociedad por la contaminación de suelos, las evaluaciones de sitios han sido realizadas con mayor frecuencia, ya sea en procesos de evaluación de impacto ambiental de proyectos, por iniciativa de las autoridades regionales o comunales, o incluso en procesos iniciados por privados para sus propios fines.

La estructura general de las etapas de gestión que incorpora la Guía Metodológica se presenta a continuación.

Parte	Fase	Actividades	Resultados
1 – Evaluación	Fase I – Evaluación preliminar del sitio	– Evaluación preliminar del sitio	– Informe preliminar de situación (IPS)
	Fase II – Caracterización del sitio y evaluación confirmatoria	– Caracterización del sitio – Evaluación confirmatoria	– Informe de caracterización del sitio y evaluación confirmatoria
	Fase III – Estudios complementarios para la remediación y/o manejo	– Evaluación delimitatoria – Evaluación de riesgo y valores objetivo de remediación	– Informe de evaluación delimitatoria – Informe de evaluación de riesgo y valores objetivo de remediación
2 – Remediación y manejo	Remediación y manejo	– Diseño de remediación y manejo	– Plan de remediación y manejo
		– Implementación de remediación y manejo – Validación de remediación y manejo	– Informe de validación
		– Seguimiento de medidas de manejo	– Reportes de seguimiento

2 Glosario

A

Áreas mineralizadas: Zonas con suelos que contienen un alto contenido de metales y metaloides de forma natural.

Actividad potencialmente contaminante: Aquellas actividades que producen, utilizan, manipulan, manejan, almacenan, tratan o disponen sustancias que, por sus características fisicoquímicas, biológicas y toxicológicas, producen o pueden producir daños momentáneos o permanentes a la salud humana, animal o vegetal.

C

Cadena fuente-ruta-receptor: Describe la interacción entre elementos críticos en la dinámica de la contaminación ambiental, donde la fuente se identifica como cualquier actividad que libera sustancias peligrosas al ambiente. Estas sustancias, son transportadas a través de rutas específicas en matrices ambientales como el aire, el agua y el suelo, hasta llegar a un punto de exposición. Este punto es crucial, ya que es donde los contaminantes finalmente entran en contacto con los receptores, que son las personas o poblaciones expuestas.

Contaminación: Presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente. (Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, Título I, art. 2 letra c)

Contaminante: Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental. (Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, Título I, art. 2 letra d)

D

Daño ambiental: Describe la interacción entre elementos críticos en la dinámica de la contaminación ambiental, donde la fuente se identifica como cualquier actividad que libera sustancias peligrosas al ambiente. Estas sustancias, son transportadas a través de rutas específicas en matrices ambientales como el aire, el agua y el suelo, hasta llegar a un punto de exposición. Este punto es crucial, ya que es donde los contaminantes finalmente entran en contacto con los receptores, que son las personas o poblaciones expuestas.

Dosis de exposición: Cantidad de sustancia a la que se expone el organismo y el tiempo durante el que estuvo expuesto. La dosis determina el tipo y magnitud de la respuesta biológica, siendo este un concepto central de la toxicología.

Dosis de referencia: Dosis diaria estimada por debajo de la cual es improbable que un contaminante no cancerígeno cause efectos adversos a las personas, incluyendo grupos susceptibles como los niños.

E

Escenario de exposición: Conjunto de hechos, datos, suposiciones, inferencias y, a veces, juicios profesionales sobre cómo se produce la

exposición (o produciría una exposición potencial futura). Incluye, en general, información sobre el entorno físico en el que se produce la o las exposiciones, la caracterización de la fuente de contaminación; rutas de exposición; caracterización de población expuesta; y factores de exposición.

Evaluación de riesgo ambiental: Procedimiento de análisis de la contaminación potencialmente presente o presente en un lugar determinado, cuyo objetivo es establecer el riesgo que la misma supone, en el presente o futuro, para los sujetos de protección (poblaciones humanas, ecosistemas u otros recursos), de acuerdo con las características específicas del caso. Su finalidad es entregar elementos para tomar decisiones sobre la gestión del riesgo y las consecuentes medidas a adoptar.

Exposición: Proceso mediante el cual las personas o un receptor ecológico entran en contacto con un contaminante.

F

Factores de exposición: Factores relacionados con el comportamiento humano y características que ayudan a determinar la exposición de un individuo a un contaminante. Estos factores incluyen: tasas de ingestión (por ejemplo, alimentos, suelo, agua) o inhalación; factores que afectan a la exposición dérmica (por ejemplo, superficie de la piel, adherencia suelo-piel); factores de actividad (por ejemplo, tiempo que se pasa en interiores, en exteriores, etc.); u otros factores (por ejemplo, peso corporal, uso de productos de consumo).

Factor de potencia cancerígena: Indica el incremento en la probabilidad de desarrollar un cáncer, a lo largo de una vida, por exposición crónica a una dosis unitaria de un contaminante cancerígeno. La probabilidad de sufrir cáncer se hallará, por tanto, multiplicando la dosis diaria de exposición crónica por el factor de potencia cancerígena.

Fase I Evaluación preliminar del sitio: Proceso de evaluación que consiste en recopilar información ambiental suficiente para poder determinar si existe potencial de contaminación en el sitio, y si es necesario realizar investigaciones adicionales y/o implementar medidas inmediatas.

Fase II Caracterización del sitio y evaluación confirmatoria: Proceso de evaluación que realiza cuando la Evaluación preliminar de sitio indica que existe, o es probable que exista contaminación, y la información disponible es insuficiente para poder caracterizarla y diseñar medidas de manejo que reduzcan el riesgo hasta niveles aceptables. Busca llenar los vacíos planteados en la Fase I y evaluar de manera integral si se está configurando la cadena fuente-ruta-receptor.

Fase III Estudios complementarios para la remediación y/o manejo:

Proceso que consiste en el desarrollo de estudios complementarios conducentes a optimizar el diseño de un Plan de remediación o manejo, una vez confirmada la existencia de riesgo a través de la Fase II.

G

Gestión: Proceso que considera las actividades que se deben desarrollar en un sitio con potencial presencia de contaminantes o un sitio contaminado con el fin de evitar que este genere efectos negativos en la salud de las personas o el medio ambiente. Esto incluye principalmente procesos de evaluación, remediación y manejo.

M

Manejo: Proceso que consiste en cortar la ruta de exposición a contaminantes mediante diferentes medidas, y así controlar o reducir el riesgo que estos puedan ocasionar. Se diferencia del proceso de “remediación” en que en este caso los contaminantes no necesariamente son eliminados o disminuidos sus niveles. Un ejemplo de manejo sería un proceso de encapsulamiento.

Modelo conceptual de sitio: Relato escrito y/o representación gráfica del sistema ambiental y de los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el transporte de contaminantes desde la fuente, a través de los medios que componen el sistema, hasta los potenciales receptores que forman parte de él.

Monitoreo: Medición del cambio en concentraciones de analitos o características físicas relevantes en diferentes matrices potencialmente afectadas (suelos, aguas, polvo, etc.) dentro de un sitio o sus alrededores, realizado para evaluar el cumplimiento de objetivos ambientales definidos.

N

Nivel background: Concentración de un compuesto o elemento presente en el suelo en una localidad definida que incluye el nivel de fondo natural y aportes de fuentes difusas antropogénicas no atribuibles a actividades industriales, comerciales o agrícolas específicas. El suelo de donde se obtenga el nivel background debe ser de características similares en cuanto a geología y tipo de suelo, y localizado en las cercanías del sitio en evaluación.

P

Peligro: Propiedad inherente y potencial de un contaminante de causar daño. El término “peligroso” define la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos.

Puntos de exposición: Zona donde es posible encontrar presencia de contaminantes y donde los receptores, a través de alguna vía, pueden

entrar en contacto con los medios contaminados (medios de contacto).

R

Remediación: Proceso que consiste en controlar la fuente de contaminación para eliminar o disminuir el riesgo que esta pueda ocasionar hasta un nivel aceptable. Se diferencia del proceso de manejo (ver definición) en que en este caso los contaminantes son eliminados, o sus concentraciones reducidas hasta un valor objetivo definido. Un ejemplo de esto sería un proceso de remoción y disposición.

Riesgo: La probabilidad de que ocurra un resultado adverso en un período de tiempo dado en una persona, grupo de personas o receptor ecológico, expuestas a una sustancia específica. El riesgo depende de la toxicidad de la sustancia, la cantidad de la sustancia que efectivamente entra en el cuerpo (dosis) y las características del receptor evaluado.

Riesgo aceptable: Probabilidad máxima de contraer una enfermedad o lesión por un individuo, grupo o sociedad, por la exposición a una sustancia química, que se ha considerado aceptable en base a datos científicos y sociales.

Riesgo agudo: Categoría de riesgo a la salud humana y/o procesos ecosistémicos sucedidos de forma repentina y con efectos inmediatos.

Riesgo crónico: Categoría de riesgo a la salud humana y/o procesos ecosistémicos aparentemente inocuo a muy corto plazo, pero con efectos observables en el largo plazo en el organismo o receptor.

Ruta de exposición: Trayectoria específica que sigue un contaminante desde su fuente hasta que entra en contacto con las poblaciones seleccionadas como potencialmente expuestas. Incluye detalles sobre la vía de exposición (ej, inhalación, ingestión, o contacto dérmico).

S

Seguimiento: Observación del cambio de condiciones ambientales y/o físicas ya sea realizadas como monitoreo (ver definición), o de otros aspectos donde estos pudiesen afectar la liberación de compuestos o elementos potencialmente tóxicos, realizado posterior a un proceso de manejo (ver definición).

Sitio activo: Sitio en el cual existe una actividad potencialmente contaminante en operación y donde se identifique también un titular definido, responsable de la actividad, que puede o no ser el propietario del terreno.

Sitio inactivo: Sitio en el cual existió una actividad potencialmente contaminante, cuyo titular está identificado, pero la actividad no esté ejecutándose en el momento, pudiendo existir otra actividad no potencialmente contaminante activa.

Sitio abandonado: Sitio en el que se haya desarrollado una actividad potencialmente contaminante en el pasado, donde no es posible distinguir o individualizar al titular o dueño del predio, independiente de quien haya ejecutado la acción contaminante.

Sitio con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC): Lugar o terreno delimitado geográficamente en el que se desarrollan o han desarrollado actividades potencialmente contaminantes. Incluye a sitios abandonados, activos o inactivos.

Suelo: Capa superior de la superficie terrestre compuesta por minerales, materia orgánica, agua y aire.

Sustancia tóxica: Aquella que pueden causar la muerte, lesiones graves o puede producir efectos perjudiciales para la salud del ser humano si se ingiere, inhala o entra en contacto con la piel.

V

Vía de exposición: Mecanismo por medio del cual un contaminante entra al organismo (ingestión, inhalación, contacto dérmico).



3 Objetivos

La presente Guía Metodológica tiene por objetivo proporcionar un conjunto de pautas y procedimientos sistemáticos que ayuden a abordar de manera efectiva y eficiente los problemas relacionados con la identificación, evaluación, remediación y/o manejo de la contaminación de sitios, con la finalidad de establecer mecanismos para la protección de la salud humana y el medio ambiente. En este sentido se plantean los procedimientos necesarios para:

- **Identificar las fuentes de contaminación:** Entregar procedimientos para la identificación de las fuentes de contaminación presentes en un área o sitio específico, las que pueden incluir actividades industriales, mineras, derrames de sustancias, entre otras.
- **Evaluar el grado de contaminación:** Proporcionar métodos y técnicas para evaluar la magnitud y la extensión de la contaminación en el sitio, lo que incluye el muestreo de suelos (y otras matrices), análisis químicos y evaluación de riesgos.
- **Establecer un marco metodológico para los procesos de remediación y/o manejo:** Entregar procedimientos para el desarrollo de procesos de remediación y/o manejo del sitio.
- **Cumplir con regulaciones y estándares:** Brindar apoyo para entender y cumplir con las regulaciones ambientales y estándares aplicables en Chile, y donde exista ausencia de estos, proveer de referencias internacionales.
- **Proporcionar información técnica:** Entregar información técnica detallada sobre las herramientas, tecnologías y metodologías que pueden utilizarse en la identificación, evaluación y remediación de la contaminación en un sitio.
- **Promover la comunicación y la participación:** Proveer de lineamientos para la comunicación efectiva de los resultados de los procesos de identificación, evaluación y remediación, incluyendo la participación de las partes interesadas para abordar preocupaciones y dar pie a la toma de decisiones de manera transparente.



4 Consideraciones y alcances

De manera análoga a lo mencionado en la Parte 1 – Evaluación, se debe notar que la Guía Metodológica se refiere principalmente a temas relacionados a la contaminación de la matriz suelo, no obstante, en el contexto de una “remediación o manejo de sitio” pueden darse casos en los que sea necesario remediar o manejar otras matrices ambientales, tales como aguas subterráneas, aguas superficiales, sedimentos o polvo depositado.

La necesidad de realizar remediación o manejo de otras matrices se genera cuando la contaminación de suelo está afectando a una de estas matrices, y de este modo se está configurando una situación de riesgo para un receptor final (ya sea en cuanto a salud humana o medio ambiente). El caso inverso, también pudiese ser posible, en cuanto a que contaminación presente en otra matriz estuviese afectando el estado del suelo.

4.1 Incerteza y desafíos en procesos de manejo y remediación de sitios

Los procesos de remediación y manejo son desarrollados de acuerdo a la información recopilada en la fase de evaluación, y en este sentido se debe considerar que las condiciones del suelo pueden cambiar en el tiempo, ya sea por procesos naturales como por actividades humanas, por lo que siempre se debe evaluar la pertinencia del uso de información recopilada. De acuerdo a lo anterior, existen otras fuentes de incerteza, tales como:

- **Incertidumbre del modelo:** Asociada a cuán correctos o ajustados a la realidad son los modelos de transporte u otros utilizados para la generación de un modelo conceptual de sitio, y la toma de decisiones en cuanto a remediación o manejo.
- **Incertidumbre analítica:** Asociada a los resultados analíticos de las muestras. Entre los factores que contribuyen comúnmente a la incertidumbre analítica se encuentran los límites de detección deficientes, el sesgo analítico, la falta de precisión y las interferencias.
- **Incertidumbre de muestreo:** Incluye la heterogeneidad de la distribución de la contaminación en la zona muestreada y la posible falta de representatividad. Otros factores que contribuyen son, por ejemplo,

la manipulación incorrecta, descontaminación deficiente del equipo de muestreo, etc.

- **Incertidumbre relacional:** Asociada a la relación entre un parámetro que se mide y el verdadero parámetro de interés. Esto incluye por ejemplo el uso de un PID para determinar concentraciones de compuestos volátiles, el uso de cromo total como sustituto de cromo VI, y el uso de concentraciones totales de metales para estimar el riesgo de exposición si no se dispone de estimaciones de la fracción biodisponible.

- **Incertidumbre en la decisión:** Es la incertidumbre agregada de factores políticos, económicos y de percepción pública, junto con incertidumbres de modelo, analítica, de muestreo y relacionales.

De acuerdo a lo anterior, es importante realizar un chequeo de dónde pueden existir fuentes de incerteza antes de decidir la utilización de una tecnología versus otra, además de la extensión del área que requiere de remediación o manejo. En caso de supuesta incertidumbre en cuanto al alcance de la contaminación, el muestreo adicional generalmente resulta en una disminución notable de costos en procesos posteriores de remediación.

Finalmente, se debe agregar que los procesos de remediación y manejo son, al igual que aquellos pertinentes a la evaluación, de naturaleza iterativa. Esto significa que deben adaptarse a las condiciones reales encontradas y la respuesta del sistema una vez que se están aplicando las medidas planeadas.

4.2 Marco normativo e instrumentos relacionados a procesos de remediación y manejo

En Chile, no existe actualmente normativa ambiental específica para la remediación o manejo de sitios, sin embargo, existen normas vigentes que se relacionan a la gestión de suelos y/o sitios de manera general, además de instrumentos o guías para industrias específicas.

4.2.1 Normativa ambiental (Ley 19.300 y Ley 20.417)

La Ley 19.300 establece de manera específica el concepto de "daño ambiental" que, para todos los efectos legales, corresponde a "toda pérdida, disminución, detrimento o menoscabo significativo inferido al medio ambiente o a uno o más de sus componentes" (art. 2 letra e). Adicionalmente, establece el concepto de "reparación", que corresponde a "la acción de reponer el medio ambiente o uno o más de sus componentes a una calidad similar a la que tenían con anterioridad al daño causado o, en caso de no ser ello posible, restablecer sus propiedades básicas" (art. 2 letra s).

De esta manera, se establece implícitamente en la Ley 19.300 la necesidad de establecer medidas de remediación o manejo en pos de recuperar espacios para asegurar el cumplimiento del derecho fundamental de “vivir en un medio ambiente libre de contaminación”.

Por otro lado, la Ley 20.4017 le da facultades a la Superintendencia del Medio Ambiente para adoptar medidas urgentes y transitorias para el resguardo del medio ambiente “cuando la ejecución u operación de los proyectos o actividades, genere efectos no previstos en la evaluación y como consecuencia de ello se pueda generar un daño inminente y grave para el medio ambiente”, entre estas suspender la autorización de funcionamiento de una RCA (art. 3 letra g).

Adicionalmente, le otorga al Servicio de Evaluación Ambiental la facultad de pronunciamiento sobre un plan de reparación propuesto por un infractor de daño ambiental, y a la Superintendencia del Medio Ambiente la labor de fiscalizar su cumplimiento (art. 43).

4.2.2 Otros cuerpos normativos e instrumentos

Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras (Ley 20.551/2011 del Ministerio de Minería)

La Ley obliga a las empresas mineras a elaborar y presentar un plan de cierre que contemple el manejo ambiental y social, garantizando la restauración de los sitios afectados y minimizando los impactos negativos en el entorno. Este plan debe ser aprobado por la autoridad competente antes de iniciar la explotación minera.

Además, esta Ley establece un proceso de supervisión y monitoreo post-cierre, asegurando que las empresas cumplan con las medidas de restauración a largo plazo.

Código Sanitario (DFL725/1967 del Ministerio de Salud)

En el Código Sanitario se establece que es un deber general de la autoridad sanitaria prevenir la contaminación en términos amplios. En el artículo 67 se establece “Corresponde al Servicio Nacional de Salud velar porque se eliminen o controlen todos los factores, elementos o agentes del medio ambiente que afecten la salud, la seguridad y el bienestar de los habitantes en conformidad a las disposiciones del presente Código y sus reglamentos”.

Adicionalmente, la autoridad sanitaria posee la facultad de iniciar un sumario sanitario (procedimiento administrativo para investigar y sancionar infracciones a la normativa de salud pública), en caso de que se detecte situaciones que pueden poner en riesgo la salud de la población, lo que incluye la contaminación de suelos.

Ley de Delitos Económicos (Ley 21.595 del Ministerio de Justicia y Derechos Humanos)

Por otra parte, la Ley de Delitos Económicos promulgada el año 2023, si bien no indica mecanismos de reparación, establece penas por contaminación de los suelos (entre otros). Expresamente indica penas de “presidio o reclusión menor en sus grados mínimo a medio el que sin haber sometido su actividad a una evaluación de impacto ambiental a sabiendas de estar obligado a ello: 1) Vierta o deposite sustancias contaminantes en el suelo o subsuelo, continental o marítimo; 2) Extraiga componentes del suelo o subsuelo”.

Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. 40/2012 del Ministerio de Medio Ambiente)

El Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental indica la necesidad del ingreso de proyectos de remediación cuando estos excedan una superficie de 1 ha, como indicado en el Artículo 3 o.11: “Reparación o recuperación de áreas que contengan contaminantes, que abarquen, en conjunto, una superficie igual o mayor a diez mil metros cuadrados (10.000 m²), salvo que se trate de medidas que formen parte de una propuesta de plan de reparación a que se refiere el artículo 43 de la Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente, cuyo texto fue fijado por el artículo segundo de la Ley N° 20.417, caso en el cual se aplicará lo dispuesto en dicha disposición y en su Reglamento.”

Reglamento sanitario sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios (D.S. 189/2003 del Ministerio de Salud)

Su objetivo principal es garantizar la correcta gestión de los residuos sólidos, minimizando el impacto ambiental y protegiendo la salud pública. El decreto aborda aspectos sobre cierre, que se refiere a la “etapa que se inicia luego del término de la vida útil de un Relleno Sanitario, en la cual se construye o completa la cobertura final y se mantienen, operan y/o monitorean los distintos componentes o sistemas de éste hasta que se garantiza que su abandono definitivo no importa riesgo para la salud ni la seguridad de la población.” Lo anterior, en la práctica, corresponde en sí a un proceso de remediación o manejo de sitio.

Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (D.S. 148/2003 del Ministerio de Salud)

En el contexto de una remediación o manejo de sitios se debe considerar la potencial necesidad de evaluar la peligrosidad del material, especialmente si fuese necesario extraer y disponer este material en algún momento, como parte de la remediación o manejo.

Guía Técnica de Buenas Prácticas Ambientales para el Cierre de Centrales a Carbón en Chile (Ministerio de Energía, 2019)

La Guía Técnica de Buenas Prácticas Ambientales para el Cierre de Centrales a Carbón en Chile tiene como objetivo principal establecer un marco de referencia para llevar a cabo el cierre de estas instalaciones de manera sostenible y responsable. Busca minimizar los impactos ambientales y promover la recuperación de los sitios una vez que cesa la operación de las centrales.

Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados (Ministerio del Medio Ambiente – Fundación Chile, 2015)

El Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados (Ministerio del Medio Ambiente, 2013) que compila y describe diversas tecnologías y enfoques utilizados para la remediación de suelos y aguas contaminadas.

4.3 Consideraciones de seguridad y ambientales

El trabajo de terreno relacionado a la remediación y manejo de sitios contaminados debe considerar aspectos de seguridad en la planificación de las actividades, realizando un análisis de riesgo y un plan de seguridad previo a la ejecución de cualquier actividad. Los planes de seguridad deben ser realizados específicamente para cada sitio, e identificar claramente los riesgos, su método de control, responsabilidades, contactos y un cronograma de actividades.

Es vital que el personal que participe en estas labores reciba la capacitación necesaria en aspectos de seguridad, y como mínimo utilizar elementos de protección personal (EPP) de acuerdo a los riesgos identificados.

Además, antes de comenzar cualquier excavación o labor invasiva, es esencial que se identifique la localización de cualquier servicio subterráneo para evitar daños sobre líneas de energía, alcantarillado, entre otros, mediante la revisión de planos y consultas a propietarios, usuarios, vecinos del sitio o empresas de servicios.

Por otro lado, los procesos de remediación y manejo de sitios contaminados podrían generar impactos a los mismos suelos, aguas u otras matrices ambientales. Para controlar estos riesgos ambientales, se deben tomar medidas que incluyen, por ejemplo, la disposición correcta de residuos, mantención de vehículos y maquinaria en condiciones apropiadas, control de emisión y dispersión de polvo o material fino al realizar excavaciones, y sobre todo la disposición de material de descarte, por parte de una empresa autorizada, almacenándolos en el intertanto en contenedores dedicados para este fin.

4.4 Exclusiones

4.4.1 Evaluaciones especializadas

Para la remediación y manejo de sitios, se debe considerar que ciertas fuentes de riesgo presentes en estos requieren de metodologías especializadas de remediación y manejo, las cuales no están cubiertas por la Guía Metodológica. Estas incluyen:

- Artefactos explosivos militares abandonados o sin estallar.
- Sustancias radiactivas.
- Materiales y residuos patógenos, y contaminantes biológicos en general.
- Asbestos o materiales que contengan asbestos.
- Gases explosivos o mezclas de estos.

4.4.2 Riesgos agudos y crónicos

Los riesgos agudos son eventos repentinos con efectos inmediatos, mientras que los riesgos crónicos se desarrollan a lo largo del tiempo y pueden resultar en efectos a largo plazo en la salud.

Se debe notar que las metodologías incluidas en la Guía Metodológica para remediación y manejo se refieren casi exclusivamente a aspectos de riesgos crónicos a la salud. No obstante, algunos sitios pueden contemplar adicionalmente riesgos agudos, para los cuales se debe referir a la autoridad relevante (generalmente la autoridad sanitaria y/o bomberos) para su gestión.



5 Proceso de remediación y manejo de sitios

La remediación, en su concepción y general en el ámbito de la contaminación de un sitio, corresponde al proceso de remoción o reducción de los contaminantes hasta niveles que permitan el uso de suelo actual o futuro, eliminando los riesgos a los receptores identificados.

En este respecto, para efectos de la Guía metodológica se hará la diferencia entre dos procesos fundamentales:

- La remediación de un sitio consiste en controlar la fuente de contaminación para eliminar o disminuir el riesgo que esta pueda ocasionar hasta un nivel aceptable. Se diferencia del proceso de manejo (ver definición) en que en este caso los contaminantes son eliminados, o sus concentraciones reducidas hasta un valor objetivo definido. Ejemplos de esto serían procesos de remoción y disposición, o de biorremediación.
- El manejo de un sitio consiste en controlar la ruta de exposición a contaminantes mediante diferentes medidas, y así disminuir o eliminar el riesgo que estos puedan ocasionar. Se diferencia del proceso de remediación en que en este caso los contaminantes no necesariamente son eliminados o disminuidos en sus concentraciones. Ejemplos de procesos de manejo corresponderían a las estrategias de cubrir, encapsular e inmovilizar químicamente los contaminantes.

Otro aspecto diferenciador de ambos procesos es la necesidad de acciones luego de aplicada la estrategia. Mientras que un proceso de remediación solo necesitará de una validación para darse por concluido (a través del cual se debe probar que la tecnología ha sido efectiva), un proceso de manejo requerirá, además de una validación, medidas de seguimiento continuas para la evaluación de su desempeño (en estricto rigor, no podrá darse por concluido). No obstante la ventaja aparente de la remediación por sobre el manejo. Finalmente, cabe notar que ambos métodos no son excluyentes entre sí, pudiéndose realizar procesos combinados en el área impactada de un sitio, según sea conveniente.

A pesar de las diferencias mencionadas, ambos siguen en general la misma secuencia de recopilación de información, diseño y ejecución del plan, validación y seguimiento (esto último solo para el manejo) indicado en la Figura 1.



6 Recopilación de información base

Esta etapa se refiere a la recopilación y consolidación de los antecedentes necesarios para la caracterización de la contaminación del sitio, obtenidos de las fases anteriores: evaluación preliminar (Fase I), caracterización y evaluación confirmatoria (Fase II), evaluación delimitatoria y/o evaluación de riesgos y valores objetivo de remediación (Fase III) de haberse realizado. En particular, los datos que se requieren para esta etapa se presentan a continuación:

6.1 Información del sitio de estudio

Se debe considerar información básica del terreno, incluyendo ubicación, superficie, delimitación, uso actual (actividades realizadas), uso de suelo según Plan Regulador Comunal u otros instrumentos de planificación territorial, propietarios y estudios de título, proyección en cuanto al uso futuro del terreno, entre otros. También se debiese incluir información básica sobre el contexto físico del sitio (vecinos, industrias o actividades cercanas, accesos, redes de servicios básicos, etc.).

Figura 1 - Proceso de remediación y manejo

Además, se deben incluir todos los estudios ambientales (evaluaciones de suelo, agua, sedimento) previos realizados en el sitio, incluyendo año de realización, ejecutor y etapa de evaluación desarrollada en cada uno.

La información anterior debiese ser presentada de manera georreferenciada (mediante mapas, planos o archivos SIG).

6.2 Características del medio

Se deben considerar las características físicas del suelo, la topografía, geología, hidrogeología, hidrología y meteorología y clima del sector, además de aspectos ambientales relevantes como ecosistemas sensibles, áreas de conservación, etc.

La información anterior debe ser presentada de manera georreferenciada (mediante mapas, planos o archivos SIG).

6.3 Delimitación de la extensión de la contaminación (área y profundidad)

Se debe considerar el análisis de la configuración del sitio (estructuras existentes o pasadas), actividades contaminantes, fuentes de contaminación y la extensión de esta determinada a partir de los estudios de Fase II y/o Fase III.

La información anterior debe ser presentada de manera georreferenciada (mediante mapas, planos o archivos SIG).

6.4 Matrices impactadas, contaminantes existentes y concentraciones representativas

Se debe considerar la identificación de las matrices impactadas, los contaminantes existentes en el sitio y las concentraciones representativas de cada contaminante en cada matriz. Además, se debe incluir un resumen de los resultados de la Fase II y/o Fase III, es decir, la evaluación del impacto potencial en la salud humana y el medio ambiente (comparación con normativa y/o background, niveles de riesgo calculado, etc.).

La información anterior debe ser presentada de manera georreferenciada (mediante mapas, planos o archivos SIG).

6.5 Delimitación del área a remediar y cálculo de volumen impactado

Se debe incluir de manera georreferenciada (mediante mapas, planos o archivos SIG), la superficie y la delimitación de los sectores contaminados que deben ser remediados o manejados, según la superación de los valores objetivos de remediación.

7 Diseño y ejecución de plan de remediación y/o manejo

A continuación, se presentan los principales puntos para el diseño e implementación de una estrategia de remediación y/o manejo de un sitio de estudio.

7.1 Establecimiento de objetivos

Se deberá establecer, en conjunto con los actores relevantes, los objetivos para el uso del sitio, aplicando estrategias de manejo y/o remediación. Estos objetivos se definen en base a criterios de salud pública, medioambientales y normativa ambiental aplicable. La correcta definición de estos objetivos debe contener al menos los siguientes aspectos:

- 1. Elección de metodología:** se debe evaluar si se realizará un proceso de remediación, manejo o una combinación de estos.
- 2. Valores objetivo a alcanzar (remediación):** corresponde a la concentración del o los contaminantes de interés que se busca alcanzar que, de acuerdo al uso del sitio, no representarían un riesgo para la salud
- 3. Área de cumplimiento:** definición del área, sectores o puntos donde deben aplicarse las medidas de remediación y/o manejo.
- 4. Criterios de validación:** de qué manera se evaluará el cumplimiento de la remediación y/o manejo.
- 5. Plazos:** corresponde al cronograma que incluye plazos para construcción, ejecución y evaluación de la estrategia de manejo y/o remediación.

6. Seguimiento (manejo): se deben establecer los criterios que se evaluarán (y la frecuencia) para asegurar que la estrategia de manejo se mantiene efectiva en el tiempo.

Naturalmente el aspecto “valores objetivo a alcanzar” no sería aplicable en los casos en que se busque establecer una estrategia de manejo, que contemple la instalación de una barrera física que impida el acceso a los contaminantes. Por ejemplo, sería imposible establecer niveles de remediación para una cubierta de concreto implementada por sobre el material contaminado. Sin embargo, si adicional a esta cubierta de concreto se cubre el sitio con material de relleno, este sí debe cumplir con los valores determinados como seguros, ya sea por comparación con normativa internacional (o nacional, de existir) o por valores objetivo de remediación (VOR) determinados a través de una evaluación de riesgo como parte de una Fase III.

De manera opuesta a lo anterior, el aspecto “seguimiento” no sería aplicable donde se busque la remoción completa de los contaminantes en el sitio, ya que en este caso no se debieran tomar medidas adicionales ni posteriores a las planteadas en el proceso de remediación.

7.2 Selección de tecnologías

Las tecnologías de remediación de suelos y/o aguas subterráneas abarcan todas aquellas operaciones que tienen por objetivo reducir la toxicidad, movilidad o concentración del contaminante presente en el medio, mediante la alteración de la composición de la sustancia peligrosa o del medio, a través de acciones químicas, físicas o biológicas. La selección de tecnologías busca evaluar la amplia gama de alternativas existentes, incluyendo la aplicación de medidas de gestión como eliminación parcial de residuos, recubrimientos, muros pantalla, estabilización in-situ y consolidación. Se deberán evaluar múltiples alternativas de tecnologías de remediación y/o manejo que sean aplicables y factibles para alcanzar los objetivos definidos. Estas tecnologías pueden combinarse entre sí para lograr alternativas que permitan alcanzar el cumplimiento de estos objetivos. Estas alternativas deben considerar los siguientes aspectos generales:

1. Protección de la salud humana y el medio ambiente: se debe describir cómo cada alternativa protege la salud humana y el medio ambiente, siendo necesaria la consideración de medidas que pueden no estar directamente relacionadas con las estrategias de remediación o manejo (ej. suministros de agua potable alternativos para evitar una potencial exposición de agua contaminada).

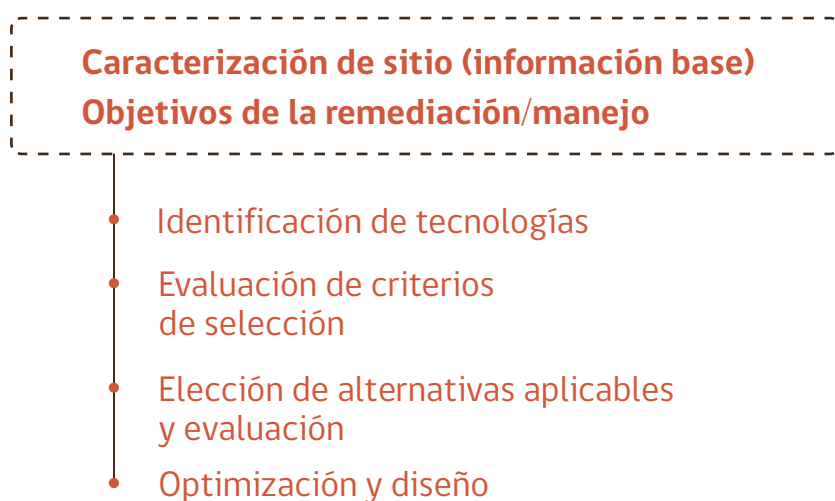
2. Cumplimiento de los objetivos definidos: se debe describir detalladamente la capacidad de la alternativa para cumplir con los objetivos previamente definidos.

3. Control de la fuente, la vía de exposición o ambos: se debe describir la capacidad de cada alternativa para controlar la fuente de contaminantes y/o la(s) vía(s) de exposición. El control de la fuente de contaminación es vital para detener o controlar potenciales liberaciones de contaminantes que configuren riesgo para la salud humana o el medio ambiente, y que a la vez hagan ineficaces las alternativas de remediación.

4. Cumplimiento de normas para el manejo de residuos: se debe dar cumplimiento a toda normativa nacional aplicable para la gestión de residuos, analizando cómo se realizarán dichas actividades específicas.

5. Potenciales impactos a personas cercanas al proyecto: se debe evaluar los potenciales impactos que pudiesen originarse a personas cercanas al proyecto (generación de emisiones, incremento en tránsito de calles aledañas, etc.).

La selección de alternativas es un proceso que requiere como base la caracterización del sitio y la definición de objetivos de remediación o manejo, y que está compuesto por las siguientes actividades: identificación de alternativas, evaluación de criterios de selección, elección de alternativas aplicables y su evaluación, y optimización y diseño. Este proceso se presenta en la Figura 2.



7.2.1 Tecnologías de remediación y/o manejo

Las técnicas de remediación y/o manejo dependen de las características del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada de cada tratamiento, de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo.

Estas tecnologías normalmente pueden agruparse en función de sus características de operación o finalidad, según los siguientes criterios:

Figura 2 - Proceso de selección de alternativas de remediación y/o manejo



Lugar en que se aplica el proceso de remediación

Según el lugar de aplicación del proceso, existen tratamientos in situ, que actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan, y tratamientos ex situ, que requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento, ya sea en el mismo lugar (tratamiento on-site) o en instalaciones externas que requieren el transporte del suelo contaminado (tratamiento off-site). Los tratamientos in situ requieren menos gestión, pero por lo general son más lentos y más difíciles de llevar a la práctica, dada la dificultad que se presenta al tener un contacto directo entre el suelo contaminado con el resto del suelo que no requiere de tratamiento.

Los tratamientos ex situ, en tanto, suelen ser más costosos, pero también más rápidos, consiguiendo normalmente una recuperación más completa de la zona afectada.

El objetivo

En función de los objetivos que se quieran alcanzar para remediar o manejar un sitio contaminado, se presentan las siguientes técnicas:

1. Técnicas de contención (manejo): esta técnica aísla el contaminante en el suelo sin actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en este último.

2. Técnicas de confinamiento (manejo): las cuales reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración, actuando directamente sobre las condiciones fisicoquímicas bajo las que se encuentran los contaminantes.

3. Técnicas de descontaminación (remediación): dirigidas a disminuir o eliminar la concentración de los contaminantes en el suelo.

Tipo de tratamiento

En la clasificación de las tecnologías según el tipo de tratamiento aplicado se pueden distinguir:

1. Tratamientos biológicos: están enfocados en la degradación, transformación y/o remoción de contaminantes mediante la actividad metabólica natural de ciertos organismos.

2. Tratamientos fisicoquímicos: logran la destrucción, separación y/o contención de contaminantes aprovechando las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio.

3. Tratamientos térmicos: utilizan altas temperaturas para volatilizar, descomponer o fundir los contaminantes.

Grado de desarrollo técnico

Según su grado de desarrollo, las tecnologías utilizadas son clasificadas como:

1. Tecnologías tradicionales: aquellas utilizadas comúnmente a gran escala, de probada efectividad y cuya información acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso.

2. Tecnologías innovadoras: aquellas tecnologías propuestas más recientemente y que se encuentran en etapas de investigación y/o desarrollo, por tanto, la información en cuanto a su aplicación, costos y efectividad es aún limitada.

El esquema presentado en la Figura 3 presenta los distintos criterios expuestos para la clasificación de las tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas.



Fuente: Elaboración propia en base a Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes (Ministerio del Medio Ambiente - Fundación Chile, 2013)

En la actualidad el rango de las tecnologías que se han utilizado en Chile no es muy amplio, e incluye principalmente la excavación y contención; sin embargo, existe potencial para la aplicación de otras tecnologías, tales como la biorremediación, fitorremediación, extracción de vapores, entre otras. La descripción de estas técnicas se presenta en la Tabla 1.

Una revisión completa de las tecnologías que pudiesen aplicarse en Chile se encuentra en el “Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados” (Ministerio del Medio Ambiente - Fundación Chile, 2015).

Figura 3 - Clasificación de tecnologías de remediación

Tecnología	Tipo de tratamiento	Descripción
Excavación y retiro del material	Físico	Proceso de extracción mecánica del suelo contaminado, traslado del material y disposición segura de este.
Reaprovechamiento de relaves	Físico - Químico	Proceso mediante el cual se reprocessan los relaves para extraer elementos comercialmente valiosos y se dispone el resto de manera ambientalmente responsable.
Biorremediación	Biológico	Proceso que utiliza microorganismos para acelerar los procesos naturales de degradación de contaminantes en el suelo.
Estabilización fisicoquímica	Físico - Químico	Proceso que busca reducir la movilidad de contaminantes mediante la adición de materiales inmovilizantes.

Tecnología	Tipo de tratamiento	Descripción
Lavado de suelos	Físico – Químico	Proceso que busca disolver contaminantes en el medio líquido para luego retirarlos a través de bombeo del líquido
Fitorremediación	Biológico	Proceso que utiliza especies vegetales para la absorción de contaminantes mediante diferentes estructuras vegetales.

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente – Fundación Chile (2015)

7.2.2 Criterios para la elección de tecnologías

Las tecnologías deben evaluarse en base a la información levantada durante las Fase I, Fase II y Fase III de evaluación previa, como también con cualquier información recabada durante el paso previo de "Recopilación de información base". Estas alternativas de tecnologías deben ser evaluadas en base a su capacidad para cumplir los objetivos definidos, factibilidad y desempeño. Los aspectos principales a evaluar son los siguientes:

1. Capacidad de cumplir los objetivos definidos: una tecnología que pueda ser considerada como alternativa debe cumplir con al menos uno de los objetivos definidos previamente. Si la tecnología no cumple con ninguno de los objetivos debe ser descartada como alternativa.

2. Viabilidad y factibilidad: se debe considerar la viabilidad técnica y administrativa para la aplicación de la tecnología. Se deben evaluar las tecnologías tanto en la disponibilidad de recursos y equipos, y tiempo, como en la factibilidad de construcción/implementación y la mantención futura del sitio. Algunos aspectos para la implementación son la costo-efectividad, aplicabilidad de forma segura, características del material, accesibilidad del sitio, áreas disponibles, usos potenciales del sitio a tratar, permisos, gestión de residuos y traslado de material, entre otros.

3. Desempeño: El desempeño de una tecnología se clasifica como "Bueno", "Regular" o "Insuficiente" en función de su historial de aplicaciones previas. Se considera "Bueno" a las tecnologías con un historial confiable, "Regular" a aquellas con un historial aceptable o pruebas piloto adecuadas, e "Insuficiente" a las tecnologías con historial de confiabilidad deficiente o en etapas conceptuales de desarrollo.

4. Efectividad de la tecnología: Se debe evaluar la efectividad de cada tecnología tanto a corto como a largo plazo, donde el corto plazo incluye el proceso de construcción/implementación y el largo plazo incluye al período posterior a la finalización de la remediación o manejo. Esto

Tabla 1 – Tecnologías de remediación de mayor uso o potencial de uso en Chile

implica analizar su capacidad para proteger la salud humana, el medio ambiente y cumplir con los estándares de limpieza de medios propuestos. Es vital para entender la efectividad de cada tecnología calcular cuánto reducirá la alternativa la toxicidad, el volumen y/o la movilidad de los contaminantes, comparando las condiciones iniciales del sitio con las condiciones posteriores a la remediación o manejo.

Se deben considerar amenazas potenciales durante la implementación y la operación. Además, los estudios de laboratorio y campo son fundamentales para estimar la efectividad.

6. Estimación de costos: se deberá desarrollar una estimación de costos preliminar para cada alternativa de medida. La estimación de costos incluirá tanto la inversión inicial como también los costos de operación y mantenimiento. Se debe incluir, además, una descripción de cómo se estimaron los costos y qué supuestos se utilizaron. Algunos aspectos para considerar en la estimación de los costos son: ingeniería, carga, descarga, transporte, preparación del sitio, construcción, materiales, mano de obra, compra y arriendo de equipos, muestreo, análisis, eliminación de residuos, permisos, medidas de seguridad y protección de la salud.

7. Confiabilidad a largo plazo: Se debe tener en cuenta los requisitos de operación y mantenimiento al evaluar el riesgo y la posibilidad de fallos. Esto implica considerar los efectos potenciales de cualquier fallo en cualquiera de las tecnologías de la alternativa, así como su impacto en los receptores y la migración de contaminantes. Además, es importante evaluar si la alternativa cuenta con la flexibilidad necesaria para hacer frente a cambios inevitables en el sitio, como, por ejemplo, terremotos o cambio climático. En el proceso de evaluación de requisitos de operación y mantenimiento, es esencial considerar tanto la frecuencia como la complejidad de las operaciones, así como el mantenimiento necesario. Por lo general, las tecnologías que requieren operaciones y mantenimiento frecuentes o complejos deben considerarse menos fiables que aquellas que implican operaciones y mantenimiento simples y poco frecuentes. Es importante tener en cuenta que la mayoría de las tecnologías de remediación tienden a deteriorarse con el tiempo. Sin embargo, este deterioro puede mitigarse mediante una adecuada operación y mantenimiento. Aun así, es necesario estar preparados para el eventual reemplazo de la tecnología cuando sea necesario.

Una vez realizada la evaluación de los criterios anteriores para las tecnologías que cumplan con los objetivos de remediación y/o manejo, se pueden resumir las diferentes opciones en una tabla que permita comparar fácilmente cada una de ellas. En este punto, es posible además asignar puntaje u otro tipo de valoración a cada alternativa según el aspecto evaluado para facilitar la selección de las alternativas más adecuadas (ver ejemplo para un sitio tipo en la Tabla 2). Cabe notar que en este análisis, por lo general, también se incluye la alternativa de no realizar ninguna acción.

Tecnología	Clasificación	Descripción	Ventajas	Desventajas	Duración	Costo
Sin acción	-	Dejar sitio en estado actual	Sin costos asociados Valoración: alta	No permite el uso propuesto Valoración: baja	-	Sin costo Valoración: alta
Excavación y retiro del material	Ex situ off-site	Remoción y disposición de material a un sitio que cuente con los permisos necesarios	• Efectivo • Rápido Valoración: Alta	Genera emisiones Valoración: media	Media (3 meses) Valoración: media	Alto (5.000 t a disponer, aprox. 3.5 UF por t solo disposición) Valoración: baja
Biorre-mediación	Ex situ on-site	Excavación de suelos, disposición en el mismo sitio en pilas y tratamiento para aumentar población nativa de organismos degradadores	• Efectivo • No genera residuos Valoración: Alta	Proceso lento y requiere de pruebas de tratabilidad y espacio en el sitio Valoración: media	Alta (1 año) Valoración: media	Bajo (para 5.000 ton a tratar); solo se requiere de tiempo y medidas de manejo simples Valoración: baja

7.2.3 Elección de alternativa(s) y evaluación

Una vez seleccionada la o las alternativas con mayor aplicabilidad dados los criterios indicados en la sección anterior, se pueden realizar diferentes estudios para evaluar su desempeño y poder posteriormente optimizar la tecnología (aumentando su efectividad o reduciendo costos). Estos estudios incluyen ensayos de tratabilidad, caracterización detallada o implementación de un plan piloto.

Los ensayos de tratabilidad son pruebas de laboratorio que se utilizan para determinar la viabilidad o efectividad de una técnica determinada. Estos ensayos son cruciales para evaluar cómo responderá el suelo (u otra matriz contaminada) a ciertos métodos antes de implementar el tratamiento a gran escala en el sitio afectado. Por otra parte, un plan piloto corresponde a la misma implementación de la tecnología seleccionada, pero a una escala reducida. Ambos estudios son útiles, además, para evaluar riesgos potenciales por la generación de subproductos que pudiesen ser peligrosos.

Tabla 2 – Ejemplo de evaluación resumida de alternativas para un sitio tipo.



Los estudios de caracterización detallada pueden incluir el desarrollo de modelos de transporte de contaminantes (aguas subterráneas, superficiales, o material particulado), de degradación de contaminantes, de microbiota degradadora de hidrocarburos, o incluso el muestreo nuevamente en el sitio para redefinir aún más los límites de la contaminación (ver Fase III en Parte 1 de esta Guía).

Una vez realizados los estudios correspondientes, se debe evaluar nuevamente la tecnología en base a su aplicabilidad y factibilidad, y seleccionar la tecnología (o tecnologías) que mejor se ajuste al sitio. Cabe notar que pudiese darse el caso de que las alternativas seleccionadas no tengan un buen desempeño o se determinen como no prácticas, en cuyo caso se debe volver al punto anterior (Sección 6.2.2) y realizar una nueva evaluación.

7.2.4 Optimización y diseño

Finalmente, una vez determinada la o las tecnologías a aplicarse en el sitio, se deben optimizar de acuerdo a los resultados de los estudios anteriores. En este sentido, se debe optimizar los parámetros del tratamiento, como la dosis de agentes químicos, la duración del proceso o las condiciones ambientales, para lograr resultados óptimos.

7.3 Desarrollo de plan de remediación y/o manejo

El plan de remediación debe contener los objetivos de remediación y/o manejo, el proceso de selección de tecnología y la descripción en detalle del proceso a realizar, como mencionado en secciones anteriores.

Adicionalmente a los aspectos técnicos del diseño, se debe desarrollar el mejor enfoque de aplicación en cuanto a aspectos logísticos, normativos y sociales, además de materias relacionadas con la evaluación del desempeño de la tecnología implementada (monitoreo, validación y seguimiento). Esto se explica en mayor detalle en las secciones siguientes.

7.3.1 Logística

Los requerimientos en cuanto a logística son muy similares a los de una obra de ingeniería, y requieren de manera resumida el detallar los recursos necesarios como maquinaria, equipos, personal especializado, materiales, etc. y asegurar la disponibilidad y la capacidad de los recursos durante todo el proceso. Se debe además detallar las labores involucradas determinando una cadena de responsabilidades para estas, y provisiones para asegurar que las labores se lleven a cabo de manera efectiva.

Se debe garantizar un espacio adecuado para llevar a cabo el proyecto, incluyendo áreas para almacenamiento de materiales, equipos y

maquinaria, así como acceso suficiente para la movilización de vehículos y el ingreso de personal.

Se debe detallar también las cantidades de material a tratar o el área a cubrir diaria o semanalmente, y la gestión de residuos y limpieza durante las labores de remediación y/o manejo. Finalmente, se deben considerar determinar provisiones de seguridad y para protección del medio ambiente.

7.3.2 Permisos y regulaciones

Una de las primeras consideraciones dentro del ámbito de los permisos y regulaciones relacionadas con la remediación y manejo de suelos es entender la multiplicidad de actores institucionales que puede relacionarse con estos procesos, según sean las características propias de cada sitio contaminado. Algunas instituciones a considerar, como también las normativas que emanan de estas, son el Ministerio de Medio Ambiente, Servicio de Evaluación Ambiental, Superintendencia de Medio Ambiente, Servicio Nacional de Geología y Minería, Ministerio de Salud y Municipalidades.

Dentro del marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) los proyectos de saneamiento ambiental, que pueden asimilarse a procesos de remediación, se ven actualmente indicados en el literal o.11), que corresponde a la “Reparación o recuperación de áreas que contengan contaminantes, que abarquen, en conjunto, una superficie igual o mayor a diez mil metros cuadrados (10.000 m²), salvo que se trate de medidas que formen parte de una propuesta de plan de reparación a que se refiere el artículo 43 de la Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente (...)”. Este corresponde a un punto de partida en el cumplimiento de normativas ambientales en Chile y, por lo tanto, dentro de la evaluación de las alternativas de remediación o manejo, se debe considerar si se requiere o no realizar una evaluación de impacto ambiental, ingresando al SEIA.

Por otro lado, el manejo de residuos peligrosos en Chile se encuentra normado y regulado por el D.S. 148/2003 del Ministerio de Salud, que corresponde al Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. Este reglamento busca establecer las condiciones de seguridad y sanitarias mínimas que deberá cumplir cualquier proceso que genere, almacene, transporte, trate, reutilice, recicle, disponga o elimine residuos peligrosos. Este reglamento es una guía esencial que debe cumplirse dentro de los procesos de remediación de sitios contaminados.

No obstante lo anterior, se deberá dar cumplimiento a todo permiso y regulación que la autoridad competente o la legislación vigente considere necesaria.



7.3.3 Cronograma

Se debe establecer un cronograma realista que incluya todas las etapas del proceso, desde la preparación del sitio hasta la validación de la remediación o manejo. También se debe indicar la frecuencia del seguimiento de las medidas de manejo, posterior a la finalización del proceso. La coordinación correcta de las actividades es esencial para mantener la eficiencia y eficacia del proceso.

7.3.4 Costos

Se debe proveer de un costo estimado para las labores de remediación y/o manejo, lo que incluye la implementación, además de las etapas posteriores de validación y seguimiento. Se reconoce que estos costos pueden variar, toda vez que pueden descubrirse nuevas fuentes de contaminación o esta no comportarse tal como se planeaba, lo que haría necesario un ajuste de las medidas o extensión del área a tratar.

7.3.5 Monitoreo

Se debe considerar el monitoreo del desempeño de las acciones de remediación mientras estas se llevan a cabo, siempre que sea aplicable. En este sentido, un proceso de extracción y disposición de material posiblemente no requerirá de monitoreo continuo, pero uno de biorremediación por pilas sí lo requerirá. En este punto, es esencial

determinar las variables a monitorear, las que naturalmente se referirán a los contaminantes que están siendo remediados, pero también a aquellos parámetros que sean indicadores de efectividad, o de la necesidad de optimizar la metodología mientras esta se implementa.

Adicionalmente, se puede establecer monitoreo para evaluar el potencial de afectación en sectores cercanos al área del proyecto por las mismas labores de remediación. Esto incluye, por ejemplo, el monitoreo de calidad de aire en un proyecto de remediación o manejo que requiera de movimiento de maquinarias que pueda emitir polvo contaminado proveniente del sitio. Para mayor información con respecto a los métodos de muestreo, se puede ver la Parte 3 – Anexo 4 de esta Guía.

7.3.6 Validación y seguimiento

Se debe considerar la manera en que se va a evaluar el desempeño de las acciones de remediación y/o manejo. Esto es similar al establecimiento de un monitoreo, pero en el caso de la validación corresponde al muestreo final realizado para probar que las medidas han tenido efecto y el sitio es apto para el uso propuesto. Para esto, se analizan las concentraciones de contaminantes en las matrices muestreadas y se verifica que no sobrepasen los niveles objetivo de remediación definidos previamente.

Por otra parte, el seguimiento solo es necesario en el caso del manejo de un sitio, e incluye medidas que pueden ir desde un monitoreo ambiental, a una inspección visual de la cobertura de un sistema de contención. Ambos aspectos se detallan en la Sección 7 y 7, respectivamente.

7.3.7 Comunicación del riesgo y participación ciudadana

Se deben considerar aspectos relacionados con la comunicación del riesgo y participación ciudadana según los lineamientos del Ministerio del Medio Ambiente. Lo anterior es de especial relevancia en el caso de los procesos de manejo, donde se requerirán acciones de seguimiento y el establecimiento de ciertas restricciones en el uso del sitio, por lo que debe realizar un plan de comunicación y capacitación a los futuros usuarios de este. Se provee mayor información con respecto a esto en la Parte 3 – Anexo 10 de esta Guía.

7.4 Estructura del plan de remediación y/o manejo

A continuación, se detalla una lista de las secciones mínimas que debe contener un plan de remediación o manejo:

1. Descripción del sitio y antecedentes: Resumen detallado de la ubicación, historia, condiciones actuales y eventos significativos relacionados con el sitio contaminado.

2. Modelo conceptual del sitio: Representación teórica que ilustra la fuente de contaminantes, las vías de exposición y los receptores potenciales.

3. Objetivos de remediación y/o manejo: Definición clara de los resultados deseados que se deben lograr a través del proceso de remediación y/o manejo, incluyendo la protección de la salud humana y el medio ambiente.

4. Dimensión de la superficie contaminada: Cuantificación de la extensión (horizontal y vertical) y gravedad de la contaminación para determinar el alcance de las acciones de remediación necesarias.

5. Evaluación de opciones de remediación y/o manejo: Enumeración de estrategias y tecnologías posibles para abordar la contaminación, con sus ventajas, desventajas, estudios adicionales y evaluación considerando los aspectos previamente definidos en esta guía.

6. Opción de remediación seleccionada: Identificación de la estrategia específica elegida entre las opciones disponibles, justificando la elección.

7. Método de remediación o manejo: Descripción completa del proceso, técnicas y tecnologías utilizadas para eliminar, reducir o controlar la contaminación en el sitio.

8. Planificación de la remediación o manejo: Definición de la planificación de las acciones necesarias para la implementación de la remediación y/o manejo, indicando plazos relevantes y cronograma tentativo.

9. Costos de remediación o manejo: Estimación detallada de los costos asociados al proceso de remediación o manejo de la estrategia seleccionada, considerando costos a corto y largo plazo.

10. Monitoreo: Evaluación del desempeño de las medidas de remediación y/o manejo durante su implementación y parámetros de cumplimiento.

11. Muestreo de validación: Procedimiento de muestreo y análisis utilizado para verificar que se alcanzan los estándares de limpieza ambiental y se logra la remediación deseada.

12. Medidas de seguimiento (manejo): Definición de las medidas que se realizarán para asegurar que el manejo se mantiene efectivo en el tiempo, además de la frecuencia y criterios de cumplimiento.

13. Comunicación del riesgo: Definición de estrategia de comunicación del riesgo a actores relevantes (ej. comunidades cercanas) y aspectos de participación ciudadana donde sean aplicables.

7.5 Implementación de la remediación y/o manejo

La etapa de ejecución de la remediación o manejo del sitio se apoya en la base establecida por el plan de remediación y/o manejo previamente definido. Estos planes actúan como hojas de ruta detalladas que guían las actividades de remediación y manejo, asegurando un enfoque sistemático y efectivo en la restauración del suelo.

En esta etapa, se pone en práctica el diseño técnico concebido durante la fase de planificación, con un énfasis en el monitoreo constante del progreso. Esto implica la supervisión continua de las acciones implementadas y la evaluación de su efectividad para alcanzar los objetivos de remediación establecidos. Además, se reconoce la importancia de la flexibilidad, ya que se pueden requerir ajustes en el plan en función de la evolución de las condiciones en el sitio y los resultados obtenidos.

Se debe contemplar también la posibilidad de hallazgos inesperados, como una extensión mayor de la contaminación o un desempeño de la tecnología diferente a lo planeado. En este caso, se debe realizar un ajuste al plan de remediación y/o manejo, actualizando los métodos utilizados, los recursos, además de los tiempos y costos. Se debe evaluar también si esta actualización implica otros permisos o trae consigo otros impactos durante la ejecución.

Es muy importante que se comunique a los usuarios del sitio de la existencia de un plan de manejo, y que los resultados del seguimiento puedan estar disponibles para ellos.



8 Validación de la remediación y/o manejo

El proceso de validación en un proyecto de remediación y/o manejo de suelos se refiere a la evaluación y confirmación de que las medidas y acciones de remediación implementadas han tenido éxito en la eliminación o reducción de la contaminación del suelo a niveles seguros o aceptables. La validación es una etapa crucial en el ciclo de vida de un proyecto de remediación o manejo de suelos y se lleva a cabo para garantizar que se han alcanzado los objetivos de limpieza y que el sitio está listo para su uso previsto o su restauración ambiental.

El proceso de validación puede tomar diferentes formas, pero siempre requerirá de algún tipo de muestreo de la o las matrices que han sido remediadas. Este muestreo debe ser realizado según la tecnología de remediación que se esté efectuando.

Los aspectos más importantes de un proceso de validación se resumen a continuación.

8.1 Planificación

Se definen los criterios específicos que deben cumplirse para considerar el sitio como remediado o manejado, y se revisa y organiza toda la información disponible sobre la contaminación del sitio, incluyendo evaluaciones previas y planes de remediación.

8.2 Diseño del programa de validación

Se seleccionan las técnicas y métodos de validación adecuados para el sitio y sus contaminantes específicos. Esto puede incluir muestreo y análisis químico de suelos, agua subterránea, aire, pruebas de calidad del aire interior, etc. Con respecto a los métodos de muestreo, estos se pueden revisar en la Parte 3 – Anexo 4 de esta guía.

Adicionalmente, se definen los puntos de muestreo y las frecuencias de muestreo necesarias, por ejemplo, si es una excavación de material contaminado, entonces se requerirá de un muestreo de las paredes y la base de la excavación. Adicionalmente, si se importase material

al sitio (incluso desde otra parte de este, para utilizar como relleno, por ejemplo), se debiese muestrear este material. Se recomienda una densidad de muestreo aproximada de una muestra de suelo cada 25m² en excavaciones (base y paredes), y de una muestra cada 100 m³ de material importado. Por otra parte, si se tratase de remediación de aguas subterráneas, entonces naturalmente el muestreo será de esta matriz, y en general se deberá realizar cada 3 a 6 meses (frecuencia), en al menos dos ocasiones (eventos de muestreo).

8.3 Implementación

Se realizan los muestreos y pruebas según el programa de validación diseñado, y se registra cuidadosamente los datos recopilados, incluyendo coordenadas geoespaciales, fechas, tipos de muestras y resultados.

8.4 Análisis de datos

Se evalúan los resultados del muestreo en relación a los criterios de remediación o manejo establecidos en la fase de planificación y se realiza un análisis estadístico para determinar si los valores medidos están dentro de los límites aceptables.

8.5 Interpretación de los resultados

Basándose en los resultados del análisis de datos, se determina si se han alcanzado los objetivos de remediación o manejo. Si los resultados son satisfactorios, se da el sitio por remediado. Si no lo son, se debe identificar las áreas que requieren una remediación adicional y desarrollar un plan para abordarlas (sección siguiente).

8.6 Remediación o manejo adicional

Si se determina que la remediación o manejo del sitio no ha tenido éxito, se deben implementar medidas adicionales, que pueden incluir la extracción de una mayor cantidad de suelos contaminados, la inyección de productos químicos, la construcción de barreras, entre otros. Esto implica el desarrollo de un nuevo plan de remediación.

8.7 Validación repetida

Después de la implementación de medidas adicionales, se debe repetir el proceso de muestreo y validación para asegurarse de que los cambios han tenido el efecto deseado y que se han cumplido los criterios establecidos.

8.8 Documentación final

Una vez que se han alcanzado los objetivos de remediación o manejo, se debe preparar un informe de validación que documente todo el proceso,

incluyendo las acciones de remediación, los métodos utilizados y los resultados de los muestreos.

8.9 Certificación, cierre y seguimiento

Si el informe de validación demuestra que el sitio está remediado, esto respaldaría su uso previsto y se cerraría el proceso. En el caso de haber implementado una medida de manejo, es importante mantener un monitoreo a largo plazo (dentro de un proceso de seguimiento, ver Sección 8) para asegurarse de que no se produzcan reincidencias de contaminación. Lo anterior puede incluir muestreo de matrices relevantes o una inspección del sitio para verificar que las medidas de manejo están operativas y siguen siendo eficaces. Se debe, además, establecer una frecuencia apropiada para el seguimiento de las medidas de manejo.

9 Seguimiento de medidas de manejo

El proceso de seguimiento se realiza únicamente cuando se ha optado por realizar un manejo del sitio, vale decir, cuando no se ha retirado o destruido los contaminantes, sino que se ha optado por controlar la ruta de exposición mediante diferentes medidas, y así disminuir o eliminar el riesgo que estos puedan ocasionar. Este proceso, en general, consta de los mismos aspectos que la validación, vale decir:

- Planificación
- Diseño del programa de seguimiento
- Implementación
- Análisis de datos
- Interpretación de resultados
- Manejo adicional (medidas correctivas)
- Seguimiento repetido
- Documentación y recomendaciones

La diferencia principal con respecto al proceso de validación será que el seguimiento deberá ser realizado de manera continua, hasta que el sitio sea remediado en su totalidad. Otra diferencia con respecto a la validación es que esta se refiere principalmente al cumplimiento de valores objetivo (vale decir, que las concentraciones de los analitos de interés estén bajo un cierto umbral), mientras que el seguimiento puede

contemplar acciones variadas, tales como revisión de la integridad de una cobertura o estructura, revisión de grietas en suelos cercanos, inspección de condiciones ambientales generales, además del mismo cumplimiento de ciertos valores objetivo establecidos (de ser apropiados para el manejo realizado).

Es muy importante también que se mantenga el uso del suelo para el cual se validó el manejo, ya que cualquier cambio deberá considerar una revisión del plan de manejo para asegurar que este sigue siendo válido para el nuevo uso. Lo mismo aplica para modificaciones en la configuración del sitio, especialmente aquellas acciones que impliquen un movimiento de tierra, demoliciones, cambio de cobertura y estructuras en el sitio, entre otras.

Como se ha mencionado en la Sección 6.5, es muy importante que se comunique a los usuarios del sitio la existencia de un plan de manejo, y que los resultados del seguimiento puedan estar disponibles para ellos.



GUÍA METODOLÓGICA PARA LA

Gestión de **sitios** **Contaminados**