



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Guía básica para caracterizar sitios contaminados

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Víctor Manuel Sánchez Granados

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Gabriel Salinas Calleros



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

A
Yolanda Granados Becerril
Mi Madre

Para mi Padre
Víctor Manuel Sánchez Esquivel

Para Arlaé, mi idea de lo hermoso.
Mi brillante y maravillosa esposa, sin quien nada de esto sería
posible.

San, tú que me has enseñado lo contrario a desaparecer, considera esta conclusión tardía como ejemplo del viaje que debes continuar con perseverancia; ¡siempre al alba San! Te prometo prodigios y presagios. Lograrás, estoy seguro, hazañas inéditas.

A GEOLYMA, sin la cual habría podido acabar esta tesis treinta años antes.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Ing. Gabriel Salinas Calleros, por el interés y apoyo que ha brindado a este trabajo; y por su dirección, lo que ha facilitado el buen término de esta tesis.

Agradezco a todos y cada uno de los sinodales; M.ED. Miguel Ildfonso Vera Ocampo, Ing. Gabriel Salinas Calleros, M.C. Emiliano Campos Madrigal, Ing. Javier Arellano Gil y la sinodal M.I. Ana Alejandrina Castro Rodriguez, por la revisión que han realizado de este texto, por el respeto a mis opiniones, por sus orientaciones y sus valiosas sugerencias.

Todo resultado es siempre consecuencia de ideas y esfuerzos previos que corresponden a otras personas y, sin duda, el impulso y motivación de profesores entusiastas de la Geología como los ingenieros Miguel Vera y Emiliano Campos, me mantuvieron con la perseverancia necesaria para concluir esta etapa.

De manera especial, un agradecimiento personal y mi admiración al M.ED. Miguel Ildfonso Vera Ocampo, cuyo apoyo y amabilidad fueron fundamentales en mi formación universitaria.

“... el mundo es cada vez más inhabitable. La contaminación es real, material... Pero esa contaminación física es sólo un reflejo, una metáfora de otra corrupción”.

Juan José Arreola

Nada es mío, todo lo recibimos de los otros, de lo otro. La lluvia, el calor, el alimento, el agua, el suelo, están fuera de nosotros. El cariño lo dan los otros, y el conocimiento se construye con lo y los otros. No somos individuos, somos un ecosistema, comunidad, sociedad, humanidad.

A pesar de que la Geología (una ciencia de ciencias) es fundamental para la sociedad, los temas geológicos no están bien identificados por las personas en general y hay ignorancia de estas materias por quienes toman decisiones a nivel público y privado, lo que al final cuesta dinero y vidas por decisiones incorrectas.

Siempre se nos busca para que expliquemos, a posteriori, las razones de terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas, erosiones, deslizamientos, hundimientos o colapsos del terreno. O las perentorias, como los recursos geológicos y las aguas subterráneas; en lugar de hablar de cómo planificar correctamente el uso de los recursos o cómo prevenir los riesgos.

La Geología sigue siendo una ciencia relativamente desconocida, por lo que se hace necesario insistir en la importancia de las geólogas y los geólogos en la sociedad.

La revolución será con geólog@s o no será.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MARCO JURÍDICO Y REQUERIMIENTOS ADMINISTRATIVOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS.....	6
2.1 DISPOSICIONES GENERALES EN LA LGPGIR.....	6
2.2 DEFINICIONES DE LA LGPGIR CON RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS.....	7
2.3 TIPOS DE SITIOS CONTAMINADOS DE ACUERDO CON EL REGLAMENTO DE LA LGPGIR.....	10
2.4 REQUERIMIENTOS ADMINISTRATIVOS PARA EMERGENCIAS AMBIENTALES.....	12
2.5 REQUERIMIENTOS ADMINISTRATIVOS PARA PASIVOS AMBIENTALES.....	14
2.6 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LINEAMIENTOS PARA EL MUESTREO EN LA CARACTERIZACIÓN Y ESPECIFICACIONES PARA LA REMEDIACIÓN.....	17
2.7 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. QUE ESTABLECE CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CONCENTRACIONES DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR ARSÉNICO, BARIO, BERILIO, CADMIO, CROMO HEXAVALENTE, MERCURIO, NÍQUEL, PLATA, PLOMO, SELENIO, TALIO Y/O VANADIO.....	19
2.8 NORMA MEXICANA NMX-AA-132-SCFI-2016. MUESTREO DE SUELOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LA CUANTIFICACIÓN DE METALES Y METALOIDES, Y MANEJO DE LA MUESTRA.....	22
2.9 ESTUDIOS Y ETAPAS PARA LA REMEDIACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO.....	24
2.10 NIVELES DE LIMPIEZA.....	25
3. MODELO CONCEPTUAL.....	29
3.1 ¿QUÉ ES UN MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO (MCS)?.....	30
3.2 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO (MCS).....	31
3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL ALCANCE DEL MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO.....	32
3.2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	32
3.2.3 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES POTENCIALES.....	33
3.2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA(S) FUENTE(S) DE CONTAMINACIÓN.....	34
3.2.5 RUTAS DE MIGRACIÓN.....	35
3.2.5.1 SUELO Y SUBSUELO.....	36
3.2.5.2 AGUA SUBTERRÁNEA.....	37
3.2.5.3 AGUA SUPERFICIAL.....	38
3.2.5.4 SEDIMENTOS.....	40
3.2.5.5 AIRE.....	40
3.2.6 IDENTIFICACIÓN DE RECEPTORES HUMANOS Y ECOLÓGICOS.....	41
3.2.7 DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	42
3.2.8 DESCRIPCIÓN NARRATIVA.....	43
3.3 APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE SITIO.....	43
4. CONTAMINANTES.....	44
4.1 METALES PESADOS.....	44
4.1.1 DINÁMICA DE LOS METALES PESADOS EN EL SUELO.....	46
4.1.2 RIESGOS.....	46
4.1.2.1 TOXICIDAD.....	47

4.1.2.2	PH.....	47
4.1.2.3	TEXTURA.....	48
4.1.2.4	MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS.....	48
4.1.2.5	MATERIA ORGÁNICA.....	48
4.1.2.6	CAPACIDAD DE CAMBIO.....	49
4.1.2.7	CONDICIONES REDOX.....	49
4.1.2.8	ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS DE FE Y MN.....	50
4.1.2.9	CARBONATOS.....	51
4.1.2.10	SALINIDAD.....	51
4.1.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES PESADOS MÁS IMPORTANTES.....	51
4.2	HIDROCARBUROS.....	54
4.3	PESTICIDAS Y PLAGUICIDAS.....	57
4.4	BIFENILOS POLICLORADOS O POLICLOROBIFENILOS (PCB ´S).....	59
4.5	DIOXINAS Y FURANOS.....	60
5.	CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.....	61
5.1	PLAN DE MUESTREO PARA SUELO.....	63
5.2	CARACTERIZACIÓN EXPLORATORIA.....	64
5.2.1	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	64
5.2.1.1	ZONAS SIN INDICIO O RIESGO MÍNIMO DE CONTAMINACIÓN.....	65
5.2.1.2	ZONAS CON RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ORIGEN CONOCIDO.....	66
5.2.1.3	ZONAS CON POSIBILIDAD DE CONTAMINACIÓN DE ORIGEN DIFUSO O NO CONOCIDO.....	68
5.2.2	SELECCIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE MUESTREO.....	70
5.2.3	MUESTRAS SIMPLES Y MUESTRAS COMPUESTAS.....	74
5.2.4	MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	76
5.3	CARACTERIZACIÓN DE DETALLE.....	77
5.3.1	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	77
5.3.1.1	ZONAS CON RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ORIGEN CONOCIDO.....	77
5.3.1.2	ZONAS CON POSIBILIDAD DE CONTAMINACIÓN DE ORIGEN DIFUSO O NO CONOCIDO.....	77
5.3.1.3	DELIMITACIÓN DE LA EXTENSIÓN EN SUPERFICIE DE LA CONTAMINACIÓN.....	78
5.3.2	SELECCIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE MUESTREO.....	79
5.3.3	MUESTRAS SIMPLES Y MUESTRAS COMPUESTAS.....	80
5.3.4	PLAN DE MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	80
5.4	CONTROL DE CALIDAD DEL MUESTREO.....	81
5.4.1	CADENAS DE CUSTODIA Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS.....	83
5.5	ENSAYOS ANALÍTICOS PARA REALIZAR EN LA CARACTERIZACIÓN.....	86
5.5.1	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS ANALÍTICOS.....	86
5.5.2	CALIDAD DE LOS ENSAYOS.....	87
5.6	MEDICIONES Y PRUEBAS A REALIZAR EN LA CARACTERIZACIÓN.....	88
5.6.1	MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	88
5.6.2	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LA ZONA SATURADA.....	89
5.6.3	OTROS ENSAYOS ADICIONALES.....	90
5.7	USO Y CONTROL DE EQUIPOS ÚTILES PARA LA CARACTERIZACIÓN.....	91
5.7.1	DETECTOR DE FOTOIONIZACIÓN (PID).....	92
5.7.2	pHMETRO-CONDUCTIVÍMETRO.....	94
5.7.3	SONDA DE INTERFASE.....	95
5.7.4	ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	96
5.8	MÉTODOS DE PERFORACIÓN.....	98
5.9	INSTALACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE POZOS DE MONITOREO.....	103
5.9.1	CRITERIOS DE DISEÑO DEL POZO DE MONITOREO.....	104
5.9.2	INSTALACIÓN DEL POZO DE MONITOREO.....	108
5.9.3	DESARROLLO DEL POZO DE MONITOREO.....	109
6.	HERRAMIENTAS PARA LA CARACTERIZACIÓN.....	112
7.	CONCLUSIONES.....	115

GLOSARIO	117
REFERENCIAS.....	119

RESUMEN

En la presente “Guía básica para caracterizar sitios contaminados” se describen de forma simplificada los requisitos reglamentarios y normativos que se solicitan para elaborar una caracterización. Asimismo, se proporciona la información mínima necesaria para que el estudio de caracterización cuente con los elementos técnicos suficientes que permitan evaluar correctamente un predio contaminado o potencialmente contaminado, enfatizando que es necesaria la comprensión profunda de las condiciones del subsuelo para elaborar una caracterización. La guía destaca por su importancia, el modelo conceptual y plan de muestreo.

Un propósito significativo de esta guía, es poner a disposición de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Geológica los fundamentos necesarios para que puedan identificar, describir e interpretar las características de un sitio y del subsuelo donde se sospecha o se conoce que existe contaminación por residuos o materiales peligrosos, aprovechando los conocimientos y habilidades que tiene el estudiante.

Finalmente, la guía proporciona una serie de enlaces para tener acceso a herramientas útiles para sustentar y fortalecer el modelo conceptual del sitio (MCS) y, en consecuencia, el estudio de caracterización y la propuesta de remediación que se proponga, con la particularidad que todas estas herramientas necesitan para su uso y aplicación, el conocimiento geológico e hidrogeológico del sitio.

ABSTRACT

This “Basic guide to characterize contaminated sites” describes in a simplified manner the regulatory and normative requirements requested to prepare a characterization. Likewise, the minimum necessary information is provided so that the characterization study has sufficient technical elements to correctly evaluate a contaminated or potentially contaminated property, emphasizing that a deep understanding of the subsoil conditions is necessary to elaborate a characterization. Stands out for its importance, the Conceptual Model and Sampling Plan.

A significant purpose of this guide is to provide Geological Engineering students with the necessary foundations so that they can identify, describe and interpret the characteristics of a site and the subsoil where contamination by waste or contamination is suspected or known to exist hazardous materials, taking advantage of the knowledge and skills that the student has.

Finally, the guide provides a series of links to access useful tools to support and strengthen the Conceptual Model of the Site and, consequently, the Characterization Study and the Remediation Proposal that is proposed, with the particularity that for their use and application, these tools require geological and hydrogeological knowledge of the site.

1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo es presentar información básica para planear y realizar investigaciones de sitios contaminados. Se proporciona el marco reglamentario en México y los criterios de carácter técnico para la realización de exploraciones de sitios potencialmente contaminados y pautas sobre las distintas fases de la investigación del suelo y subsuelo, y el agua subterránea asociada, con énfasis en aspectos relativos al modelo conceptual y plan de muestreo, pero también considera las mediciones de campo, técnicas de perforación, instalación de pozos de monitoreo, toma de muestras, conservación de las mismas y ensayos analíticos.

Otro objetivo de esta guía es ofrecer a las y los estudiantes de la carrera de Ingeniería Geológica que estén interesados en desarrollarse en la caracterización y remediación de sitios contaminados, la información necesaria para que puedan identificar, describir e interpretar las características del sitio y del subsuelo donde se sospecha o se conoce que existe contaminación por residuos o materiales peligrosos.

La caracterización del sitio es el proceso de desarrollar una comprensión de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio, y en muchos casos las condiciones del subsuelo modificadas por el hombre (por ejemplo, servicios públicos, estructuras, minas y túneles) que pueden afectar las condiciones del sitio; además de evaluar espacial y temporalmente los contaminantes presentes en el subsuelo.

La caracterización es el primer paso para llevar a cabo la gestión de un sitio contaminado, lo que incluye acciones para reducir o eliminar la exposición de los seres humanos y el medio a los contaminantes. Asimismo, proporciona información necesaria y suficiente para establecer reglas de ordenamiento territorial de acuerdo con el riesgo presente en el sitio. La decisión sobre el uso del sitio requiere una evaluación y un seguimiento exhaustivo para garantizar que no exista ningún riesgo residual para la salud humana y el ambiente.

Como resultado de un estudio de caracterización se incluyen las siguientes acciones a tomar (Secretariat of the Minamata Convention on Mercury, 2019):

1. La remediación del suelo y subsuelo, incluyendo el tratamiento del agua contaminada, mediante técnicas que garanticen la salvaguarda de la salud humana y no afectación de los elementos ambientales.
2. Restringir el acceso al sitio para limitar la exposición directa o definir restricciones sobre cualquier actividad que podría movilizar el agente contaminante en el sitio.
3. Si no hay peligro inmediato para la población local y el medio ambiente, se puede considerar adecuado aislar la contaminación en el sitio con una instalación de contención para una remediación posterior. En tales circunstancias, la contaminación del sitio debe ser monitoreada periódicamente para asegurar que no esté migrando fuera del sitio o desarrollando el potencial de afectar el medio ambiente más allá de los límites del sitio.

4. Finalmente, con el conocimiento del sitio (caracterización) y con las acciones que deriven, se debe elaborar un plan de manejo del sitio y mantener la información sobre el estado del predio disponible para futuros usuarios.

En muchos casos, se ha demostrado que la mayoría de las fallas en la remediación de sitios contaminados son causadas por no comprender adecuadamente las condiciones que pueden afectar el proyecto. Estas fallas podrían haberse evitado enfocando la atención en las condiciones geológicas e hidrogeológicas. Las rutas preferenciales y las heterogeneidades ya sean artificiales o naturales, definen la migración de los contaminantes en la zona vadosa y saturada, por lo que es fundamental tener una comprensión completa y detallada del subsuelo.

Todos estos conceptos solamente los pueden desarrollar profesionistas que hayan tenido una formación geológica e hidrogeológica; por lo que un geólogo o hidrogeólogo debe ser el líder en los proyectos de caracterización y remediación de sitios contaminados, o al menos, ser parte esencial del grupo de trabajo.

2. MARCO JURÍDICO Y REQUERIMIENTOS ADMINISTRATIVOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS.

2.1 Disposiciones generales en la LGPGIR.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se publicó en el año 2003. Esta Ley establece en su Artículo 1 las bases legales para la prevención de la contaminación de sitios con materiales y residuos peligrosos y su remediación. Las disposiciones generales son las siguientes:

- a) Aplicar los principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, los que deben de considerarse en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos.
- b) Determinar los criterios que deberán de ser considerados en la generación y gestión integral de los residuos, para prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y la protección de la salud humana.
- c) Establecer los mecanismos de coordinación que, en materia de prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de residuos, corresponden a la Federación, las entidades federativas y los municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX-G de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

- d) Crear un sistema de información relativa a la generación y gestión integral de los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial, así como de sitios contaminados y remediados.
- e) Prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como definir los criterios a los que se sujetará su remediación.
- f) Establecer medidas de control, medidas correctivas y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones que correspondan.

Estas disposiciones dejan claro que entre los objetivos de la Ley se encuentran la prevención de la contaminación de sitios con residuos peligrosos, así como su remediación.

2.2 Definiciones de la LGPGIR con respecto a la caracterización de sitios contaminados.

En el Artículo 5 de la Ley, se define el término “Caracterización de sitios contaminados” y algunos términos estrechamente ligados a este concepto: evaluación de riesgos ambientales, remediación, sitio contaminado, lixiviado, remediación y vulnerabilidad, que requieren ser considerados para determinar el objetivo y elementos que deben constituir a los estudios de caracterización.

En la fracción III del artículo 5 de la LGPGIR se define la caracterización de un sitio contaminado como: *“la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación”*.

Esta definición implica conocer el sitio en el que se realizará la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes y requiere tener un método para estimar los riesgos.

En la fracción VII del artículo 5 de la LGPGIR se define la evaluación del riesgo ambiental como el *“Proceso metodológico para determinar la probabilidad o posibilidad de que se produzcan efectos adversos, como consecuencia de la exposición de los seres vivos a las sustancias contenidas en los residuos peligrosos o agentes infecciosos que los forman”*.

Esta definición señala que es necesario conocer la exposición (de manera cuantitativa) a los contaminantes como base para evaluar si existen efectos adversos al medio ambiente o la salud humana. Asimismo, señala que debe existir la base necesaria para calcular la probabilidad o posibilidad de un efecto adverso.

En la fracción XL del artículo 5 de la LGPGIR se define a un sitio contaminado como el *“lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas”*.

Esta definición aporta los elementos físicos de un sitio para los que deben determinarse los elementos cuantitativos anteriormente referidos (la extensión de la contaminación y la exposición) y señala para quiénes deben ser determinados:

1. Los seres humanos,
2. Los organismos vivos y
3. El aprovechamiento de los recursos naturales.

La caracterización de un sitio contaminado en su calidad de tarea preliminar a la remediación debe (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010):

- a) Proporcionar datos cuantitativos de los contaminantes presentes en los distintos elementos del sitio contaminado (suelo, agua, aire, instalaciones o combinaciones de ellos).
- b) Proporcionar el tipo de los contaminantes presentes en el sitio contaminado.
- c) Proporcionar información acerca de si estos contaminantes provienen de materiales o residuos peligrosos.

- d) Proporcionar información sobre las cantidades de contaminantes, sus características (toxicidad, peligrosidad, etc.), su distribución y rutas de exposición.
- e) Proporcionar la base para estimar los riesgos que dichos contaminantes implican para el medio ambiente (recursos naturales y organismos vivos) y la salud humana y en términos generales debe proporcionar información acerca del daño generado por los contaminantes presentes en el sitio contaminado.

2.3 Tipos de sitios contaminados de acuerdo con el Reglamento de la LGPGIR.

Para manejar de una manera modular la información de acuerdo con el tipo y causa de contaminación de un sitio, se atiende la clasificación de sitios contaminados establecida en el Reglamento de la LGPGIR en:

Emergencia Ambiental. Sitio contaminado por un evento súbito o accidente.

Pasivo Ambiental. Sitio contaminado que no ha sido atendido en tiempo y forma, cuya contaminación se originó en un largo periodo por la falta de un manejo adecuado de materiales y residuos peligrosos y/o por la falta de acciones correctivas en dicho manejo.

En el Reglamento de la LGPGIR se señala el contenido de información de un estudio de caracterización en los artículos 138 y 139. Los documentos anexos de un programa de remediación, los que son concomitantes con la caracterización de un sitio, están señalados en los artículos 135 y 136 que se encuentran conectados en paralelo con los artículos antes mencionados.

Para una emergencia ambiental, aplican los artículos 138 (requisitos) y 135 (documentos anexos al programa de remediación).

Para un pasivo ambiental, aplican en conjunto los artículos 138 y 139 (requisitos) y además los artículos 135 y 136 (documentos anexos al programa de remediación).

En ambos casos se requiere atender de manera obligatoria lo señalado en el artículo 137 con respecto a los requisitos a cumplir para el responsable técnico.

Es importante mencionar que el trámite que se realiza es la “Evaluación de la propuesta del programa de remediación”, ya sea ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) o ante la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), ésta última, en caso de que los contaminantes sean hidrocarburos. Es decir, la autoridad ambiental no evalúa estudios de caracterización, sino la propuesta del programa de remediación de un sitio contaminado, cuyo sustento técnico es el estudio de caracterización; de esta manera, en caso de que el resultado de un estudio de caracterización sea que el sitio no está contaminado, no se requiere ingresarlo para su evaluación, solamente se le informa a la autoridad del resultado.

2.4 Requerimientos administrativos para emergencias ambientales.

A continuación, se listan los requisitos administrativos para realizar el trámite correspondiente de emergencias ambientales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010).

1. Los datos generales del responsable de la contaminación.
2. Actividad del responsable de la contaminación.
3. El lugar y fecha en que ocurrió la emergencia.
4. Nombre y firma del representante legal (en su caso).
5. Domicilio para recibir notificaciones.
6. La ubicación del sitio contaminado.
7. Descripción del sitio contaminado.
8. Uso actual del sitio contaminado.
9. Ubicación de los cuerpos de agua en el lugar.
10. Si la autoridad del agua (por ejemplo, la Comisión Nacional del Agua) fue informada de algún daño a los cuerpos de agua.
11. El tipo de contaminante liberado al ambiente.
12. Cantidad de contaminante liberado al ambiente.
13. Área de suelo dañado.
14. Volumen de suelo dañado.
15. El plan de muestreo que prevean las Normas Oficiales Mexicanas. En caso de no existir Norma Oficial Mexicana, debe atenderse lo señalado en el artículo Décimo Transitorio del Reglamento de la LGPGIR en lo referente al plan de muestreo.
16. Los resultados de las determinaciones analíticas de los contaminantes en las muestras de suelos, mostrando los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.

17. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas químicas, practicadas a las muestras que muestren los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
18. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas físicas, practicadas a las muestras con los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
19. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas biológicas, practicadas a las muestras que incluyan los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
20. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas mecánicas, practicadas a las muestras que exhiban los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
21. Los datos del o los responsables técnicos de la caracterización.
22. Los hechos o razones que dan motivo a la petición.

Y los documentos anexos para las emergencias ambientales son los siguientes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010):

1. Planos del lugar a una escala tal que permita apreciar la información requerida, georreferenciados con coordenadas UTM y orientación geográfica, donde se muestren topografía, cuerpos de agua superficiales, puentes y caminos de acceso, las áreas dañadas de suelo y los puntos de muestreo, con las mismas denominaciones que se indican en los resultados de las determinaciones analíticas del contaminante.
2. Documento comprobatorio de la cadena de custodia de las muestras.
3. Planos isométricos de concentraciones y migración del contaminante en suelo y subsuelo.
4. Memoria fotográfica descriptiva del sitio.

5. La memoria fotográfica de los trabajos de caracterización efectuados.
6. Los informes de resultados de laboratorio.

2.5 Requerimientos administrativos para pasivos ambientales.

A continuación, se listan los requisitos administrativos para realizar el trámite correspondiente de pasivos ambientales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010).

1. Los datos generales del responsable de la contaminación.
2. Actividad del responsable de la contaminación.
3. Resultados de las investigaciones históricas.
4. Nombre y firma del representante legal (en su caso).
5. Domicilio para recibir notificaciones.
6. La ubicación del sitio contaminado.
7. Descripción del sitio contaminado.
8. Uso actual del sitio contaminado.
9. Ubicación de los cuerpos de agua en el lugar.
10. Si la autoridad del agua fue informada de algún daño a los cuerpos de agua.
11. El tipo de contaminante liberado al ambiente.
12. Cantidad de contaminante liberado al ambiente.
13. Área de suelo dañado.
14. Volumen de suelo dañado.
15. El plan de muestreo que prevean las Normas Oficiales Mexicanas. En caso de no existir Norma Oficial Mexicana, debe atenderse lo señalado en el artículo Décimo Transitorio del Reglamento de la LGPGIR en lo referente al plan de muestreo.

16. Los resultados de las determinaciones analíticas de los contaminantes en las muestras de suelo, con los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
17. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas químicas, practicadas a las muestras que incluyan los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
18. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas físicas, practicadas a las muestras que muestren los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
19. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas biológicas, practicadas a las muestras que exhiban los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
20. En su caso, los resultados de los análisis y pruebas mecánicas, practicadas a las muestras que denoten los valores superficiales o a profundidad, según se requiera.
21. La descripción de la metodología a aplicar para cada tipo de pruebas de campo o laboratorio.
22. La descripción de las condiciones geológicas, geo-hidrológicas e hidrológicas, basada en los resultados obtenidos en el muestreo y pruebas de campo.
23. La descripción de las condiciones climáticas y físicas que afecten el comportamiento de los contaminantes.
24. La determinación de la distribución y el comportamiento de los contaminantes en el suelo, subsuelo y en los acuíferos con base en los resultados obtenidos.
25. Los datos del o los responsables técnicos de la caracterización.
26. Los hechos o razones que dan motivo a la petición.

Y los documentos anexos para pasivos ambientales son los siguientes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010):

1. Planos del lugar a una escala tal que permita apreciar la información requerida, georreferenciados con coordenadas UTM y orientación geográfica, donde se muestren: topografía, cuerpos de agua superficiales, puentes y caminos de acceso, las áreas dañadas de suelo y los puntos de muestreo, con las mismas denominaciones que se indican en los resultados de las determinaciones analíticas del contaminante.
2. Documento comprobatorio de la cadena de custodia de las muestras.
3. Planos isométricos de concentraciones y migración del contaminante en suelo y subsuelo.
4. Los planos de instalaciones.
5. Memoria fotográfica del sitio.
6. La memoria fotográfica de los trabajos efectuados.
7. Los informes de resultados de laboratorio.

2.6 Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

El índice de esta Norma Oficial Mexicana es el siguiente:

0. Introducción.
 1. Objetivo.
 2. Campo de aplicación.
 3. Referencias.
 4. Definiciones.
 5. Abreviaturas.
 6. Límites máximos permisibles.
 7. Lineamientos para el plan de muestreo en la caracterización.
 8. Especificaciones ambientales para la remediación.
 9. Evaluación de la conformidad.
 10. Grado de concordancia con normas internacionales.
 11. Bibliografía.
 12. Observancia de esta Norma.
- Apéndice Informativo.

A continuación, se presenta el diagrama general de muestreo para la caracterización de un sitio contaminado que se incluye en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 con anotaciones para que se utilice como guía en el uso de la norma (**Figura 1**).

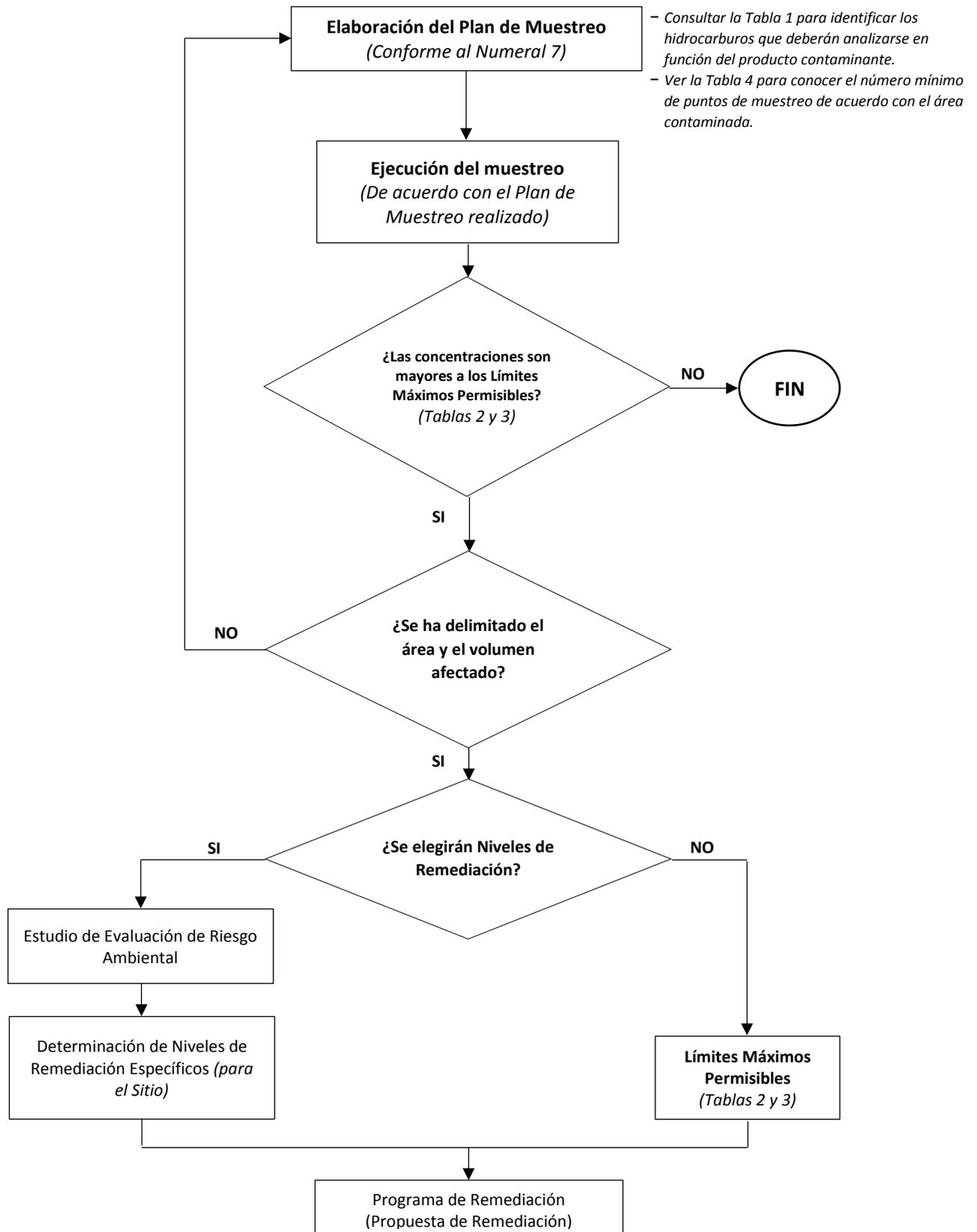


Figura 1. Diagrama general de muestreo para la caracterización de un sitio contaminado incluida en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (con anotaciones del autor).

2.7 Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

El índice de esta Norma Oficial Mexicana es el siguiente:

0. Introducción.
1. Objetivo.
2. Campo de aplicación.
3. Referencias.
4. Definiciones.
5. Especificaciones.
 - 5.1 Especificaciones generales para extensiones menores o iguales a 1000 m².
 - 5.2 Especificaciones generales para extensiones mayores a 1000 m² con presencia de contaminantes.
 - 5.3 Desarrollo del modelo conceptual.
 - 5.4 Selección de la concentración objetivo para sitios con población humana potencialmente expuesta y procedimiento para su determinación.
 - 5.5 Determinación de concentración objetivo para sitios sin población humana potencialmente expuesta.
 - 5.6 Criterios para la remediación de suelos.
6. Evaluación de la conformidad.
7. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración.

8. Bibliografía.
9. Observancia de esta norma.

Tablas.

Tabla 1: Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.

Tabla 2: Concentraciones de referencia de contaminantes solubles (CRS).

Anexos.

Apéndice Normativo A: Modelo conceptual.

Apéndice Normativo B: Métodos analíticos.

Apéndice Normativo C: Método analítico para determinar la bioaccesibilidad del plomo.

Diagrama.

Diagrama de flujo de la Norma

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la Norma que se incluye en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 con anotaciones para que se utilice como guía en el uso de la norma (**Figura 2**).

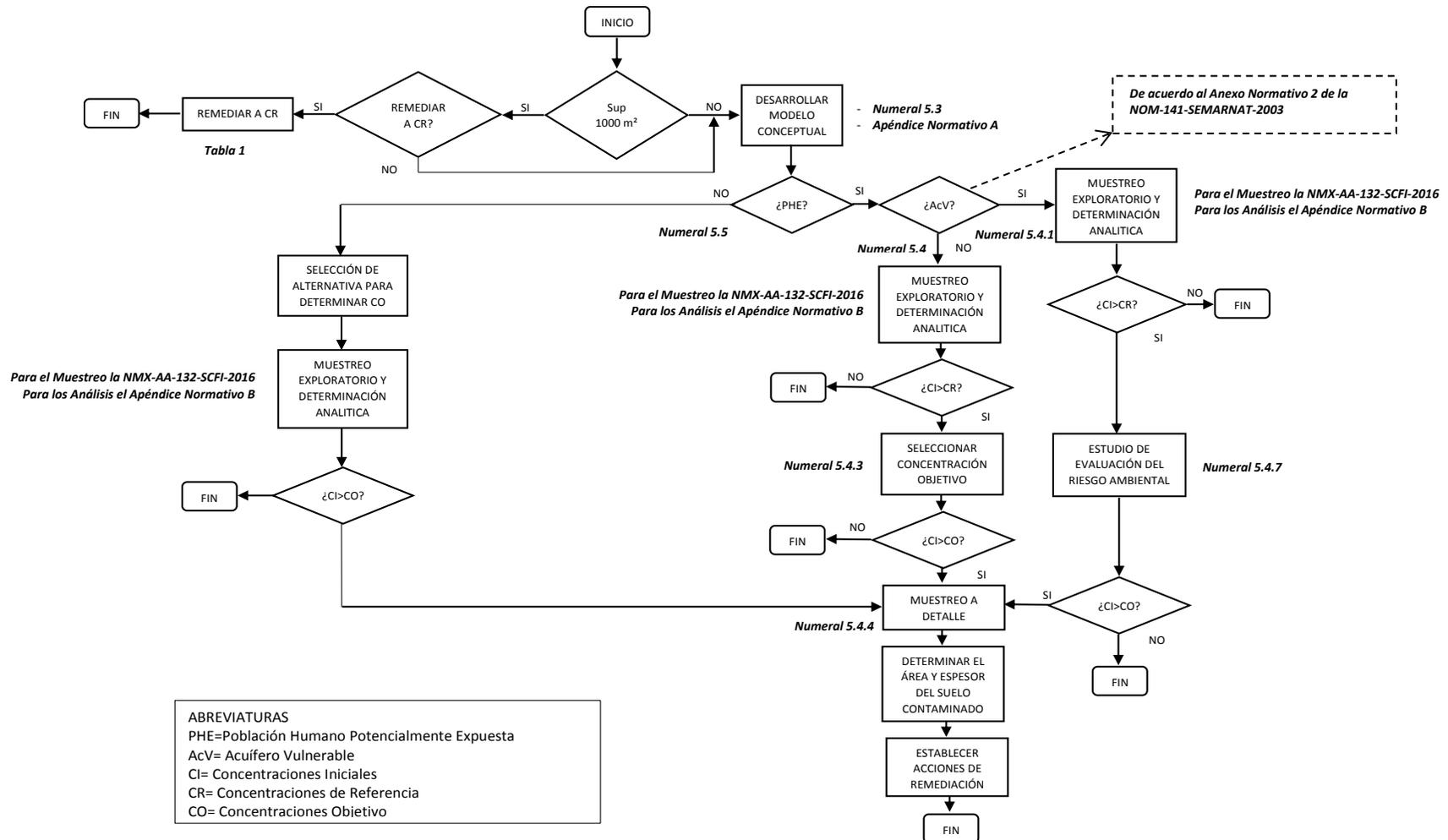


Figura 2. Diagrama de flujo de la Norma que se incluye en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Fuente: NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (con anotaciones del autor).

2.8 Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.

El índice de esta Norma Mexicana es el siguiente:

0. Introducción.
 1. Objetivo y campo de aplicación
 2. Definiciones.
 3. Plan de Muestreo.
 4. Material y equipo de muestreo y consideraciones para la toma de muestras.
 5. Tipos de muestreo.
 6. Manejo y control de muestras.
 7. Preparación de las muestras en laboratorio.
 8. Vigencia.
 9. Bibliografía.
 10. Concordancia con normas internacionales.
- Apéndice Informativo A
- Apéndice Informativo B
- Apéndice Informativo C

A continuación, se presenta un diagrama para que se utilice como guía en el uso de la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 (**Figura 3**).

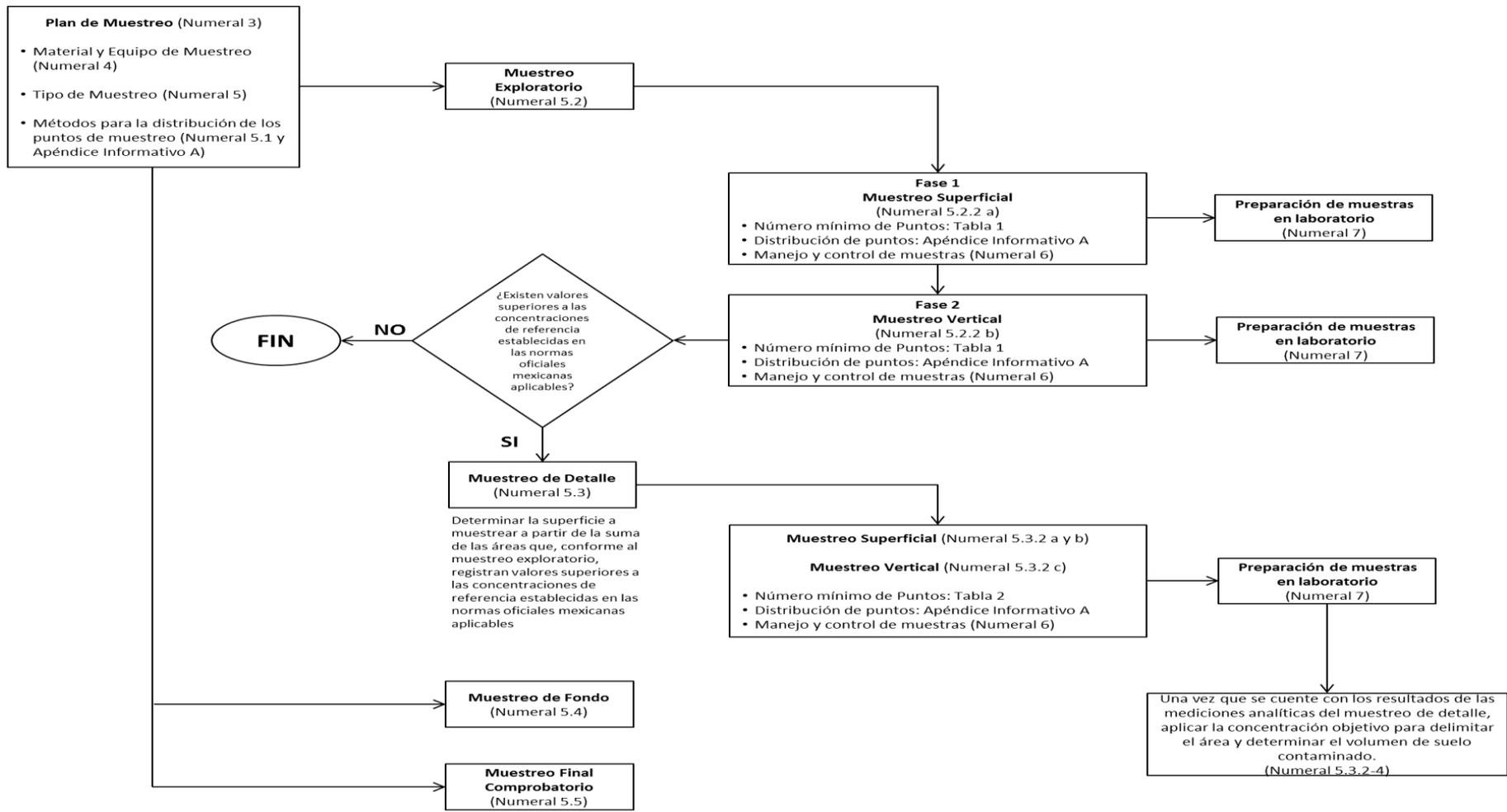


Figura 3. Diagrama para que se utilice como guía en el uso de la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016.

Fuente: Elaboración propia.

2.9 Estudios y etapas para la remediación de un sitio contaminado.

A continuación, se presenta un esquema (**Figura 4**) que resume los estudios y las etapas que se requieren para remediar un sitio contaminado, de acuerdo con la legislación mexicana (vigente), la que es una pauta útil para conocer de manera resumida el proceso de gestión de un sitio contaminado, desde su identificación, hasta la conclusión de la remediación.

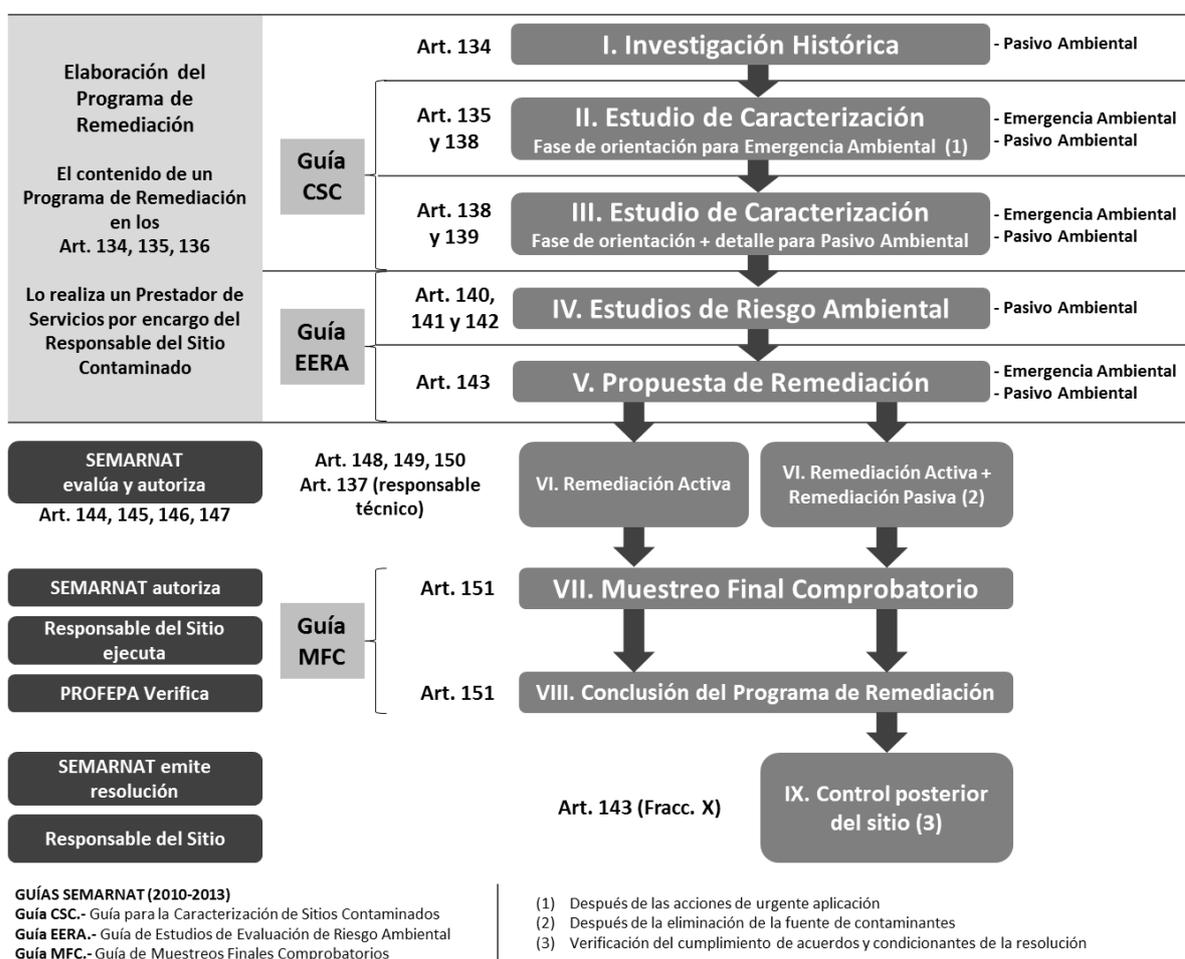


Figura 4. Resumen de los estudios y las etapas que se requieren para remediar un sitio contaminado.

Fuente: Dr. Ulises Ruiz Saucedo (modificada por el autor).

2.10 Niveles de limpieza

Como ya se menciona en el presente capítulo, solamente existen 2 normas oficiales mexicanas que establecen niveles de limpieza para suelos contaminados, la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados para 12 metales y metaloides.

Para otros contaminantes como pesticidas, plaguicidas, bifenilos policlorados, dioxinas y furanos (ver capítulo 4), no existen límites máximos permisibles, concentraciones de remediación o límites de limpieza en México.

Tampoco hay límites de limpieza normados para el agua subterránea. Lo que más se acerca a una norma de límites para el agua subterránea es la NOM-014-CONAGUA-2003 (Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada), pero no es una norma que defina límites de limpieza para el tratamiento del agua subterránea.

Para estos casos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) ha proporcionado el marco de referencia para la aplicación de la evaluación de riesgos ambientales como un instrumento para determinar las acciones de remediación para sitios contaminados. La Ley define la evaluación de riesgo ambiental como un... *“Proceso metodológico para determinar la probabilidad o posibilidad de que se produzcan efectos adversos, como consecuencia de la exposición de los*

seres vivos a las sustancias contenidas en los residuos peligrosos o agentes infecciosos que los forman”.

Asimismo, en los artículos 140 y 143 (inciso IV), del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos menciona al respecto lo siguiente:

Artículo 140.- Los estudios de riesgo ambiental tienen por objeto definir si la contaminación existente en un sitio representa un riesgo tanto para el medio ambiente como para la salud humana, así como los niveles de remediación específicos del sitio en función del riesgo aceptable.

Artículo 143.- Las propuestas de remediación para emergencias y pasivos ambientales se integrarán al programa de remediación y contendrán:

IV. Las concentraciones, niveles o límites máximos que se establezcan en las normas oficiales mexicanas o los niveles de remediación específicos a alcanzar en el sitio contaminado conforme al estudio de evaluación del riesgo correspondiente;

Los fundamentos de la evaluación del riesgo, son la base teórica para el desarrollo de niveles de limpieza en suelo y también para el agua, superficial y subterránea. Es un proceso sistemático para describir y cuantificar el riesgo asociado con sustancias peligrosas, que se cuantifica a partir de la identificación de las posibles consecuencias adversas a la salud y al ambiente y por la estimación de su magnitud y probabilidad de ocurrencia.

En sitios contaminados la evaluación de riesgos se centra en la estimación de los efectos adversos y en la obtención de la información de base necesaria que permitan tomar una decisión respecto a la remediación del sitio. En este proceso se recopila y sistematiza la información generada en la caracterización y el estudio histórico de un sitio contaminado, con el fin de entender las relaciones y causalidades entre la presencia de los contaminantes, las distintas rutas y vías de exposición y los efectos adversos observados en el medio ambiente o los efectos potenciales que pudieran presentarse.

En un sitio contaminado pueden estar involucrados varios contaminantes cada uno con diferentes propiedades fisicoquímicas que aunadas a las condiciones físicas del sitio, hacen que los contaminantes se comporten e incidan de distinta manera en el medio ambiente. Por este motivo, la evaluación del riesgo ambiental involucra metodológicamente distintos tipos de información y hace necesaria la participación de profesionistas provenientes de distintas áreas como son los geólogos, químicos, biólogos, toxicólogos e ingenieros, para poder entender y predecir la relación entre el contaminante, las rutas de exposición y los efectos observados o potenciales.

Esta herramienta es muy útil en la gestión de un sitio contaminado, porque ayuda a entender como en un sitio contaminado, se origina un riesgo al medio ambiente y la salud humana, su magnitud y sus mecanismos de afectación.

También, el estudio de evaluación de riesgo ambiental permite la “toma de decisiones”, en los casos donde por la complejidad y la extensión de la contaminación, así como por los elevados costos de remediación, se torna difícil elegir la estrategia más adecuada, que garantice la reducción de la contaminación, la reducción de la exposición a niveles aceptables y la remediación a costos aceptables para la sociedad.

3. MODELO CONCEPTUAL.

Para que el proceso de evaluación de un sitio contaminado se realice, es necesario la recopilación de datos confiables, basado en un modelo conceptual de sitio (MCS) correcto, el que deberá de realizar un especialista en el subsuelo; es decir, un profesional que haya cursado la carrera de Ingeniería Geológica, o con una formación en geología.

No existe otro profesional que conozca la génesis, diagénesis y procesos del subsuelo, así como la dinámica de los fluidos que en él ocurren. Cualquier otro profesional que quiera elaborar un modelo conceptual correcto para evaluar la contaminación de un sitio, tendrá, necesariamente, que conocer de geología y por supuesto, las ramas de la geología aplicada, específicamente la hidrogeología.

La geología es la única disciplina que proporciona los conocimientos fundamentales, así como las técnicas para describir y comprender la distribución de cualquier contaminante en el subsuelo, lo que es necesario para evaluar los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente.

La falta de un MCS apropiado es una de las razones clave por las que, en muchos sitios contaminados, incluyendo el agua subterránea, no se logra un nivel adecuado de comprensión y, en consecuencia, una administración del riesgo eficiente, desde su control, remediación y cierre o conclusión. Y esto sólo se puede garantizar si el personal profesional que investiga y elabora la evaluación del sitio y en particular el MCS, está adecuadamente calificado, por lo que es imprescindible la participación de una persona con

formación académica en geología o hidrogeología en el equipo de un proyecto que evalúe sitios contaminados, y si es coordinador del grupo de trabajo, mucho mejor.

3.1 ¿Qué es un modelo conceptual del sitio (MCS)?

De acuerdo con el estándar ASTM E1689 (Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites), un Modelo Conceptual del Sitio es *“una representación escrita o pictórica de un sistema ambiental y los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan el transporte de contaminantes desde fuentes a través de medios ambientales hasta receptores ambientales en el sistema”* (ASTM, 2008).

Un modelo conceptual del sitio debe proporcionar una descripción de las características relevantes del sitio y las condiciones de la superficie y el subsuelo para conocer la distribución y movilidad de los contaminantes de interés identificados y el riesgo que representan para los receptores. El modelo conceptual del sitio es una herramienta iterativa que debe desarrollarse y refinarse a medida que se obtiene información, desde los antecedentes o historia del sitio y durante todo el periodo de la investigación del sitio, hasta la remediación.

3.2 Desarrollo del modelo conceptual del sitio (MCS).

El desarrollo del modelo conceptual debe ser un proceso reiterado, que se actualiza continuamente a medida que se dispone de nuevos datos o se mejora la comprensión del sistema, pero es importante que haya pruebas cuantitativas del modelo conceptual conforme se vaya avanzando en la investigación del sitio, de otra manera es poco probable que el modelo resultante sea representativo del sistema real.

Como ayuda para desarrollar el modelo conceptual del sitio, se proporciona una lista de verificación en el **Anexo 1**, que identifica el tipo de información que se recomienda recopilar durante el proceso de caracterización y hasta la remediación. Es posible que todos los elementos de esta lista de verificación no se apliquen a cada sitio, de acuerdo a su complejidad, y en algunos casos pudiera requerirse información adicional para precisar el desarrollo del modelo.

Los componentes del MCS deben distinguir claramente entre la contaminación de fondo (masa del elemento químico que se encuentra en un suelo de manera natural) y la contaminación asociada con un área o sitio a evaluar, para comprender los grupos de receptores que pueden estar asociados con la exposición a los contaminantes de interés.

3.2.1 Descripción del alcance del modelo conceptual del sitio.

El alcance del MCS debe incluir el establecimiento de la extensión y límites del área de investigación que se va a caracterizar. Se debe aclarar si el modelo se limitará a un área específica de interés o a todo el sitio con posible afectación, y si se extenderá fuera del sitio para incluir características regionales. También es importante definir si el modelo se está desarrollando para evaluar los impactos potenciales/reales en los receptores humanos o ecológicos, o en ambos.

La descripción del modelo conceptual del sitio debe incluir un mapa completo a escala propicia que describa la extensión del área abordada, las particularidades y ubicación del predio identificado y de las fuentes de contaminación; así como la descripción de los contaminantes de preocupación o de interés potenciales, de las características que afectan la migración de contaminantes (por ejemplo, los diferentes materiales que conforman el subsuelo en el sitio, discontinuidades como fallas o fracturas, alineamientos antropogénicos como los drenajes, entre otros) y de los receptores potenciales identificados.

3.2.2 Resumen de la información disponible.

Se debe evaluar la información recopilada durante todo el periodo de la investigación del sitio, por lo que es útil elaborar un resumen de la información disponible y las publicaciones relevantes para desarrollar el modelo conceptual lo más detallado posible. La siguiente información es una lista mínima de lo que debe incluirse en el resumen:

- Descripción general de los usos actuales del predio a evaluar y de los circundantes.
- Información histórica disponible sobre los usos de suelo y actividades en el predio a evaluar y predios colindantes.
- Ubicación y profundidades de los servicios urbanos subterráneos.
- Información relevante fuera del sitio a escala regional con fotografías aéreas (para información histórica), imágenes de satélite, datos del sistema de información geográfica y mapas históricos y actuales.
- Imágenes de satélite, mapas topográficos y mapas geológicos a diferentes escalas.
- Información disponible de concentraciones históricas de contaminantes en el suelo y en el agua subterránea.
- Clasificación y ubicación de acuíferos aprovechables.
- Clasificación y ubicación de cuerpos de agua superficial.
- Normas mexicanas o estándares internacionales de remediación aplicables para todos los medios potencialmente afectados.

3.2.3 Identificación de fuentes potenciales.

Se deberá realizar una investigación de las actividades históricas del área o sitio de interés para determinar la(s) fuente(s) que pueden haber contribuido a la contaminación. Esto puede incluir información o datos generados por una evaluación preliminar realizada de acuerdo con el estándar ASTM E1527-21 (Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process). Es importante que todas las fuentes históricas y actuales que se identificaron y ubicaron, se incluyan en el mismo MCS.

3.2.4 Caracterización de la(s) fuente(s) de contaminación.

La caracterización de la(s) fuente(s) de contaminación proporciona la base para completar la investigación del sitio. Se debe identificar la fecha del derrame, fuga o descarga del contaminante, la ubicación exacta, el tipo de contaminante y el volumen estimado del derrame, fuga o descarga. Es importante incluir una descripción sobre los medios afectados (suelo, subsuelo, agua subterránea, agua superficial) y los esfuerzos iniciales de mitigación y/o limpieza cuando ocurrió el derrame, fuga o descarga del contaminante.

Primero, se debe caracterizar la fuente y estimar la extensión de los contaminantes de interés en la superficie del terreno y el medio subterráneo. A medida que avanza la caracterización de la fuente, el modelo conceptual del sitio debe refinarse utilizando los datos de muestreo específicos del sitio y la información histórica adicional que se obtiene durante la investigación. La caracterización de la fuente debe incluir lo siguiente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010):

- Ubicación.
- El tipo y capacidad del contenedor de la sustancia o residuo peligroso (tanque superficial, tanque subterráneo, ducto, dique, entre otros).
- Tiempo que se ha utilizado el contenedor.
- Mapeo del derrame, fuga o descarga.
- Volumen del contaminante derramado, fugado o descargado.
- Acciones correctivas durante y después de identificar el derrame, fuga o descarga.

- Medidas de mitigación inmediatas a los elementos ambientales (suelo, subsuelo, agua) afectados por el derrame, fuga o descarga.

Durante la revisión de la información disponible del predio y de las propiedades circundantes, es importante identificar la contaminación que puede no estar relacionada con los derrames, fugas, descargas o los procesos del sitio que se está evaluando. La presencia de contaminantes no propios del predio evaluado, no impide la investigación del sitio y la remediación de los impactos asociados.

La existencia de contaminantes no relacionados con las operaciones del sitio es importante para determinar las rutas y vías de exposición, y los impactos en los receptores. Tal vez no sea posible el control de la fuente o la remediación de esta contaminación que no le corresponde al predio que se está caracterizando, pero es importante evaluar el impacto en los receptores y considerar esto al momento de tomar decisiones de remediación del predio de interés.

3.2.5 Rutas de migración.

El MCS deberá identificar todas las vías de migración confirmadas y potenciales de los contaminantes de interés para el área de caracterización. El propósito del MCS es documentar todas las vías de migración actuales y futuras para todos los contaminantes de interés en el sitio. También debe identificar cuándo las rutas de migración no están completas y, por lo tanto, no se evaluarán.

Los medios que deben evaluarse en el desarrollo de un MCS son el suelo y subsuelo, agua subterránea, agua superficial, los sedimentos y el aire. Las siguientes secciones brindan información a tener en cuenta al evaluar las rutas de migración para cada medio. Luego, el investigador debe evaluar qué componentes son aplicables en función de las condiciones y la complejidad del sitio.

3.2.5.1 Suelo y subsuelo.

De acuerdo a la complejidad y condiciones del sitio, el MCS debe proporcionar la siguiente información derivada de las investigaciones de campo:

- Contaminantes de interés que están presentes, sus concentraciones, variación espacial en la concentración y estándares de remediación.
- Características físicas del suelo en el que están presentes los contaminantes de interés y a través del cual pueden estar moviéndose (por ejemplo: tipo de suelo, densidad aparente, permeabilidad, contenido de carbono orgánico, porosidad, contenido de humedad, entre otros).
- Heterogeneidades del medio subterráneo.
- Profundidad al agua subterránea (aprovechable y no aprovechable) y/o al lecho rocoso.

Las condiciones del sitio que pueden representar posibles riesgos de exposición y/o vías de migración, son, de manera enunciativa, los siguientes:

- Proximidad al agua superficial y humedales.
- Características de drenaje superficial y subterráneo.

- Galerías subterráneas de infiltración de aguas pluviales.
- Proximidad a zonas residenciales, escuelas, parques, entre otros.
- Ubicación de los servicios públicos como vías de migración preferenciales.

3.2.5.2 Agua subterránea.

Es recomendable elaborar un MCS para el agua subterránea con el objetivo de determinar el alcance de la migración de la contaminación en cada unidad acuífera. El MCS del agua subterránea se basa en el conocimiento del sitio, la información de monitoreo del agua subterránea y el análisis de transporte y destino. Se debe evaluar e incluir lo siguiente:

- Tipos de contaminantes de interés presentes, sus concentraciones y su variación espacial en la concentración.
- Características del acuífero (por ejemplo, porosidad y permeabilidad) de los materiales a través de los cuales se mueve el agua subterránea.
- Formaciones geológicas y clasificaciones del agua subterránea que ha sido impactada.
- Dirección del flujo.
- Gradiente hidráulico.
- Ubicación de las áreas de recarga y descarga.
- Ubicación de cualquier influencia de bombeo actual o histórico.
- Uso del agua (potable, riego, industrial, etc.).
- Heterogeneidades dentro de la matriz geológica saturada.
- Información sobre la estructura del lecho rocoso que puede controlar la migración de contaminantes.
- Rutas preferenciales (por ejemplo, drenajes).

- Sistemas de flujo.

Los contaminantes orgánicos pueden migrar a formaciones de arcilla o roca de baja permeabilidad donde permanecen en altas concentraciones. Estos pueden migrar lentamente en formaciones acuíferas adyacentes. Por lo tanto, también debe caracterizarse la naturaleza y extensión de los contaminantes de interés orgánicos adsorbidos en suelos de baja permeabilidad y matrices rocosas, tanto por encima como por debajo de la zona saturada.

La evaluación de la dirección de flujo del agua subterránea debe identificar el alcance actual e histórico de la contaminación y los receptores relacionados, pero también es necesario que se identifiquen los receptores futuros que pueden verse afectados por la contaminación proveniente del sitio y/o área de interés.

3.2.5.3 Agua superficial.

Si se identifica contaminación en el agua superficial o si existe una vía de migración hacia algún cuerpo de agua superficial, esta vía debe evaluarse e incluir una investigación de los sedimentos, ya sea porque hay evidencia de una descarga directa a agua superficial, o bien se identifica una escorrentía de agua superficial contaminada o descargas de agua subterránea en el cuerpo de agua superficial. La siguiente lista contiene la información mínima que debe contener el MCS cuando se aborde la ruta de migración del agua superficial:

- Componentes físicos asociados con la masa de agua superficial, como la identificación de vegetación afectada, iridiscencias, filtraciones, suelo decolorado o sedimentos a lo largo de la costa o en la masa de agua superficial.
- Descargas históricas documentadas que pueden o no estar asociadas con el sitio y/o el área de interés, incluidos los estudios ecológicos históricos que documentan las diferencias en la densidad y diversidad de la población de organismos en las áreas potencialmente impactadas por el sitio con relación a las áreas no impactadas por el sitio.
- Identificación de los contaminantes del agua subterránea de interés que exceden los estándares de calidad del agua superficial y migran a lo largo de la ruta del agua subterránea hacia un cuerpo de agua superficial. En México aún no hay límites máximos permisibles normados para el agua subterránea. Es a través de estudios de evaluación de riesgo ambiental (como se identifica en el Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos) que se definen los límites máximos permisibles específicos del sitio (en este caso para el agua subterránea). Y es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) la autoridad facultada para determinar los parámetros que deberán cumplir y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir.
- Área de la pluma de contaminación, concentración y velocidad de flujo para estimar una carga de la masa del contaminante al agua superficial.
- Flujo de agua superficial estacional.

3.2.5.4 Sedimentos.

Al evaluar la relación entre las concentraciones de contaminantes y la exposición dentro de la ruta de migración de sedimentos, el modelo conceptual del sitio debe identificar:

- Cómo los contaminantes relacionados con el sitio ingresan a un sistema.
- Cómo se mueven los contaminantes en ese sistema (incluido el destino y la partición).
- Los mecanismos de exposición y captación en receptores humanos y/o ecológicos.

3.2.5.5 Aire.

Si se justifica una investigación de intrusión de vapor a edificios o instalaciones cerradas, el MCS debe identificar todas las vías y procesos potenciales de migración de vapor a través de los cuales un receptor puede estar expuesto en un sitio en particular. Los procesos de transporte de vapor y líquido y sus interacciones con varios entornos geológicos y físicos del sitio (es decir, variaciones en el diseño/construcción del edificio, textura/perfil del suelo, variación temporal en la presión atmosférica, precipitación/infiltración, humedad del suelo y elevación del nivel freático) crean un sistema complejo y dinámico. Los principales mecanismos de transporte de vapor que deben tenerse en cuenta al evaluar la migración de vapor, son los siguientes (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2016):

- Difusión de vapores de fuentes en la zona no saturada.
- Difusión de vapores de fuentes en agua subterránea somera.
- Transporte advectivo/convectivo de vapores.
- Migración de vapor a través de vías preferenciales.

3.2.6 Identificación de receptores humanos y ecológicos.

La identificación de receptores potenciales es la función clave del MCS y debe tener lugar en el momento del descubrimiento inicial de la contaminación y continuar detallándose a medida que avanza la investigación. Los receptores humanos y ecológicos incluyen aquellos que se ven afectados o amenazados por los contaminantes de interés, ubicados dentro del área de investigación o presentes a lo largo de una ruta de migración identificada. El uso futuro del sitio puede afectar el escenario de exposición; por tanto, el modelo conceptual del sitio debe identificar, cuando sea posible, el uso futuro del sitio y tener en cuenta las exposiciones futuras a todos los receptores.

Para la evaluación del receptor humano, se debe considerar lo siguiente:

- Contaminantes o conjunto de contaminantes que se evalúan.
- Vía de exposición a cada contaminante de interés: vía contacto directo (ingestión, inhalación o contacto dérmico) o bioacumulación a lo largo de la cadena alimenticia.
- Poblaciones que están actual o potencialmente expuestas.

La evaluación del riesgo ecológico a menudo está separada de la evaluación del riesgo humano, ya que los humanos están potencialmente expuestos a la contaminación de manera diferente (por ejemplo, un alimento) que los receptores ecológicos. En general, la evaluación del receptor ecológico debe abordar los siguientes componentes (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2016):

- Contaminantes de potencial preocupación ecológica para el suelo, el agua subterránea, el agua superficial y los sedimentos.
- Especies expuestas actuales y futuras: las representativas de los principales grupos presentes en el sitio, no necesariamente todas las especies en el sitio o adyacentes.
- Rutas de migración de contaminantes a áreas ambientalmente sensibles.
- Mapa de población expuesta a lo largo de cada vía de migración.

3.2.7 Determinación de la extensión del área de investigación.

El MCS no sólo debe caracterizar el área fuente y la extensión de la contaminación asociada con el área fuente como se describe anteriormente, sino que el modelo conceptual del sitio debe incluir una descripción de la extensión del área de investigación. Esto incluye la identificación de las poblaciones humanas que pueden verse afectadas por la contaminación (es decir, pozos de suministro públicos o privados); cualquier especie crítica que pueda vivir en el sitio o junto al mismo, como especies amenazadas o en peligro de extinción a nivel federal o estatal; o cualquier recurso natural ambientalmente sensible. Esto debería incluir la identificación de hábitats críticos dentro del área asociada con rutas de migración identificadas. El

investigador debe presentar esta información en forma de mapa y actualizarla a medida que se recopilan los datos para todas las rutas de migración relacionadas con el sitio.

3.2.8 Descripción narrativa.

La descripción narrativa reúne todas las piezas del modelo conceptual del sitio de manera resumida, tal como se entiende en ese momento. Para un escenario simple, la descripción narrativa puede ser notas o cuadros de texto en una figura. Para un sitio más complejo, puede ser la sección de un informe. Debe describir claramente el sitio, los contaminantes, las vías, las rutas y los receptores. También puede incluir una discusión sobre las incertidumbres en los datos.

En el **Anexo 2** se incluyen dos ejemplos de modelos conceptuales del sitio.

3.3 Aplicación del modelo conceptual de sitio.

Se deberá utilizar el modelo conceptual del sitio para comunicarse de manera efectiva con todas las partes interesadas, identificar problemas y/o procesos críticos y para facilitar el proceso de toma de decisiones correctivas.

Un MCS también es útil después de que se haya efectuado la remediación, por ejemplo, los datos de monitoreo posteriores a la remediación se pueden usar para validar el MCS y confirmar que se ha seleccionado una solución adecuada para el sitio.

4. CONTAMINANTES.

A continuación, se presenta un resumen de los contaminantes más comunes que pudieran encontrarse en el suelo por derrames, fugas o descargas de sustancias y residuos considerados peligrosos.

4.1 Metales pesados.

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres humanos. El término "metal pesado" no está bien definido. A veces se emplea el criterio de densidad. Por ejemplo, metales de densidad mayor que 4,5 g/cm³, pero los valores en la bibliografía pueden ir desde 4 g/cm³ hasta 7 g/cm³. Otros criterios empleados son el número y el peso atómicos.

Además, el término siempre suele estar relacionado con la toxicidad que presentan, aunque en este caso también se emplea el término "elemento tóxico" o "metal tóxico".

Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que, aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Ba y Se.

Dentro de los metales pesados hay 2 grupos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017):

1. Los oligoelementos, micronutrientes o elementos traza, que son los requeridos en pequeñas cantidades por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Si su concentración en el suelo es demasiado baja, se pueden presentar enfermedades carenciales en las plantas. Por el contrario, pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
2. Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Zn, Sb, Bi.

Estos elementos tienen su origen en el sustrato litológico, apareciendo bien como elementos nativos o incorporados normalmente en las estructuras de sulfuros, silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos. Este contenido en metales, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo, pudiendo incluso producirse concentraciones anómalas en suelos que se desarrollan sobre rocas ígneas ultrabásicas (como las peridotitas y las serpentinas) que presentan los más altos contenidos en metales pesados, seguidas de las ígneas básicas (como los gabros y basaltos).

La actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas. Se consideran contaminantes cuando superan las cantidades naturales en el suelo, y en muchos casos está relacionado con actividades humanas.

4.1.1 Dinámica de los metales pesados en el suelo.

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017):

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden movilizarse al agua superficial o subterránea.

4.1.2 Riesgos.

Los riesgos producidos por un metal pesado presente en el suelo son función de:

4.1.2.1 Toxicidad.

El carácter acumulativo de cada elemento, destacando aquellos metales que presenten un índice de bioacumulación superior a 1. El concepto de bioacumulación se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en el organismo y la concentración de ese contaminante en el suelo (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017).

La toxicidad de un suelo debida a los metales pesados y elementos asociados es una consecuencia directa de sus concentraciones en las fases bioasimilables; es decir, la solución del suelo y las formas adsorbidas. Dada la dificultad de extracción, las normativas prefieren evaluar la cantidad total de elemento tóxico presente.

Es más importante que el contenido total de un elemento en el suelo es la forma o especie química bajo la que se encuentra, es decir, su especiación. Así, la forma resultante de dicha especiación va a influir decisivamente en su distribución en el suelo, condicionando su solubilidad, su movilidad en el suelo y en el agua superficial y subterránea, su biodisponibilidad y toxicidad y, por tanto, su comportamiento como contaminante potencial.

4.1.2.2 pH.

Es un factor esencial. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los que tienden a estar más disponibles a pH alcalino. El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En

medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles. Tal es el caso de los siguientes metales: Se, V, As, Cr.

La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y, por lo tanto, también su solubilidad.

4.1.2.3 Textura.

La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los que pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos.

4.1.2.4 Mineralogía de las arcillas.

Cada especie mineral tiene determinados valores de superficie específica y descompensación eléctrica. Ambas características son las responsables del poder de adsorción de estos minerales. La capacidad de cambio de cationes es mínima para los minerales del grupo de la caolinita, baja para las micas, alta para las esmectitas y máxima para las vermiculitas.

4.1.2.5 Materia orgánica.

La materia orgánica está compuesta principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, aunque puede contener otros macro y micronutrientes esenciales para las plantas. La materia orgánica del suelo consiste en una amplia gama de sustancias orgánicas que incluyen organismos vivos, la biomasa del suelo, restos de organismos y compuestos orgánicos producidos (<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/como-mejorar-el-contenido-de-materia-organica-del-suelo>).

Reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Los metales una vez que forman quelatos o complejos, pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. El Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017).

4.1.2.6 Capacidad de cambio.

Es función del contenido de arcilla y de materia orgánica. En general cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, quedan retenidos con menor fuerza.

4.1.2.7 Condiciones redox.

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Eh-pH se utilizan para mostrar la estabilidad de compuestos de metales pesados y proporciona un método fácil para predecir el comportamiento de los

metales pesados frente a un cambio en las condiciones ambientales (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017). A saber:

- a) Cambio directo en la valencia de ciertos metales; por ejemplo, en condiciones reductoras el Fe^{3+} se transforma en Fe^{2+} , los iones reducidos son mucho más solubles.
- b) En segundo lugar, las condiciones redox pueden afectar indirectamente la movilidad de metales. Así muchos metales están asociados o adsorbidos a hidróxidos de Fe y Mn, estos no son estables a Eh bajo y se convierten en FeS o FeCO_3 dependiendo de las condiciones químicas, cuando esto ocurre los metales que estaban asociados con los hidróxidos de Fe y Mn se movilizan.
- c) En ambientes muy reductores el Fe se puede combinar con el S^{2-} hasta convertirse en pirita. Cuando los suelos y sedimentos contienen cantidades significantes de pirita y aumenta el Eh (creación de condiciones más oxidantes) el S^{2-} se oxida a SO_4 , liberando cantidades de H_2SO_4 , el suelo se acidifica fuertemente y los metales se hacen muy solubles.

4.1.2.8 Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.

Juegan un importante papel en la retención de los metales pesados. Tienen una alta capacidad de fijarlos e inmovilizarlos. Además, estos compuestos se presentan finamente diseminados en la masa del suelo por lo que son muy activos. Los suelos con altos contenidos de Fe y Mn tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y en menor grado Zn, Co, Cr, Mo y Ni.

4.1.2.9 Carbonatos.

La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de altos valores de pH. El Cd, y otros metales, presentan una marcada tendencia a quedar adsorbido por los carbonatos.

4.1.2.10 Salinidad.

El aumento en salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. Primeramente, los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar, los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg. Tienden a generar suelos de pH básicos.

4.1.3 Características de los metales pesados más importantes.

Las características más destacables de algunos de estos elementos son (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017):

- El arsénico es un elemento muy tóxico para animales y la inhalación de sus compuestos volátiles es cancerígena. Se produce en actividades mineras y durante la fabricación de conservantes para la madera y de componentes microelectrónicos. Presenta una movilidad natural baja en medios ácidos, en los que se encuentra asociado a hidróxidos de hierro y aluminio.

- El boro se asocia a procesos de meteorización de la turmalina presente en terrenos volcánicos. En medios ácidos es lixiviado por acción de la lluvia, mientras que en suelos básicos se puede acumular adsorbido sobre óxidos de hierro y aluminio, alcanzando niveles tóxicos para las plantas.
- El cadmio se puede encontrar en el suelo debido a actividades mineras y a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Es uno de los metales pesados más móviles. Es un compuesto altamente tóxico para animales superiores y seres humanos.
- El zinc es un elemento muy abundante con una alta movilidad. Aparece junto al cadmio y se asocia principalmente a actividades mineras y a tiraderos industriales y urbanos. Se puede acumular hasta niveles fitotóxicos, pero tiene, relativamente, una baja toxicidad para animales y humanos.
- El cobalto se presenta en zonas básicas asociado a hidróxidos de hierro y manganeso, y su movilidad disminuye con el aumento de pH.
- El cobre es un elemento poco móvil, empleado como fungicida. Abunda en residuos industriales y urbanos. En suelos contaminados puede alcanzar concentraciones tóxicas para las plantas. Las ovejas son sensibles a su toxicidad.

- El cromo se origina en actividades industriales. El cromo hexavalente es más tóxico que el trivalente y se suele encontrar en el suelo en forma oxidada como cromato. En esta forma es soluble y móvil, pero en presencia de materia orgánica se reduce formando hidróxidos insolubles de difícil absorción por los organismos.
- El mercurio es un metal muy tóxico y móvil. Se origina en procesos de combustión de carbón, actividades mineras, emisiones industriales, empleo de fungicidas y residuos urbanos. Puede sufrir procesos de metilación debido a la acción bacteriana, originándose productos más tóxicos y volátiles como el dimetilmercurio. Tiene efectos teratogénicos y produce daños neurológicos, y es el causante de una enfermedad típica de los mineros denominada hidragirismo.
- El níquel tiene un comportamiento similar al del cobre con un potencial fitotóxico superior. Aparece de forma natural en suelos básicos y de forma antropogénica, asociada a vertidos industriales y urbanos.
- El plomo se origina por actividades mineras o industriales. Precipita como carbonato cuando el pH es superior a 6, y su movilidad ambiental es baja, acumulándose en las capas superficiales del suelo. Es una potente neurotoxina provocando una enfermedad típica llamada saturnismo.

- El selenio tiene una solubilidad baja, de forma que no suele alcanzar concentraciones tóxicas. Sin embargo, en suelos básicos áridos, se moviliza fácilmente y puede llegar a acumularse en las plantas hasta niveles tóxicos para el ganado.

4.2 Hidrocarburos.

El uso de disolventes orgánicos, lubricantes e hidrocarburos puede originar la contaminación del suelo. Se pueden diferenciar varios tipos de hidrocarburos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017):

Hidrocarburos alifáticos y cíclicos. Son compuestos formados por un esqueleto carbonado, con más o menos ramificaciones.

Hidrocarburos polares. Son compuestos con grupos funcionales polares como alcoholes, aldehídos, cetona, etc., que favorecen su solubilidad en agua.

Hidrocarburos aromáticos. Son hidrocarburos insaturados con una estructura cíclica muy estable. En este grupo, destacan benceno, tolueno, etilbenceno y los xilenos, conocidos como BTEX. El benceno está presente en la naturaleza en bajas concentraciones y forma parte del petróleo crudo (máx. 0,4 g/l). El benceno se procesa en la industria como benceno puro, normalmente a partir del petróleo. Se puede encontrar en forma de diferentes compuestos comerciales (bencina, benzol, benzol de petróleo, gasolina, aceite de hulla o ciclohexatrieno).

El benceno puro es la base de productos aromáticos intermedios utilizados en la elaboración de material plástico, caucho sintético, colorantes, pinturas, resinas, barniz, detergentes y plaguicidas. Son fuentes emisoras de benceno los vehículos a motor (de combustión interna), las coquerías, calefacción de edificios e incineradoras, refinerías e industria química, así como también las gasolineras y depósitos de combustible.

Hidrocarburos clorados. Son hidrocarburos que contienen uno o más átomos de cloro.

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). La familia de los hidrocarburos aromáticos policíclicos es un grupo de hidrocarburos que consisten en moléculas que contienen dos o más anillos aromáticos de 6 carbonos fusionados.

La mayoría de los HAP contienen habitualmente anillos de benceno fusionados, aunque hay que tener en cuenta la existencia de HAP basados en estas estructuras que contienen grupos alquilo.

Se forman en los procesos de combustión incompleta de la materia orgánica a altas temperaturas (>700 °C). Son transportados por vía atmosférica en forma de partículas, depositándose sobre el terreno, donde se adsorben sobre la fase sólida y se acumulan dado que son compuestos orgánicos persistentes (COPs), por lo que pueden permanecer en el medioambiente durante largos periodos de tiempo sin alterar sus propiedades tóxicas.

Las propiedades semivolátiles de los HAP les otorgan gran movilidad. Como característica común presentan una baja solubilidad en agua, además de ser la mayoría de ellos lipofílicos, lo que favorece su acumulación en los tejidos grasos del organismo y su potencial para causar daños.

La solubilidad en agua decrece según aumenta su peso molecular y el tamaño de la molécula, con el consiguiente aumento del carácter lipofílico. La persistencia en el medio también aumenta con el tamaño. Por su carácter lipofílico se pueden bioacumular y concentrar en sedimentos y suelos en una extensión que dependerá de su persistencia en cada medio. Está comprobado que la toxicidad aumenta al aumentar el peso molecular y el carácter lipofílico del compuesto.

El Benzo [a] pireno, es el hidrocarburo aromático policíclico más estudiado y cuyos efectos se pueden extrapolar a los demás compuestos del grupo, se acostumbra por tanto a expresar los impactos ocasionados por los hidrocarburos aromáticos policíclicos en términos de equivalencia con el Benzo [a] pireno.

Los HAP son componentes naturales de materias primas orgánicas, como petróleos crudos, están generados por pirólisis de materia orgánica. Se emplea en la formación de algunos compuestos como el alquitrán de hulla (0,65%), el alquitrán para pavimento (0,51-1%), el aceite de motor (nuevo 0,008-0,27 mg/kg), así como en combustible, brea y también está presente en el petróleo crudo.

Los principales impactos de los HAP en la salud humana se centran en sus propiedades genotóxicas, es decir causan daños al material genético (teratogénicas, mutagénicas y carcinogénicas). Los más potentes carcinógenos son el benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno y el dibenz(ah)antraceno (APARG, 1996).

Las propiedades de los hidrocarburos como volatilidad, solubilidad, viscosidad e inflamabilidad varían mucho de unos a otros y están relacionadas con el número de átomos de carbono y los grupos funcionales que presentan.

4.3 Pesticidas y plaguicidas.

Los llamados plaguicidas representan una de las sustancias más contaminantes, debido a que su uso no sólo afecta al suelo, sino que también incide en otras especies incluso a la atmósfera. Esto se traduce por tanto en un desequilibrio además de contaminar a los alimentos y animales.

Los mecanismos que rigen la evolución de los plaguicidas en el suelo son diversos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017):

Descomposición química. Tiene lugar por procesos de oxidación, reducción, hidroxilación, desalquilación, rotura de anillos, hidrólisis e hidratación.

Descomposición fotoquímica. Se produce por efecto del espectro de luz ultravioleta de la luz solar. Las fuentes de luz y su intensidad regulan el grado de descomposición de un compuesto.

Descomposición microbiana. La acción de los microorganismos del suelo sobre los plaguicidas es probablemente el mecanismo de descomposición más importante. Los microorganismos del suelo, bacterias, algas y hongos, obtienen alimento y energía para su crecimiento por descomposición de estos compuestos orgánicos sobre todo cuando carecen de otras fuentes.

Volatilización. Es la pérdida del compuesto en forma de vapor. Todas las sustancias orgánicas son volátiles en algún grado, dependiendo de su presión de vapor, del estado físico en que se encuentre y de la temperatura ambiente.

Movimiento. El transporte de un plaguicida en el suelo, por disolución o arrastre mecánico, se hace bajo la influencia del agua. El grado de lixiviación está influido por las características fisicoquímicas del suelo, solubilidad del producto, frecuencia e intensidad de la lluvia, entre otros.

Persistencia. Es el tiempo que permanece el plaguicida en el suelo manteniendo su actividad biológica. El tiempo de degradación se mide en vida media que es el tiempo que tiene que transcurrir para que se desactive la mitad del plaguicida. Las consecuencias de la persistencia pueden ser muy importantes, dependiendo de la toxicidad del plaguicida y de su biodisponibilidad.

4.4 Bifenilos policlorados o policlorobifenilos (PCB's).

Los policlorobifenilos (PCB's), son una familia de compuestos clorados muy extendidos como líquido refrigerante en aparatos eléctricos y como aditivos en plásticos, textiles, papel, pinturas, entre otros (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017).

Son los microcontaminantes orgánicos más persistentes. El grupo de los bifenilos policlorados consta de 209 compuestos isoméricos y homólogos.

Su baja solubilidad y volatilidad hace que sean retenidos en el suelo por procesos de adsorción. Los organismos los incorporan por ingestión de alimentos contaminados. Se pueden bioacumular en la fauna acuática.

En el marco de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), en febrero de 1997, México, los Estados Unidos y Canadá aprobaron oficialmente un Plan de Acción Regional de América del Norte (PARAN) sobre bifenilos policlorados, que tienen entre sus metas principales, la eliminación virtual y el manejo ambientalmente adecuado de los bifenilos policlorados existentes a lo largo de todo su ciclo de vida (Plan de Acción Regional de América del Norte sobre Bifenilos Policlorados; www.cec.org).

4.5 Dioxinas y furanos.

Las policlorodibenzo-p-dioxinas y los policlorodibenzofuranos son un grupo de compuestos de gran estabilidad y alta toxicidad, presentes como elementos traza en productos aromáticos clorados sintéticos como el clorofenol. También se forman en la combustión de compuestos orgánicos halogenados. Provocan efectos teratogénicos, mutagénicos y potencialmente cancerígenos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017).

5. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.

Las conclusiones del modelo conceptual del sitio (MCS) se trasladarán al diseño de la investigación del sitio a evaluar. En la mayoría de los casos comenzará con el nivel básico (caracterización exploratoria) y en una segunda etapa con un mayor grado de detalle.

Existen una serie de hitos a contemplar en cualquier planeación de una caracterización de suelos, con el propósito de reducir al mínimo las improvisaciones, y que el resultado obtenido en la investigación logre el objetivo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010):

- a) Fechas previstas para los trabajos.
- b) Personal que interviene en las diferentes fases del trabajo.
- c) Localización de los puntos de muestreo seleccionados para cada matriz a investigar (suelos, agua subterránea, otros medios).
- d) Justificación técnica de la ubicación de dichos puntos (con base en las conclusiones de la investigación preliminar, o también conocido como muestreo dirigido).
- e) Profundidades estimadas de las perforaciones necesarias (con base en el conocimiento del subsuelo).
- f) Criterios de diseño a priori de los pozos de monitoreo a instalar.
- g) Número de muestras a tomar en cada perfil y profundidades estimadas a priori como idóneas, o criterios en los que se basará su selección.
- h) Método de perforación a emplear.
- i) Lineamientos normativos que es necesario aplicar para cada caso concreto.

- j) Ensayos “in situ”.
- k) Equipos para obtener las muestras de las diferentes matrices a analizar (suelo, agua, etc.).
- l) Volúmenes de muestra necesarios para los parámetros a analizar.
- m) Tipo y tamaño de frascos a emplear para la obtención de muestras
- n) Material auxiliar necesario.
- o) Condiciones de preservación y conservación a conseguir durante la custodia de las muestras.
- p) Normatividad y límites a aplicar, y en caso de no existir en México, valores de referencia internacionales.
- q) Ensayos analíticos de laboratorio necesarios y rangos de medida especiales requeridos para emitir adecuación a esos límites normativos.
- r) Subcontrataciones necesarias: empresa de perforaciones, laboratorios de ensayo, topografía, entre otros.
- s) Controles de calidad.
- t) Medidas de prevención de riesgos laborales.
- u) Medidas de prevención ambiental para tener en cuenta.

5.1 Plan de muestreo para suelo

Antes de iniciar la caracterización es necesario elaborar un plan de muestreo, el que puede ser solicitado por la autoridad ambiental o unidades de inspección, éstas por petición de parte, que verificarán el cumplimiento (evaluación de la conformidad) de las normas a aplicar en la caracterización.

Dentro del plan de muestreo la estrategia del muestreo en un sitio es muy importante: Estará en función de varios factores, como los objetivos de la evaluación, la ubicación y la naturaleza de las fuentes potenciales e identificadas de contaminación, de los componentes ambientales (potencialmente) afectados y de los receptores que están, o pueden estar, expuestos a la contaminación. Por esta razón no puede existir un patrón único para el desarrollo del muestreo en un sitio contaminado y es por ello que la elaboración correcta del modelo conceptual del sitio es fundamental para definir la estrategia del muestreo.

En la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 (Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra) se describen los diferentes métodos para la distribución de los puntos de muestreo, proporcionan las condiciones para su uso apropiado, así como las ventajas y desventajas de cada uno de ellos (apéndice A de esta norma mexicana). Los métodos que se proporcionan son los siguientes:

- Muestreo dirigido.
- Muestreo estratificado o zonificado.
- Muestreo sistemático.
- Muestreo aleatorio simple.

A pesar que esta norma de muestreo es para metales y metaloides, se puede utilizar la información del apéndice A de la norma para elaborar la estrategia de muestreo para otro tipo de contaminantes.

Es importante destacar que algunos de los apartados del plan de muestreo será necesario ajustarlos o modificarlos en campo en función de las observaciones realizadas durante las perforaciones, en cuyo caso lo realizará el personal técnico especializado, con la constancia de su justificación en un apartado que se deberá existir dentro del mismo plan de muestreo.

5.2 Caracterización exploratoria.

El objetivo del estudio de caracterización exploratoria es conocer la posible contaminación, o no, del suelo en un sitio, tomando como marco de referencia las zonas de la instalación que poseen riesgo de contaminación, sin tratar de delimitar por completo la extensión de dicha contaminación, pero identificando los diferentes contaminantes presentes y el orden de magnitud de las concentraciones analíticas.

5.2.1 Selección de los puntos de muestreo.

Se contemplarán diferentes medidas de diseño para la selección de puntos de muestreo, que dependerán del riesgo de afección que presenten, y de que el origen de la posible afección sean fuentes conocidas, o bien, éste no sea claro y localizable (esto es, zonas con posible contaminación difusa).

5.2.1.1 Zonas sin indicio o riesgo mínimo de contaminación.

Estas zonas corresponden con áreas de la instalación en las que existe certeza de que en ningún momento se ha desarrollado algún tipo de actividad potencialmente contaminante del suelo. Podrán estar exentas de estudio analítico, aunque para ello deberán ser claramente delimitadas y en el informe de caracterización se acompañará la información necesaria (extracto de la memoria y/o planos del proyecto, fotografía aérea multitemporal suficientemente nítida y aclaratoria, etc.) para corroborar que los usos soportados desde el inicio de la actividad han sido los mencionados anteriormente. De existir alguna duda de que, debido a otros usos anteriores, o por actividades limítrofes que puedan haber ocasionado vertidos, derrames y su posterior escorrentía, exista cierto grado de afección, o al menos no se pueda garantizar que nunca hayan presentado riesgo de contaminación, estas zonas deberán tener representación en el plan de muestreo del sitio, aunque se permitirá que inicialmente posean una densidad de muestreo considerablemente inferior, que no tendrá que ser incrementada de confirmarse en estos primeros análisis la ausencia de contaminación.

En este aspecto, se debe ser precavido con áreas de terreno sin pavimentar, en la actualidad o en épocas pasadas, especialmente en sitios de cierta antigüedad, debido a la existencia de malas prácticas (por ejemplo, entierros de residuos) en momentos históricos donde no existía una conciencia ambiental adecuada. En estas zonas se propone un número de puntos de muestreo equivalente aproximadamente al 30% de los reflejados para zonas de contaminación de origen difuso, con la selección de

ubicaciones en función de la heterogeneidad del área, posibles arrastres de contaminación de otras áreas, entre otros.

Pero, si los resultados de estos puntos de muestreo denotan concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles de los diferentes contaminantes en el suelo, debe rechazarse la hipótesis inicial de ausencia de contaminación e incorporar la zona de nuevo al plan de muestreo considerando su contaminación de origen difuso.

5.2.1.2 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido.

Se seleccionarán como puntos de muestreo, las zonas de la instalación donde a partir de la investigación preliminar, se deduzca la existencia actual o histórica de elementos localizables de la actividad con posibilidad de afectar la calidad de los suelos y agua subterránea con sustancias o residuos peligrosos. Se considerarán, por ejemplo, los siguientes (UNE-ISO 10381-5:2010):

- Lugares de almacenamiento, en superficie mediante depósitos superficiales y especialmente en depósitos subterráneos, de materias primas, productos y residuos, que pudieran haber afectado a los suelos por fugas y/o derrames.
- Sitios de carga y descarga de sustancias y residuos peligrosos.
- Zonas de proceso y auxiliares, en las que se hayan manipulado o tratado estas sustancias (cabinas de pintura, transformadores, etc.).
- Tuberías de distribución de materias primas, productos o residuos, especialmente las subterráneas, o superficiales sobre terrenos sin pavimentación actual o pasada.

- Drenajes de aguas residuales, pluviales contaminadas o residuos; separadores de hidrocarburos, fosas sépticas, entre otros.
- Zonas en las que conste se hayan producido accidentes o incidentes de tipo ambiental.

Se deberá estudiar cualquier otra zona del sitio que presente un claro riesgo o evidencias de afección a los suelos, incluyendo los límites del predio, si se tuviera información o se tuviera indicios de la afección a predios colindantes. Cada zona de riesgo identificado, deberá contar como mínimo con un punto de muestreo, ubicado, de ser posible, en una zona central de la misma, o donde se identifiquen signos de afectación, así como considerar al menos un punto, aguas abajo en el sentido de la escorrentía y/o del flujo subterráneo, a menos que se tenga información previa de que la propagación sea posible en otras direcciones, por ejemplo, por condiciones geológicas.

Si la fuente de contaminación es una estructura de dimensiones significativas (por ejemplo, una laguna), el número de puntos de muestreo a ubicar sobre la estructura y en el perímetro de ésta, será igual o mayor al que la que correspondería a una superficie de iguales dimensiones con origen de contaminación difusa, según lo indicado en el apartado siguiente.

Cuando la fuente de contaminación sea una estructura lineal (tubería), se dispondrán puntos de muestreo sucesivos cada cierta distancia, siguiendo la traza en planta de la conducción (para tuberías desmanteladas) o ligeramente desplazadas de la misma a un lado y a otro de forma alterna (para tuberías en uso). Además del punto inicial y final de la conducción, se adoptarán puntos de muestreo en ubicaciones intermedias de la misma, teniendo en cuenta la siguiente tabla como guía:

Tabla 1. Densidad de muestreo exploratorio en fuentes lineales.

Longitud de la tubería (m)	Distancia entre puntos intermedios de control (m)	Número puntos de muestreo
50	25	3
100	33	4
250	60	5
500	100	6
1,000	150	8
2,500	200	14
5,000	250	21
10,000	300	34
20,000	350	58

Nota: Para longitudes de tubería intermedias a las reflejadas en la siguiente tabla, se tomará una distancia entre puntos de muestreo proporcional, por interpolación lineal, entre los correspondientes a una longitud de tubería menor y mayor a la dada.

Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2017.

5.2.1.3 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido.

Estas zonas corresponden con áreas del predio donde se han llevado a cabo actividades de proceso principales o actividades auxiliares, pero en las que no se puede identificar a priori, puntos concretos con mayor riesgo de contaminación, por ejemplo: a) Áreas de proceso en general, b) Rutas de transporte sin pavimentación actual o histórica y c) Áreas anexas a las naves de proceso sobre las que se haya llevado a cabo algún tipo de actividad.

Se delimitarán en el predio cada una de las áreas con estas características y en cada una de estas zonas se dispondrá una malla de muestreo sistemática o regular, con un espaciado entre puntos próximos más o menos constante. La densidad de la malla de muestreo diseñada deberá ser técnicamente justificada, o se puede adoptar, como densidad mínima, la de la siguiente tabla:

Tabla 2: Densidad de muestreo exploratorio en zonas de contaminación difusa.

Superficie (Ha)	No. de puntos de muestreo
Hasta 0.03	1
0.06	2
0.1	3
0.25	3
0.5	4
0.75	4
1	5
2	6
3	8
4	10
5	12

Superficie (Ha)	No. de puntos de muestreo
7,5	16
10	19
15	25
20	33
25	42
30	50
35	58
40	67
45	75
50	83
60	100

Nota: Para superficies intermedias a las reflejadas en la siguiente tabla, se tomará un número de puntos proporcional, por interpolación lineal, entre los correspondientes a una superficie menor y mayor a la proporcionada.

Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2017.

En zonas de proceso en funcionamiento donde existan obstáculos para el acceso de la maquinaria necesaria para la realización de las perforaciones, se podrá obviar temporalmente el muestreo siempre y cuando no existan evidencias de posible contaminación (vapores, olores, contaminación en pozos de monitoreo anexos aguas abajo, etc.). Esta exclusión del muestreo deberá ser descrita y justificada de forma clara en el correspondiente informe, con la aclaración sobre la necesidad de realizar el muestreo en caso de remodelación o clausura de la actividad. Siempre se procurará incorporar al plan de muestreo aquellas fuentes conocidas de posible contaminación incluidos dentro estas zonas de proceso, especialmente si se trata de depósitos de sustancias potencialmente contaminantes del suelo (UNE-ISO 10381-5:2010).

Es importante destacar que siempre se debe considerar como número mínimo de puntos de muestreo, los que se establecen en las Normas Oficiales Mexicanas (hasta el momento la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), con el objetivo de no incumplir con estos lineamientos técnicos.

5.2.2 Selección de las profundidades de muestreo.

Como una consideración general, siempre se tomará una muestra superficial dentro de los primeros 30 cm aproximadamente (excluyendo pavimentación), por ser la superficie una de las zonas con mayor riesgo a recibir posibles vertidos o derrames. No obstante, siempre se podrán hacerse excepciones técnicamente justificadas, en aquellos casos en que se puedan aportar evidencias de que no existe contaminación en dicho nivel (por ejemplo, mediante medidas in situ).

Para el muestreo a profundidad, se debe considerar el obtener muestras en los siguientes niveles de interés (UNE-ISO 10381-1:2007):

- a) En cada horizonte litológico natural o relleno antrópico que sea claramente diferenciable: intervalos de la columna de suelo que presenten contrastes de granulometría, color, homogeneidad interna, entre otros.
- b) En caso de que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente orgánico, el muestreo se podrá dirigir a aquellos niveles que presenten algún tipo de indicio visual u organoléptico de posible contaminación.

- c) En caso de que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente metálico, el muestreo se realizará sobre los diferentes niveles de rellenos antrópicos existentes más el primer nivel de terreno claramente natural que posea ciertas limitaciones a la permeabilidad de los posibles lixiviados (limos y arcillas).

- d) Cuando existan sucesiones litológicas de mayor a menor permeabilidad, de arenas a limos o arcillas (por ejemplo el contacto entre el relleno antrópico y el terreno natural) y no existan otros indicios diferentes de posible contaminación, las muestras se tomarán en las zonas de acumulación preferente de contaminantes: la correspondiente a la litología de mayor permeabilidad en la base del contacto entre ambas y la muestra de la litología de menor permeabilidad en el techo del contacto con el material más permeable.

- e) En cualquier nivel, inclusive a diferentes profundidades dentro de un mismo horizonte, que presente indicios visuales u organolépticos claros de posible afección y/o la acumulación de residuos (escombros, plásticos, restos minerales, cenizas, escorias, etc.).

Se entenderá por nivel con indicios claros cualquier nivel de la columna de sondeo con coloraciones anómalas o destacables del resto, así como evidencias organolépticas, aunque no sean muy marcadas.

Cuando los puntos de muestreo se dispongan alrededor de alguna fuente de contaminación subterránea (por ejemplo, depósitos subterráneos o tuberías enterradas), se tomará una muestra en un intervalo de profundidad bajo la base de la fuente (aproximadamente 2 metros o menor en función de la proximidad al mismo). En caso de que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente orgánico, el muestreo se podrá dirigir a aquellos niveles que presenten algún tipo de indicio visual u organoléptico de posible afección.

Cuando los posibles contaminantes a detectar sean hidrocarburos u otros contaminantes inmiscibles y menos densos que el agua, se tomará una muestra en la franja de oscilación del nivel piezométrico, ya que suele ser un lugar de acumulación de este tipo de contaminantes, los que tienden a formar una fase líquida no acuosa ligera (LNAPL) sobre el nivel piezométrico, que lo acompaña durante sus ascensos y depresiones impregnando esa franja de terreno.

En aquellos casos en que el punto de muestreo se ubique alrededor de alguna posible fuente de contaminación que se encuentre parcial o totalmente sumergida bajo el nivel freático, deberá tomarse una muestra a la altura de la base del mismo, o a diferentes profundidades si se trata de una fuente menos localizada (por ejemplo rellenos antrópicos potentes), aun cuando haya de realizarse en la zona saturada, con la consiguiente aclaración, normalmente menos significativa, de la fase disuelta retenida en la muestra. Se dejará constancia de que la muestra se obtuvo en la zona saturada en el correspondiente informe.

Cuando los posibles contaminantes a detectar sean compuestos orgánicos más densos que el agua (por ejemplo organoclorados) y existan en profundidad niveles de litologías más impermeables, ya sea lenticulares de limitada extensión o formaciones de mayor escala que funcionen como base del acuífero, se tomarán muestras tanto en la base del material más permeable como en el techo del nivel impermeable, aun cuando deba realizarse en zona saturada, ya que suelen ser lugares de acumulación de este tipo de contaminantes, donde tienden a formar una fase líquida no acuosa pesada (DNAPL). Con independencia de ello, puede ser igualmente necesario tomar alguna muestra en alguna profundidad intermedia en la que se intercepte la ruta de migración de estos compuestos, y se pueda detectar dicha DNAPL en forma residual.

En cualquier caso, el objetivo es delimitar en profundidad la contaminación del suelo en la zona no saturada, y de no ser así, se seguirán tomando sucesivas muestras a mayor profundidad.

El número de muestras a tomar en profundidad dentro de cada perfil podrá reducirse si se aportan evidencias mediante la utilización de equipos de medición “in situ”, de que no existe afección en los niveles de muestreo recomendados anteriormente. Los equipos de medición “in situ” deberán ser apropiados a los contaminantes previstos en el plan de muestreo, por ejemplo, mediciones con detector por fotoionización portátil (PID) para hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles, mediciones con detectores de fluorescencia de rayos X (XRF) para metales, entre otros.

En presencia de agua subterránea se tomarán muestras adicionales en la franja de oscilación del nivel freático y en los puntos de interés de la zona saturada en función de los resultados in situ y/o los indicios visuales u organolépticos. No se deberá realizar este tipo de muestreo en niveles dinámicos, solo en niveles estáticos.

Para los muestreos verticales, se debe considerar como número mínimo de muestras, las que se establecen en las Normas Mexicanas (hasta el momento la NMX-AA-132-SCFI-2016), con el objetivo de no incumplir con estos lineamientos técnicos.

5.2.3 Muestras simples y muestras compuestas.

Se entiende por muestra simple o puntual aquella muestra de material obtenida en un solo punto y a una profundidad dada, que de manera práctica es la porción del tubo partido, cuchara o hand auger que sea necesario hincar para obtener un adecuado volumen de muestra de suelo (40 cm como máximo). Y muestra compuesta es aquella formada a partir de varias muestras puntuales, mezcladas en proporciones casi iguales, a partir de la que se pretende obtener el valor medio de una variable característica.

En la evaluación de suelos contaminados es importante obtener valores de concentración media suficientemente representativos de las diferentes zonas estudiadas. Las muestras compuestas proporcionan en teoría mayor representatividad que las puntuales, pero no son aconsejables en el estudio de caracterización de suelos por varios motivos (UNE-ISO 10381-1:2007):

- a) El subsuelo no es un medio homogéneo, por lo que existe un alto riesgo de provocar la no detección de una zona contaminada por dilución de muestras que presenten afección con otras sin ella.
- b) Al no ser un medio homogéneo y disponer por lo general un reducido número de puntos de muestreo con relación a la superficie a estudiar, las muestras compuestas reducirían la información disponible sobre la variabilidad espacial en la distribución de contaminantes.
- c) Su mezcla ha de realizarse a partir de alícuotas homogenizadas de igual masa, difíciles de obtener en campo sobre alícuotas de diferente granulometría y grado de humedad, por lo que la mezcla debería realizarse en laboratorio.
- d) Dicha homogenización no es compatible con la caracterización de compuestos volátiles.

Se limita por ello con carácter general el uso de muestras compuestas, y se aconseja su sustitución por el análisis de muestras puntuales, que aportan más información espacial, y permiten asimismo el cálculo de valores medios estadísticos si se dispone de un número suficiente de datos. Únicamente se podrían emplear muestras compuestas para poder descartar la existencia de contaminación de determinadas áreas del predio con bajo riesgo de contaminación.

5.2.4 Muestreo de agua subterránea.

De existir agua subterránea susceptible de afectación por contaminación del suelo se procederá a incorporarlas al plan de muestreo.

Para este muestreo se ubicarán un mínimo de 3 pozos de monitoreo para el control del agua subterránea, de manera que también se pueda determinar, de manera general el sentido y gradiente del flujo subterráneo. Se incrementará este número de puntos de muestreo, con base en los siguientes criterios (UNE-EN ISO 5667-3:2013):

- a) Se instalarán pozos de monitoreo junto a depósitos de combustibles líquidos (sobre la fuente, si ya fueron retirados y en caso contrario a menos de 5 metros en la dirección del flujo).
- b) En el resto las fuentes de contaminación conocidas, se ubicarán en las localizaciones más críticas del predio, igualmente sobre la fuente o a menos de 5 metros en el sentido del flujo subterráneo, con especial atención a la existencia de otros contaminantes líquidos, suelos que puedan lixiviar ciertas sustancias, entre otros.
- c) En zonas de contaminación difusa se ubicará al menos un pozo de monitoreo que, dentro del perímetro de la zona, se ubique en una posición aguas abajo de la misma.
- d) Se dispondrá al menos un pozo de monitoreo en alguna posición aguas arriba del sitio que facilite la configuración de isoclinas de la elevación del nivel del agua subterránea.

5.3 Caracterización de detalle.

El objetivo de la caracterización de detalle, es la delimitación de la contaminación (horizontal y verticalmente), la reducción de incertidumbres y el ajuste tanto de los riesgos calculados como de los niveles objetivo establecidos para elaborar la propuesta de remediación.

5.3.1 Selección de los puntos de muestreo.

En lo que respecta a la delimitación de la extensión de la contaminación y el afinamiento de las concentraciones características, para la elaboración del plan de muestreo detallado de suelos se deberá diferenciar en el sitio las zonas de contaminación de fuentes conocidas, de las fuentes difusas o no conocidas.

5.3.1.1 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido.

En torno a cada uno de los puntos de muestreo que en fase exploratoria hayan superado niveles normativos, se dispondrán puntos de muestreo adicionales, en diferentes direcciones del espacio, que permitan delimitar la extensión de la contaminación.

5.3.1.2 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido.

Se dispondrá una malla de muestreo que completará la ya existente en la fase exploratoria, y que se asemejará a una red de muestreo sistemática o regular, con un espaciado entre puntos próximos más o menos constante. La densidad de la malla de muestreo diseñada deberá ser técnicamente

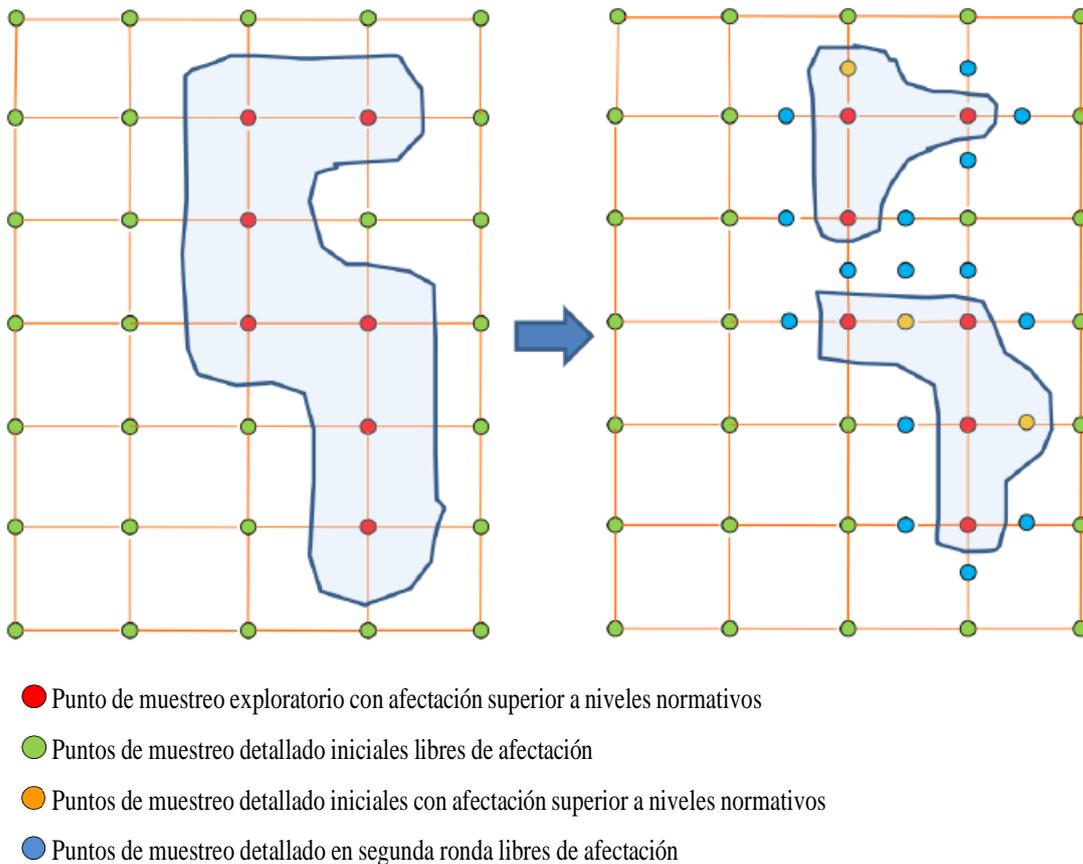
justificada, que puede adoptar como densidad mínima, en conjunto con la red exploratoria ya existente.

5.3.1.3 Delimitación de la extensión en superficie de la contaminación.

En cualquiera de los supuestos establecidos, la distribución resultante de los puntos de muestreo deberá ser tal que delimite en superficie la extensión de la contaminación del suelo. Para ello, la masa o nube de puntos en los que haya sido detectada la contaminación, deberá estar rodeada con valores inferiores a los niveles normativos o al nivel de remediación específico del sitio.

En zonas con riesgo de contaminación de origen difuso o no conocido, se encontrarán puntos con contaminación y otros puntos libres de ella. Los puntos con contaminación contiguos configurarán zonas contaminadas, cuyos límites es posible afinar. Para ello, en torno a los puntos contaminados, se podrán disponer nuevos puntos de muestreo en las direcciones correspondientes de la malla de muestreo en la que se observen puntos limpios de afección, a una distancia más o menos intermedia entre ambos puntos (**Figura 5**).

Figura 5. Delimitación de la contaminación en torno a zonas con contaminación difusas.



Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2017.

5.3.2 Selección de las profundidades de muestreo.

Se seguirán los mismos criterios expuestos para investigaciones exploratorias. En zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido podrán obviarse las muestras correspondientes a un determinado horizonte, por ejemplo, materiales de relleno recientes, si los resultados analíticos de una etapa anterior de la investigación no presentan contaminación en ninguno de los casos y la malla de puntos de esa primera fase cubre toda la zona a estudiar.

5.3.3 Muestras simples y muestras compuestas.

En la caracterización de detalle no se podrán tomar muestras compuestas.

5.3.4 Plan de muestreo de agua subterránea.

La malla diseñada para el muestreo de agua subterránea será lo suficientemente extensa como para, apoyándose en su caso, en la red de muestreo habilitada en la etapa exploratoria, delimitar la extensión y profundidad de la contaminación.

En el estudio de la contaminación del agua subterránea se tomará un punto de referencia aguas arriba de los posibles focos de contaminación del predio, y a partir de él, varios puntos aguas abajo en la dirección del flujo subterráneo, y también perpendicularmente, de manera que abarquen aproximadamente tanto la longitud como la anchura de la posible pluma contaminante. Se tendrá en cuenta que en casos excepcionales puede ocurrir que la pluma contaminante no tenga por qué extenderse de forma totalmente congruente a favor de la dirección del flujo subterráneo, en cuyo caso se plantearán las ubicaciones de muestreo adicionales y alternativas necesarias para delimitar la contaminación. Así puede ocurrir con las fases libres en presencia de determinadas estructuras geológicas en el subsuelo (por ejemplo, estratificación oblicua a la dirección del flujo). Los puntos de muestreo tratarán de seguir una disposición radial que parta del punto de referencia, para ello habrá que adaptar la disposición de los diferentes puntos de forma que se cubran las principales zonas de almacenamiento de materias, productos y residuos, y las principales zonas de procesos (UNE-EN ISO 5667-3:2013).

En cualquier caso, se dispondrán puntos de muestreo en el límite del predio en estudio con otros predios colindantes, en el sentido del flujo subterráneo. De detectarse contaminación en algunos de estos puntos respecto a las aguas del punto de referencia, y respecto a los criterios normativos, será necesario prolongar la malla de muestreo, para lo que deberán obtenerse los permisos o autorizaciones necesarios. De existir pozos de aprovechamiento de agua subterránea en el entorno del sitio que pudieran verse afectados por la contaminación del suelo, serán incorporados al plan de muestreo.

5.4 Control de calidad del muestreo.

Deberá llevarse a cabo un programa de control de calidad de los muestreos, que cubra especialmente el tratamiento de limpieza de los equipos y materiales aplicado en todo el proceso, el cuidado y la limpieza con la que se realiza la toma de muestras, así como el grado de preservación y su conservación conseguido desde el momento de la toma hasta el análisis.

Se realizará para ello al menos, con carácter general, un blanco de muestreo por cada campaña y matriz analizada (suelo, agua), consistente en el enjuague controlado de los equipos de muestreo empleados con agua exenta de los analitos estudiados, incluido el equipo de perforación de suelos empleado y el equipo de toma de muestras de agua utilizado, con el estado habitual de limpieza con el que se emplean, recogiendo el agua obtenida en cada caso en los recipientes habituales de muestreo, con la preservación y conservación habituales, y analizando en el agua recogida en cada caso, con los mismos métodos analíticos y los parámetros

analíticos que correspondan a las muestras de suelo o agua (según el caso) reales de la inspección.

El agua empleada en la confección del blanco no debe incluir, siquiera a nivel de trazas (especialmente en el blanco del muestreo de aguas), los contaminantes analizados, puesto que de lo contrario no se podrán extraer conclusiones válidas sobre el proceso de muestreo llevado a cabo. Algunas aguas desionizadas incorporan dichas trazas, por lo que se recomienda se empleen materiales de calidad contrastada (agua HPLC). Alternativamente, el blanco de suelos también puede ser llevado a cabo en un volumen de suelo certificado o caracterizado exento de contaminación.

Los resultados obtenidos, idealmente, deberían ser inferiores a los límites de cuantificación analíticos, aunque en el muestreo de suelos, por las características de las herramientas de perforación metálicas y la dificultad en su absoluta limpieza, no es descartable que se registren algunas trazas de contaminantes.

Estas trazas, no obstante, no deben diferir significativamente de los límites de cuantificación analíticos, y en todo caso deben ser notablemente inferiores a los valores límite normativos o los valores de referencia empleados en la inspección, de manera que la evaluación de conformidad de las muestras no pueda quedar en entredicho por una posible contaminación cruzada.

5.4.1 Cadenas de custodia y conservación de muestras.

Los recipientes por emplear, la conservación de muestras de suelos y agua subterránea, y el tiempo máximo recomendado para el análisis deberán ser acordes con los requerimientos de los métodos analíticos que posteriormente van a ser empleados, los que están en las dos normas que hasta el momento se tienen en México para la caracterización de sitios contaminados; la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para hidrocarburos y la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para metales.

En caso de evaluar otros contaminantes, consultar con el laboratorio subcontratado, o consultar las guías que existen al respecto, un par de ellas son las siguientes: ISO 18512:2007 “Soil quality -- Guidance on long and short term storage of soil samples” para suelos e UNE-EN ISO 5667-3:2013 Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua.

Las muestras de suelo no requieren normalmente ningún tipo de preservación química, salvo para el muestreo de compuestos orgánicos volátiles (COV's). Y en general las muestras de suelo sólo se mantienen a temperatura de 4 °C y que no estén expuestas a la luz solar. En las normas NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, hay un apartado de preservación y almacenamiento de muestras.

Las muestras de agua sí requieren preservación (acidificación, alcalinización) para algunos parámetros (compuestos orgánicos volátiles, metales, cianuros, etc.). La preservación química de las muestras se realizará preferentemente en campo, empleando pequeñas cantidades de

reactivos concentrados de alta calidad, en especial para aquellos parámetros con menores tiempos recomendados de análisis, a menos que sea contraproducente para otras etapas analíticas.

Las muestras de agua pueden requerir también una filtración previa a su conservación (como en el caso del análisis de metales disueltos) o siempre que los métodos normalizados de conservación de muestras reflejados en la norma ISO 5667-3, o las indicaciones expresas del laboratorio contratado para el análisis así lo requieran. No se considera aceptable la filtración de muestras en otras circunstancias diferentes a las indicadas, ya que podría interferir en los resultados. El filtrado y la acidificación en campo de muestras de aguas para metales disueltos pueden ser complicados en muestras en las que sea inevitable la presencia de sólidos en suspensión y en función también del volumen de muestra necesario. En estos casos se acepta también una acidificación y filtración de las muestras en laboratorio si el tiempo transcurrido tras la toma hasta su recepción de laboratorio es inferior a 48 horas.

Las muestras de agua, con carácter general (y también las de suelo cuando se estén estudiando parámetros tales como compuestos orgánicos volátiles, Cr VI y Hg volátil) deberán ser refrigeradas y mantenidas en la oscuridad, desde el mismo momento de la toma de muestra, durante el proceso de transporte, almacenamiento y envío al laboratorio analítico donde se destinen.

Las condiciones de temperatura requeridas varían según las fuentes disponibles, pudiéndose admitir que la temperatura de las muestras desde el momento del muestreo vaya reduciéndose progresivamente durante la jornada de campo, sin repuntes significativos en tiempo y magnitud, hasta

conseguir, por lo general, una temperatura de 8 °C a su finalización, y que ésta se mantenga así durante el almacenamiento temporal de las mismas en refrigeradores y el transporte antes de su recepción en laboratorio (UNE-EN ISO 15175:2011).

Se conservarán registros en continuo de las temperaturas de conservación conseguidas desde el momento de la toma de muestras hasta su recepción en el laboratorio. En caso de presencia de contaminantes volátiles, deberá minimizarse todo lo posible la exposición de la muestra a la atmósfera ambiente. Deberá tomarse suficiente muestra para llenar al máximo los recipientes empleados, evitando dejar cámaras de aire que favorezcan la volatilización de los analitos. No obstante, en el caso de muestras de suelo, tampoco se disgregarán en exceso los trozos de testigo cohesivos para conseguir esta reducción de la cámara de aire, ya que se puede obtener un efecto contrario al deseado al exponer el interior del testigo al aire ambiente.

Las muestras estarán identificadas en todo momento desde su toma, mediante etiqueta resistente a la humedad donde conste al menos el código de la muestra, la fecha y la hora del muestreo. La etiqueta no reflejará la identidad del titular del emplazamiento investigado, para salvar su confidencialidad frente al laboratorio que realiza los análisis. La identificación dada en campo a las muestras, que deberá ser única y no confundible con otras muestras de ese o de otros trabajos, se mantendrá durante todo su proceso de gestión y en todos los registros e informes relacionados con la investigación, incluyendo los certificados emitidos por el laboratorio de ensayo.

Se dispondrá de registros de la cadena de custodia, donde se refleje la gestión realizada a las muestras desde el momento de su toma hasta su recepción en el laboratorio de destino: fecha y hora de toma, codificación única, frasco utilizado, preservación aplicada, temperaturas de conservación desde la toma hasta la recepción por el laboratorio, equipos empleados en la conservación y la medida de la temperatura, fecha y hora de envío a laboratorio y de recepción en el mismo. Se adjuntará en el informe de resultados copia de las cadenas de custodia de las muestras obtenidas en el sitio.

5.5 Ensayos analíticos para realizar en la caracterización.

5.5.1 Selección de los parámetros analíticos.

Los ensayos analíticos para realizar sobre las muestras obtenidas en la caracterización exploratoria o de detalle, serán aquellos que respondan a la composición de las materias, productos y residuos que han podido afectar a la calidad de los suelos y/o al agua subterránea, de acuerdo con las conclusiones de la investigación preliminar. Si el punto de muestreo se localiza en un área con riesgo de contaminación de origen conocido, los análisis podrán ajustarse a la naturaleza de las sustancias concretas asociadas a esa área de contaminación (UNE-ISO 10381-2:2007).

Si la composición de las sustancias no se conoce con absoluta certeza, o pudieran estar involucradas otras sustancias contaminantes diferentes a las conocidas, se realizará, al menos en investigación exploratoria, una corrida analítica más completa. Si el punto de muestreo se localiza en un área con riesgo de contaminación de origen difuso o no conocido, la corrida

analítica deberá ser lo más completa posible, al menos en investigación exploratoria, de acuerdo con la naturaleza de las sustancias manejadas o producidas en la totalidad del proceso productivo.

5.5.2 Calidad de los ensayos.

Los análisis de laboratorio en la caracterización, deberán ser realizados siempre por laboratorios de ensayo acreditados por una entidad de acreditación y aprobados por las autoridades que les corresponda de acuerdo a la matriz a analizar, para el suelo la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y para agua la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Es recomendable emplear equipos de análisis y mediciones “in situ” para valorar el grado de afección de las diferentes zonas del sitio, y distribuir con base en sus resultados, la densidad de muestreo planteada. En cualquier caso, los ensayos con equipos “in situ” nunca sustituirán los ensayos de laboratorio, que deberán realizarse en los puntos de muestreo finalmente seleccionados, y que, con mayor o menor densidad, deberán cubrir la totalidad de la superficie del predio con riesgo de contaminación.

5.6 Mediciones y pruebas a realizar en la caracterización.

5.6.1 Medición de niveles de agua subterránea.

Es muy importante llevar a cabo la medición de la profundidad al nivel freático, y en su caso de producto libre si lo hubiera (LNAPL o DNAPL) mediante el uso de sonda interfase. Las mediciones serán realizadas de forma más o menos simultánea en todos los pozos de monitoreo instalados y en condiciones de estabilidad de los niveles. Para ello debe transcurrir el tiempo necesario para la recuperación total de niveles tras cualquier bombeo realizado (por ejemplo, en el desarrollo o el purgado). Se deberán contemplar varias campañas de medición para identificar las variaciones periódicas de nivel, por ejemplo, lluvias y estiaje, por estar sometidas a la influencia de las mareas, por existencia de bombeos próximos intermitentes, etc.

Las profundidades al nivel que se obtengan se restarán a las cotas determinadas por la topografía de precisión para los puntos de referencia empleados en las mediciones (boca del tubo, brocal, etc.), con objeto de determinar las cotas reales (o relativas respecto a un nivel de referencia común, nivel del mar) del nivel piezométrico en cada punto de muestreo, para elaborar mapas de isocotas de igual elevación por algún método de interpolación estadísticamente válido, o por interpolación lineal si se dispone de pocos puntos de medida.

En presencia de fase libre ligera (LNAPL), las elevaciones del nivel del agua sobre el nivel de referencia adoptado deben corregirse por el efecto de depresión que ejerce dicha fase libre. De acuerdo con el procedimiento de

Manual wáter level measurements (SERAS, 2002), la cota del nivel del agua debe ser incrementada con el resultado de multiplicar el espesor de fase libre por su densidad, y en caso de desconocerse la densidad, considerar un valor de 0.8, valor que asigna el manual referido para estandarizar la densidad de la fase libre ligera.

5.6.2 Conductividad hidráulica de la zona saturada.

Se podrá obtener la conductividad hidráulica del material constituyente del subsuelo en varios de los pozos de monitoreo instalados, de tal forma que las medidas sean representativas del sitio y de las diferencias litológicas que hayan podido identificarse en las columnas de cada sondeo. Esta estimación se llevará a cabo mediante ensayos de bombeo y/o recuperación siempre que ello sea posible, o en su defecto mediante slug tests (https://www.igme.es/productos_descargas/aplicaciones/Manual_SlugIn.pdf). Estos ensayos de conductividad corresponderán al nivel de la zona saturada donde se prevé la mayor contaminación y en el que se habrá llevado a cabo el muestreo, que normalmente, salvo excepciones, corresponderá al acuífero más superficial en régimen libre.

En caso de estimarse durante la investigación el semiconfinamiento o el confinamiento del nivel de interés por el ascenso del nivel del agua tras la perforación sobre niveles de menor permeabilidad, se tendrá en cuenta para la interpretación y evaluación de los resultados. Se emplearán métodos de cálculo adaptados a las características del nivel de zona saturada investigada, aportando los cálculos realizados y/o las salidas gráficas del software empleado.

5.6.3 Otros ensayos adicionales.

En caso de que la caracterización sea de detalle debe contemplarse además, la posibilidad de realizar algunos otros ensayos adicionales, todos ellos con la debida representatividad espacial y/o temporal, como los siguientes (UNE-ISO 10381-1:2007):

- a) Determinaciones adicionales de las propiedades del suelo que influyan en la volatilización de contaminantes (por ejemplo, porosidad) o en la lixiviación hacia el agua subterránea (por ejemplo, la conductividad hidráulica vertical en zona no saturada).
- b) Ensayos de disponibilidad oral humana (bioaccesibilidad in vitro)
- c) Ensayos de disponibilidad mediante lixiviación al agua subterránea y superficial.
- d) Ensayos adicionales de especiación para algunos contaminantes (As, Sn, etc.)
- e) Medidas de partículas en suspensión en inmisión de espacios abiertos.
- f) Medición de contaminantes en alimentos posiblemente afectados por las concentraciones del suelo.

El plan de muestreo para la caracterización de estas variables debe ser representativo de las diferentes zonas consideradas o a considerar en el análisis de riesgos, las diferentes litologías o materiales de relleno causantes de los riesgos que se pretenden afinar, valores de pH y carbono orgánico del suelo registrados, etc.

5.7 Uso y control de equipos útiles para la caracterización.

Para el muestreo de suelo y agua subterránea asociada, es necesario disponer de los siguientes equipos:

- Detector de fotoionización portátil (PID).
- pHmetro – conductivímetro.
- Sonda de interfase.

Es altamente recomendable, igualmente, disponer de espectrómetro por fluorescencia de rayos X (XRF) para la determinación semicuantitativa de metales.

El muestreo de suelo sin hacer uso de PID o de espectrómetro XRF sería posible apoyándose únicamente en las evidencias visuales y organolépticas, pero no permitiría discernir con fiabilidad diferentes grados de afección dentro de la columna, ni siquiera identificar en el caso de los metales algunas concentraciones de interés. Por tal motivo, en caso de no hacer uso de estos equipos, el número de muestras a tomar y ensayar en laboratorio dentro de cada perfil se incrementaría significativamente, de acuerdo con lo expresado en el apartado de selección de muestras en profundidad de este documento.

5.7.1 Detector de fotoionización (PID).

Este equipo se emplea para la determinación genérica de compuestos orgánicos volátiles en la fase gaseosa del suelo y es una herramienta de utilidad en la selección de muestras en estudios de suelos potencialmente contaminados por este tipo de compuestos (hidrocarburos, disolventes, etc.). El equipo ha de calibrarse diariamente (con cada uso) mediante la lectura del cero (aire limpio sin contaminar) y la lectura de al menos un gas patrón (normalmente isobutileno de 100 o 1000 ppm) contenido en una botella presurizada (UNE-ISO 10381-7:2010).

Los resultados obtenidos, genéricos, no específicos de un determinado compuesto, se miden en unidades (ppm) equivalentes del gas patrón empleado. La calibración del equipo, una vez realizada, debe verificarse mediante la medida, en modo lectura de muestras, de alguna concentración del mismo gas patrón empleado en la calibración, preferentemente de otra botella y concentración diferente a la empleada en la calibración. Los resultados de la verificación deben evaluarse por la entidad en función de criterios lógicos de aceptación-rechazo, aceptándose normalmente hasta un 10% de desviación.

El procedimiento de medida habitualmente empleado consiste en la toma de una porción de suelo recién extraído de la perforación, su introducción en una bolsa de cierre hermético, su desagregación, la espera de un tiempo dado para permitir la volatilización de los compuestos hacia la fase gaseosa de la bolsa, y la medida de ésta (medidas head space) mediante la apertura de un pequeño orificio en la bolsa, la introducción de la sonda de

aspiración del equipo y anotando las lecturas obtenidas, normalmente los valores máximos en un cierto intervalo.

Se deben tomar muestras para lectura de PID cada vez que se alcance un nivel de profundidad de interés para el muestreo (evidencias organolépticas, franja de oscilación del nivel freático) y en su defecto, a intervalos regulares de profundidad. En cualquier caso, cada vez que se tome una muestra para medida con PID, se tomará una muestra reservada para análisis físico-químico. Las bolsas deben identificarse en el momento de su llenado, y realizar las medidas respetando unos tiempos homogéneos de estabilización comunes de unas muestras a otras, normalmente entre 15 y 25 minutos según las fuentes (UNE-ISO 10381-7:2010).

Al finalizar el sondeo, con base en las lecturas del detector por fotoionización portátil (PID) disponibles, en conjunción con otros criterios (indicios visuales y organolépticos, sucesión litológica), se procederá a seleccionar las muestras a ensayar en laboratorio, que deberán haber sido recogidas previamente en los recipientes adecuados y conservadas bajo refrigeración desde el momento en que la muestra del detector por fotoionización portátil fue tomada. Quedarán registros de las calibraciones y verificaciones, fecha y hora de su realización, gases patrón empleados, etc., así como de los resultados de cada medida realizada junto a su profundidad en cada perfil.

5.7.2 pHmetro-conductivímetro.

Este equipo se emplea para la determinación, mediante la estabilización de las medidas consecutivas realizadas, del punto final del desarrollo/purgado de un pozo, así como para la determinación del pH y conductividad “in situ” del agua subterránea tomada en los pozos de monitoreo.

El equipo ha de calibrarse diariamente (con cada uso) mediante la lectura de una o más soluciones patrón (dependiendo del equipo y el modelo) de concentración conocida, habitualmente desde 1 a 10 Ud para pH y 0,1 a 100 mS/cm para conductividad. Se debe comprobar que los resultados de la calibración realizada son aceptables, con base en los valores que el equipo devuelva sobre el algoritmo de calibración realizado (pendiente de asimetría en pH, constante de celda en conductividad, etc.).

La calibración del equipo, una vez realizada, debe verificarse mediante la medida, en modo lectura de muestras, de alguna otra solución patrón. Es importante que estos patrones de verificación sean de diferente marca y/o concentración a los empleados en la calibración, con objeto de detectar calibraciones defectuosas a causa de un patrón de calibración deficiente o en mal estado.

Los criterios de aceptación-rechazo de las verificaciones de pH y conductividad deben ser acordes aproximadamente con los valores requeridos para la estabilización físico química. En el uso de estos equipos es necesario controlar la antigüedad de las soluciones patrón con las que se está calibrando y verificando, ya que un período prolongado de uso, en las condiciones de trabajo en campo (altas temperaturas, humedad, insolación),

pueden conducir a una solución patrón en mal estado, que ha perdido parcialmente sus características de tampón, y que por tanto no es adecuada para el uso que se pretende. Es necesario controlar en las alícuotas llevadas a campo la fecha de apertura y la caducidad estimada del material, diferente a la caducidad emitida por el fabricante, válida para el bote sin abrir y en condiciones óptimas de almacenamiento.

5.7.3 Sonda de interfase.

Este equipo se emplea para la medida de la profundidad al nivel del agua y, si existe, el espesor aparente de fases libres no acuosas: fases líquidas menos densas que el agua (LNAPL) y fases líquidas más densas que el agua (DNAPL).

El equipo, en función de la naturaleza de la sustancia donde se introducen sus electrodos (agua o hidrocarburo), emite un pitido y una señal luminosa diferenciada (intermitente o continua). Este tipo de medidas está sujeto en ocasiones a fallos en la emisión de la señal acústica o luminosa, normalmente por una deficiente limpieza de sus electrodos. Es conveniente por tanto que al menos en cada campaña (con cada uso) se verifique el correcto funcionamiento de las alarmas del equipo, mediante la inmersión de la sonda en una fase líquida (agua) y una fase libre sobrenadante simulada (por ejemplo, aceite), y se proceda a la limpieza de los electrodos cada vez que se sumerja el equipo para tomar lecturas.

Las medidas en campo con este equipo, que dependen en gran parte de la agudeza visual del ojo humano sobre una escala milimétrica, deben ser confirmadas mediante la repetición de las lecturas al menos en un par de ocasiones consecutivas. Para determinar el espesor aparente de una fase

menos densa que el agua, las medidas de la interfase aceite-agua deben realizarse siempre en sentido ascendente de la sonda para evitar el efecto del arrastre de aceite en los sensores.

Se debe registrar la cota que se toma como referencia para las lecturas de la cinta métrica (normalmente borde superior de la tubería del pozo de monitoreo o borde del brocal del pozo), que debe ser el mismo que el empleado en la georeferenciación de los puntos de muestreo, de manera que, restando la profundidad leída a la altitud determinada topográficamente, pueda conocerse la cota absoluta (elevación) del nivel del agua en ese punto.

5.7.4 Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X.

Este equipo se emplea para la medida semicuantitativa de metales y elementos traza inorgánicos in situ. La exactitud de las medidas difiere dependiendo de los elementos en cuestión y del grado de concentración considerado, que normalmente es elevada para As, Pb, Cu y Zn, que pueden ser empleados como elementos indicadores.

Estos equipos de medida vienen con una calibración configurada de fábrica y aplican determinados algoritmos no bien conocidos para la reducción o eliminación de interferencias, por lo que no es habitual realizar calibraciones internas periódicas. Sí es posible normalmente llevar a cabo verificaciones de la exactitud del equipo a partir de la medida de materiales de referencia, así como de la reproducibilidad de las medidas mediante la repetición de medidas sobre las mismas muestras y el control de blancos, con la utilización de criterios de aceptación razonables.

Igualmente es fundamental llevar un control periódico de la concordancia de los valores obtenidos con el medidor (metales totales) y los valores aportados por los laboratorios (metales pseudototales). Estas muestras de confirmación deben mostrar una correlación mínima para que los resultados XRF para un metal determinado permitan su utilización como método de *screening* adecuado ($\rho > 0,7$ según EPA 6200).

En estudios de sitios que involucren un importante número de pares de muestras XRF-laboratorio con los mismos efectos de matriz, es posible realizar una calibración específica del instrumento para dicho emplazamiento. Para obtener una buena concordancia de los resultados in situ con las medidas realizadas por los laboratorios, es fundamental realizar una homogenización suficiente de las muestras y la retirada de las gravas más gruesas antes de proceder a la medida. Las muestras son introducidas normalmente en bolsas de polietileno formando una pastilla de un determinado grosor, sobre la que se apoya la ventana de medida del equipo.

5.8 Métodos de perforación.

Para el muestreo en los estudios de caracterización se emplearán métodos de perforación y extracción que alteren en la menor medida posible las muestras a tomar. Los métodos empleados habitualmente son los sondeos manuales, los sondeos semimecánicos o ligeros, calicatas y sondeos mecánicos.

Los métodos de perforación serán seleccionados en cada sitio según sus características litológicas, hidrogeológicas y de distribución de la contaminación. Sin embargo, hay una serie de criterios generales que a continuación se describen:

Todos los puntos de muestreo se perforarán hasta un nivel de profundidad suficientemente inferior al de los posibles focos de contaminación presentes, y en terreno natural en el que dejen de existir evidencias analíticas, visuales u organolépticas de posible contaminación.

A menos que esté descartada la presencia de agua subterránea mediante estudios previos similares llevados a cabo en el sitio, o que la profundidad de estas sea suficientemente significativa para descartar técnicamente su posible contaminación, en la etapa de caracterización se realizarán un mínimo de sondeos distribuidos por las diferentes zonas del predio, con objeto de determinar la presencia o ausencia de esta agua.

De confirmarse la presencia de agua subterránea, y la posible afección de estas por la presencia de contaminantes en los suelos, se llevará a cabo mediante sondeo mecánico, la red de puntos de muestreo. Estos sondeos profundizarán hasta que las columnas no presenten evidencias visuales u organolépticas de contaminación, y al menos, hasta un par de metros por debajo del nivel freático, para ser posteriormente acondicionados como pozos de monitoreo (UNE-EN ISO 15175:2011).

El resto de puntos de muestreo contemplados en el plan en los que no se vaya a realizar un control de la calidad del agua subterránea, deberá no obstante, perforarse hasta encontrar el nivel del agua, si por la naturaleza de los contaminantes presentes (por ejemplo, hidrocarburos) es factible que el suelo de la zona no saturada haya sido afectado en el nivel de oscilación de dicho nivel freático, a partir de contaminación que haya sido posiblemente transportada por el agua subterránea desde fuentes de contaminación ubicados en otros lugares de la instalación.

El método de perforación elegido en tales casos deberá permitir obtener muestras de suelo de ese nivel de profundidad con la precisión suficiente, y sin riesgo de mezcla con niveles superiores, necesitándose normalmente en estos casos el sondeo mecánico, por ejemplo, hollow stem auger (barreno de vástago hueco).

Si en el predio hubiera presencia significativa de contaminantes más densos que el agua (por ejemplo compuestos organoclorados), y la base impermeable del acuífero se encontrara a una profundidad no excesiva, se continuará la perforación hasta dicha base o se dispondrá otra perforación paralela que llegue hasta esa profundidad, disponiendo un pozo de

monitoreo adecuado para el control de la calidad del agua a ese nivel y la detección de una posible fase libre en la base del acuífero (fases líquidas más densas que el agua -DNAPL-).

Los sondeos manuales y semimecánicos o ligeros se restringirán a la caracterización de afecciones muy superficiales de la calidad del suelo, con ausencia de agua subterránea o elevada profundidad de ésta. También se podrán emplear en el muestreo para verificar valores de fondo en huecos de excavación (zanjas), donde las muestras a tomar son superficiales.

Las zanjas podrán emplearse en contaminaciones superficiales del suelo y también en otros casos en combinación con sondeos mecánicos realizados en la misma área, cuando se haya descartado la presencia de contaminación a profundidades mayores a las de la base de las zanjas. No se excavarán zanjas en terrenos con presencia de arenas, o a profundidades (por cercanía al nivel freático) que impliquen caídas significativas de materiales de las paredes hacia el fondo de la zanja.

Los sondeos mecánicos se realizarán siempre que sea posible por rotación con corona y extracción de la muestra de suelo mediante golpeo de la guía de perforación. La perforación se realizará en seco, sin emplear fluidos de perforación, en todo caso agua de calidad potable en las cantidades mínimas necesarias y cuando ello sea absolutamente imprescindible para el avance de la perforación.

En ciertos casos el empleo de agua se puede justificar para extraer muestras muy cohesivas (por ejemplo, arcillas compactas), siempre que ello no sea posible mediante golpeo.

Las perforaciones tendrán normalmente como único objetivo el muestreo ambiental. La posible compatibilización de la perforación realizada con otros objetivos, por ejemplo, un estudio geotécnico, no comprometerá, en ningún caso, la idoneidad de la perforación realizada ni las muestras tomadas para el análisis químico tanto de suelos como de agua subterránea. De esta manera, no será posible realizar ensayos de permeabilidad “in situ” o ensayos geotécnicos “in situ”, que impliquen una compresión del terreno o cualquier otra alteración mecánica o química en el intervalo de profundidad en el que sea procedente el muestreo ambiental.

Se deberá cuidar la limpieza en general con la que se realizan las diferentes operaciones. Cualquier pieza de perforación que tenga contacto con el suelo (cuchara, barrenas, etc.), serán lavadas externa e internamente con agua a presión entre punto y punto de muestreo, y entre diferentes maniobras de un mismo sondeo cuando se atravesen tramos contaminados que pudieran introducir contaminación por arrastre en las profundidades inferiores (por ejemplo, presencia de hidrocarburos, lodos contaminados de naturaleza cohesiva, etc.).

Todas las herramientas empleadas para la obtención de la muestra, serán lavadas con agua a presión entre maniobra y maniobra, y serán manipuladas usando guantes desechables de látex, nitrilo o similar, no con los guantes de protección mecánica empleados en el manejo del sondeo. Se evitará en la medida de lo posible el empleo de grasas lubricantes de roscas y similares, limitándose a las cantidades imprescindibles y limpiando cualquier exceso con papel absorbente. Se emplearán, en todo caso, grasas biodegradables, grasa de silicona o polvo de grafito, que no introduzcan los

contaminantes, metálicos u orgánicos, que se pretendan caracterizar en cada caso.

Las herramientas de perforación no deben presentar restos de óxidos o corrosiones, ni estar recubiertas durante su utilización por grasas, pintura, etc., que puedan desgastarse o desprenderse durante la perforación, contaminando la muestra (por ejemplo, en coronas de perforación nuevas). Se evitará el llenado del depósito de combustible de la máquina de sondeos, con el riesgo de derrame que ello conlleva, durante la realización de una perforación. Se emplearán para ello los desplazamientos entre punto y punto de toma de muestra. También, se cuidará que la máquina no sufra fugas de aceite hidráulico por alguno de sus circuitos, que pudieran alcanzar el suelo y producir contaminación cruzada en los suelos y/o al agua subterránea a muestrear.

Durante la realización del sondeo, mecánico o manual, se cuidará que no existan desprendimientos de las paredes de la parte ya perforada hacia el fondo de este, que pudieran desvirtuar las muestras tomadas por el tubo partido, exceptuando aquellos que inevitablemente se producen en pequeñas magnitudes y que son evitados desechando el tramo final de testigo extraído en cada maniobra. En sondeos manuales y semimecánicos este hecho es frecuente, por lo que se aconseja llevar un control de la profundidad del fondo de la perforación, pues suelen rellenarse parcialmente de materiales caídos entre sucesivas maniobras, y realizar en su caso maniobras intermedias de limpieza.

En el caso de los sondeos mecánicos, estos desprendimientos pueden evitarse mediante la entubación del sondeo a medida que éste se realiza. El revestimiento puede ser igualmente necesario cuando se atraviesen niveles

contaminados que puedan introducir contaminación hacia el interior del sondeo (por ejemplo, saturación en hidrocarburos). Durante el muestreo de suelos con posible presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV's), se cuidará de evitar el calentamiento y la aireación de las muestras. Las muestras con compuestos orgánicos volátiles, se tomarán en sus recipientes y se refrigerarán justo después de que la muestra sea depositada en la caja/hielera de las muestras, con independencia de que el llenado del frasco, etiquetado, llenado de la cadena de custodia, preservación y envío a laboratorio lo debe realizar un signatario de muestreo acreditado por una entidad de acreditación y aprobado por la autoridad que le corresponda (suelo, PROFEPA; agua, CONAGUA).

Se deberán registrar los detalles de la perforación realizada (fechas de realización, corona, diámetro, profundidad de las diferentes maniobras, uso de revestimiento, uso de agua, etc.), la litología perforada y los resultados de las medidas “in situ” realizadas a las diferentes profundidades. En el informe se reflejará esta información mediante los correspondientes partes de sondeo, de zanja o similares.

5.9 Instalación y acondicionamiento de pozos de monitoreo.

El diseño y la instalación de puntos de control de agua subterránea es imprescindible para asegurar unas medidas representativas de la calidad de las mismas.

Los pozos de monitoreo que sea necesario habilitar se instalarán y acondicionarán siguiendo preferentemente métodos normalizados como ISO 5667-22:2010 (Water quality. Sampling. Part 22: Guidance on the

design and installation of groundwater monitoring points), ASTM D5092-04, ASTM D5521M-13 y EPA-ERT SOP 2048.

5.9.1 Criterios de diseño del pozo de monitoreo.

En líneas generales, se tendrán en cuenta al menos las siguientes características constructivas (UNE-EN ISO 15175:2011):

Los materiales de la tubería del pozo de monitoreo deberán ser los más resistentes químicamente, en función de las características del agua subterránea del sitio y los contaminantes presentes en ellas, empleándose normalmente tubería de PVC. Si se conoce o se prevé la existencia de fase libre se recomiendan no obstante materiales como HDPE y PTFE/FEP.

Las conexiones entre segmentos de la tubería no deberán realizarse de forma que se puedan introducir agentes químicos que contaminen las muestras tales como adhesivos, sino que serán roscadas, y sin salientes tanto interior como exteriormente.

La tubería irá equipada con tapón de fondo (generalmente “punta de lápiz”) que evite la entrada de finos por el extremo inferior y facilite el flujo horizontal.

Las tuberías se dispondrán con un ranurado de fábrica de un ancho inferior al tipo de gravilla a emplear en el filtro anular, en el tramo de profundidad esperado para la oscilación del nivel del agua o el intervalo de profundidad en la zona saturada que se desee muestrear. Por ejemplo, el ranurado debería extenderse al menos un metro por encima del nivel del agua (con objeto de abarcar su posible variación de nivel) y entre dos y tres metros

por debajo de él como máximo (con objeto de evitar dilución de la posible pluma contaminante con agua profunda no afectada).

Cuando la posible fuente de la contaminación se ubique en la zona saturada, el intervalo ranurado se extenderá o se desplazará si es necesario en profundidad para abarcar el intervalo de la zona afectada.

Cuando sea de interés conocer la calidad del agua subterránea a un nivel de profundidad determinado del acuífero, el intervalo ranurado se dispondrá específicamente en el nivel de profundidad de interés.

Si se persigue caracterizar la contaminación a un nivel acuífero inferior, normalmente separado del superficial por algún material impermeable confinante, el intervalo ranurado se dispondrá específicamente en los primeros metros de dicho nivel.

Cuando el ranurado de la tubería del pozo de monitoreo persiga la detección de una posible fase libre densa (DNAPL) acumulada en la base del acuífero o en algún nivel impermeable intermedio, el tapón de fondo y la parte ciega del último tramo de tubería ranurada debería quedar dentro del nivel impermeable inferior, restando esta longitud en las medidas aparentes del espesor de la fase libre.

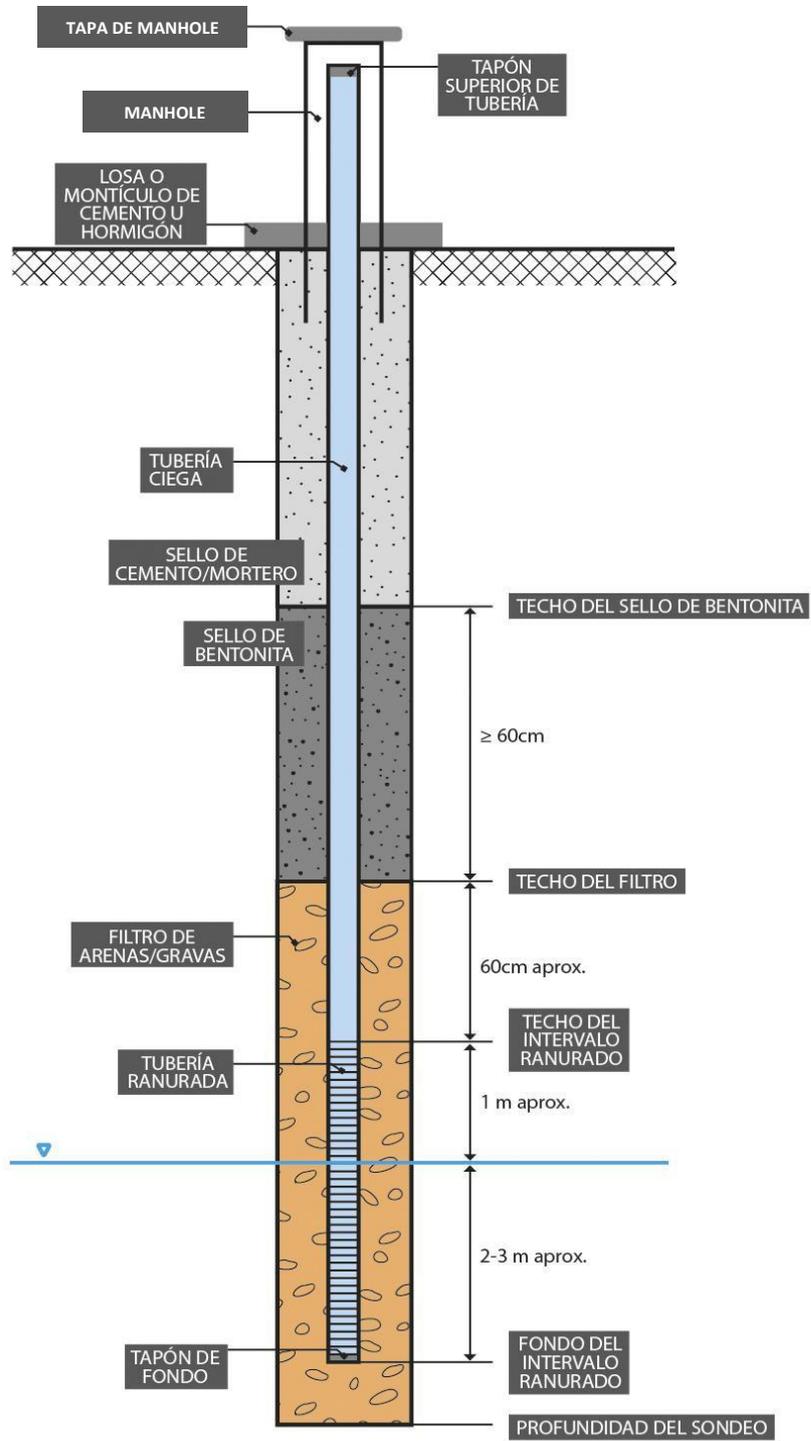
En torno a la tubería, en el espacio anular con la pared de la perforación, se instalará filtro de gravilla sílica calibrada de diámetro de partícula (2-4 mm generalmente) y de espesor adecuado, para evitar la entrada de finos en torno al tramo ranurado de tubería. Cuando la litología predominante sean limos y arcillas, se recomiendan filtros de arena con diámetros inferiores. Este filtro de grava/arena debe sobrepasar el techo del ranurado y solaparse

con el primer tramo ciego de tubería en aproximadamente 60-90 cm, para evitar interferencias por la bentonita y el cemento empleados.

Sobre el filtro de grava y en torno al tramo superior ciego del tubo, se instalará sello de bentonita y en los últimos centímetros tapón de cemento, que evite la percolación hacia el anular interior de aguas superficial de escorrentía y asegure el cierre del pozo de monitoreo.

El acabado final (tapón expandible para el tubo y Manhole), con lo que se debe garantizar su aislamiento y una capacidad de carga suficiente para garantizar su integridad. En la **Figura 6**, se muestra el diseño de un pozo de monitoreo tipo.

Figura 6. Diseño de un pozo de monitoreo tipo.



5.9.2 Instalación del pozo de monitoreo.

Las tuberías se introducirán en el pozo en adecuadas condiciones de conservación y limpieza, trasladándose al sitio en el interior de envoltura plástica o similar. Aun así, si fuera necesario, se procedería a su limpieza previa con agua a presión.

Para su manipulación e instalación se emplearán guantes desechables de látex, nitrilo, o similar, y no los guantes de protección mecánica empleados en el manejo del sondeo. En aquellos casos en que el sondeo sea realizado con barrenos de vástago hueco (hollow stem auger), se retira el barreno y la instalación del filtro de grava se llevarán a cabo de forma acompasada, por este orden y alternando la operación en pequeños tramos de longitud, de manera que el filtro de gravilla se instale antes de que puedan colapsar las paredes del sondeo contra la tubería, pero de forma que tampoco el filtro de grava se solape en exceso con el barreno hueco y pueda ser arrastrado posteriormente en el izado del mismo.

Se controlará periódicamente la profundidad del techo del filtro para controlar la operación y evitar este arrastre. En pozos de monitoreo profundos (mayores a 15 metros) se recomienda el empleo de centralizadores, y si la altura de la zona saturada es significativa, el vertido de los materiales del espacio anular (especialmente bentonita) mediante tubería “tremie” colocada a 1 m de altura sobre el fondo del anular y posteriormente izada conforme se vaya rellenando el mismo.

5.9.3 Desarrollo del pozo de monitoreo.

Una vez finalizado el pozo de monitoreo, se procederá a su desarrollo, entendido como el proceso de volver el estado del agua subterránea que circundan al pozo de monitoreo a las condiciones previas a la construcción de este. Se elegirán para ello aquellos métodos que menor dispersión y alteración de la contaminación puedan ocasionar; preferentemente el bombeo con bombas sumergibles de diferente capacidad y si la permeabilidad del medio no lo permite, con bailer.

Se emplearán en cada pozo de monitoreo equipos en adecuado estado de conservación y limpieza, que no aporten contaminantes ni provoquen contaminación cruzada entre pozo de monitoreo del mismo emplazamiento. De emplearse en el desarrollo bombas sumergibles, éstas serán de un caudal superior al que posteriormente se vaya a emplear en el purgado y en su caso la toma de muestras, y deberán ser lavadas previamente antes de su utilización en cada pozo de monitoreo mediante la circulación de solución con agentes de limpieza adecuados (detergentes, alcalinos, libre de fosfatos, etc.), seguida de ciclos de lavado con agua abundante.

De emplearse bailers, serán de un solo uso o sometidos a tratamiento de limpieza similar al de las bombas. Nunca se empleará la inyección de agua externa al pozo de monitoreo ni aire comprimido como técnica de desarrollo, ya que alterarían la hidrogeoquímica del agua del acuífero en el entorno del pozo de monitoreo, especialmente la inyección de aire en emplazamientos en los que se haya de controlar compuestos volátiles o semivolátiles. El bombeo sí podría ser apoyado con agitación mecánica (subida y bajada de un émbolo) aunque en su justa medida, ya que este

método puede alterar la disposición del filtro de grava, y en formaciones arcillosas que aporten muchos finos puede afectar a la superficie de la tubería. El desarrollo del pozo de monitoreo deberá realizarse una vez transcurrido un cierto período de estabilización de la cementación realizada, recomendándose 24 horas, o bien realizarse una vez instalado el filtro de grava y antes de proceder al sellado con bentonita y cemento.

Previamente al desarrollo, se habrá extraído del pozo de monitoreo cualquier volumen de agua que hubiera sido necesario introducir durante la realización de la perforación o la limpieza del pozo, y que pudiera solaparse con el agua evacuada durante el desarrollo, o bien se realizará el desarrollo una vez haya transcurrido el tiempo necesario para permitir el desplazamiento de esta agua fuera del radio de influencia del pozo. El desarrollo del pozo se dará por concluido cuando se consiga una ausencia de turbidez en el agua extraída (o al menos una reducción significativa de la misma) y la estabilización de las lecturas de parámetros físico-químicos medidos “in situ” de forma periódica o continua en el agua extraída, de manera que existan ciertas garantías de equilibrio entre el agua extraída y la del acuífero.

Entre los parámetros físico-químicos se contemplará al menos la medida del pH y la conductividad, considerándose estabilizadas cuando la variación en tres lecturas consecutivas, realizadas cada cierto volumen extraído (por ejemplo, 10 litros) o cada 3-5 minutos de bombeo, no exceda de $\pm 0,1$ Ud pH y del $\pm 3\%$ para conductividad (UNE-EN ISO 5667-3:2013).

En algunos casos la litología y/o la permeabilidad (por ejemplo, acuitardos con elevada presencia de arcillas) del terreno no permitan conseguir la ausencia de turbiedad y/o la estabilización físico-química. En estas situaciones es comprensible que el desarrollo no consiga alcanzar parte o todos los objetivos, esto deberá justificarse mediante las correspondientes medidas de recuperación del nivel del agua, y tratando al menos de evacuar la máxima cantidad de agua posible. El agua extraída durante el desarrollo o el purgado de los pozos puede requerir tratamiento que dependen de sus características, y nunca será vertida aguas arriba del pozo de monitoreo ni de otros pozos de control o puntos por muestrear.

Se registrarán todos los datos constructivos de los pozos de monitoreo instalados y del desarrollo realizado en los mismos (fechas de la instalación y el desarrollo, método de desarrollo, equipos empleados, volúmenes bombeados, evolución de las lecturas físico-químicas y espaciado –tiempo y volumen bombeado- entre las mismas, etc.). En el informe se adjuntarán los detalles constructivos de los pozos de monitoreo instalados y los datos fundamentales del desarrollo realizado y los criterios de finalización alcanzados.

6. HERRAMIENTAS PARA LA CARACTERIZACIÓN.

Una vez que se desarrolla el modelo conceptual del sitio (MCS), se identifican las brechas de datos y se completa la planeación de la recopilación de datos, con lo que se pueden seleccionar las herramientas y técnicas de investigación apropiadas. La selección de la herramienta óptima depende de varios factores para establecer la que es adecuada para la tarea, entre ellos:

- Disponibilidad y costo de la herramienta.
- Confiabilidad de la herramienta.
- Familiaridad con la herramienta.
- Experiencia requerida para usar la herramienta.
- Aceptabilidad de los datos para las partes interesadas.

La selección y el uso adecuado de cualquier herramienta de investigación son fundamentales para el éxito del proyecto y, en última instancia, es responsabilidad del equipo de trabajo que lleve a cabo el proyecto.

Se proporciona la liga de una útil guía interactiva del Consejo Interestatal de Tecnología y Regulación (ITRC, por sus siglas en inglés) que ofrece más de 100 herramientas de investigación que se pueden utilizar para recopilar los datos necesarios para satisfacer los objetivos de la caracterización. La hoja de trabajo de selección de herramientas ofrece un método rápido para identificar las herramientas y la información adecuadas para recopilar datos geológicos, hidrológicos y químicos.

Un objetivo de caracterización bien diseñado se puede traducir en una secuencia lógica de menús desplegables en la hoja de trabajo que reduce la lista de herramientas a aquellas que se pueden usar para recopilar los datos necesarios. Una vez que se ha identificado una lista mínima de herramientas, el equipo del proyecto puede incorporar las herramientas según corresponda en un plan de trabajo de investigación.

<https://fracturedrx-1.itrcweb.org/5-5-select-investigation-tools/>

También se incluye la liga para acceder a la herramienta de apoyo a la toma de decisiones de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (US-EPA), la que facilita el uso de datos, modelos y procesos de decisión estructurados en la toma de decisiones. Los consultores ambientales utilizan esta herramienta de diversas maneras para respaldar actividades como la evaluación y remediación del sitio, la gestión y visualización de datos y la optimización. La US-EPA desarrolló una matriz de información y está poniendo la matriz a disposición de los usuarios en función de las necesidades específicas del proyecto.

<https://frtr.gov/decisionsupport/DSTMatrix.cfm>

Finalmente, se proporcionan dos ligas más que son de utilidad para la elaboración del MCS y del estudio de caracterización.

<https://www.dep.pa.gov/Business/Land/LandRecycling/Standards-Guidance-Procedures/Guidance-Technical-Tools/Pages/Fate-and-Transport-Analysis-Tool.aspx>

<https://www.gsienv.com/product/serdp-estcp/>

Todas estas herramientas son muy útiles para sustentar y fortalecer el modelo conceptual del sitio (MCS) y, en consecuencia, el estudio de caracterización y la propuesta de remediación que se proponga, es importante destacar que todas estas herramientas necesitan para su uso y aplicación, el conocimiento geológico e hidrogeológico del sitio.

7. CONCLUSIONES.

Este documento brinda orientación sobre la información requerida para realizar estudios de caracterización, con un enfoque suficientemente genérico para permitir su aplicación a la contaminación inorgánica y orgánica. También ha sido elaborado para conocer y aplicar la legislación y normatividad de la República Mexicana, así como aspectos prácticos; por ejemplo, la elaboración del modelo conceptual del sitio (MCS) o la instalación y acondicionamiento de pozos de monitoreo.

Se ha determinado que el estudio de caracterización es el primer paso para llevar a cabo la gestión de un sitio contaminado, lo que incluye acciones para reducir o eliminar la exposición de los seres humanos y el medio a los contaminantes. Además de proporcionar la información necesaria para establecer reglas de ordenamiento territorial de acuerdo con el riesgo presente en el sitio.

También se destacó que la mayoría de las fallas en la remediación de sitios contaminados son causadas por una falta de comprensión detallada del sitio y a un MCS insuficientemente desarrollado, lo que conduce a un diseño e implementación deficiente de la remediación.

El éxito de la remediación de un sitio contaminado está directamente relacionado con una comprensión profunda del sitio y las condiciones del subsuelo.

Considerando lo anterior, se ha establecido que si bien, para realizar un estudio de caracterización es necesario un grupo interdisciplinario de profesionistas, es imprescindible que se incluyan profesionistas que hayan tenido una formación geológica e hidrogeológica; con la recomendación que sea un geólogo o hidrogeólogo el líder en este tipo de proyectos de caracterización, e incluso de remediación de sitios contaminados.

Finalmente, es importante mencionar que en comparación con la contaminación del aire y del agua superficial, la contaminación del suelo, subsuelo y agua subterránea es difícil de observar, por lo que se acumula con el tiempo y es más difícil su remediación. Consecuentemente, la prevención es imprescindible para la protección del suelo y subsuelo.

GLOSARIO

ANALITOS. Sustancia química presente en un material o sistema, que es objeto de detección, identificación y cuantificación en el análisis químico de una muestra.

BAILER. Instrumento portátil de muestreo que se utiliza típicamente para capturar muestras de agua subterránea en pozos de monitoreo.

CARÁCTER LIPOFÍLICO. Capacidad de disolver lípidos (grasas), ser disuelto en ellos o absorberlos.

DESALQUILACIÓN. Proceso químico que implica la eliminación o la ruptura de un grupo alquilo de una molécula orgánica. Un grupo alquilo es un grupo funcional que consiste en átomos de carbono e hidrógeno unidos covalentemente y que se deriva de los hidrocarburos.

EFFECTOS MUTÁGENICOS. Cambios en el ADN pueden dañar las células y provocar una enfermedad, como el cáncer.

EFFECTOS TERATOGENICOS. Efectos perjudiciales que ciertas sustancias, factores o condiciones pueden tener en el desarrollo embrionario o fetal, causando malformaciones congénitas o anomalías en un feto en desarrollo.

HIDRAGIRISMO. Intoxicación crónica originada por la absorción de mercurio.

INMISIÓN. Término que describe la acción de enviar, introducir o transmitir algo en un lugar o sistema específico.

METILACIÓN. Proceso químico y biológico en el cual un grupo metilo (CH₃) se agrega a una molécula.

NIVELES FOTOTÓXICOS. Niveles de exposición a la luz que pueden causar daño a los tejidos vivos, como la piel o los ojos, cuando se combinan con la exposición a ciertos compuestos químicos o sustancias fotosensibilizantes.

ORGANOLÉPTICOS. Propiedades sensoriales o perceptibles de un producto, sustancia o material, en particular a través de los sentidos.

PROPIEDADES GENOTÓXICAS. Capacidad de una sustancia, agente o factor para causar daño al material genético, como el ADN, en una célula.

QUELATOS. Compuestos químicos que se forman cuando un ion metálico se combina con una molécula o ion que actúa como un agente complejante o agente quelante.

SATURNISMO. Intoxicación causada por la exposición excesiva y prolongada al plomo, un metal pesado tóxico.

REFERENCIAS

1. AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. Departament de Medi Ambient i Habitatge. 2009. "Criteris d'aplicació dels valors genèrics per a la restauració d'aigües subterrànies en emplaçaments contaminants per fonts d'origen puntual".
2. API. 2001. "Risk-based methodologies for evaluating petroleum hydrocarbon impacts at oil and natural gas E&P sites". American Petroleum Institute (API) Publication n° 4709.
3. APARG, 1996. Air Pollution Abatement Review Group, 1996, The abatement of Toxic Organic Micropollutants from stationary sources 1995, NETCEN, AEA Technology, Oxon.
4. ASTM E1689 (2008). Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites.
5. ASTM. 2014. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites, 95(Reapproved 2008), 1–9. <https://doi.org/10.1520/E1689-95R08.2>
6. ASTM D5092-04 (2010). "Standard practice for design and installation of groundwater monitoring wells".
7. ASTM D5903-96 (2012). "Standard guide for planning and preparing for a groundwater sampling event".
8. ASTM D6452-99 (2012). "Standard guide for purging methods for wells used for ground-water quality investigations".
9. ASTM D4448-01 (2013). "Standard guide for sampling ground-water monitoring wells".
10. ASTM D5521M-13 (2013). "Standard practice for development of groundwater monitoring wells in granular aquifers".

- 11.ASTM D6311-98 (2014). “Standard guide for generation of environmental data related to waste management activities: selection and optimization of sampling design”.
- 12.ASTM D4547-15 (2015). “Standard guide for sampling waste and soils for volatile organic compounds”.
- 13.BART EKLUND. 1992. “Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates”. Journal of the air & waste management association 42:12, 1583-1591.
- 14.BLOOM N.S., Preus E., Katon J., Hiltner M. 2002. “Selective extractions to assess the biogeochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediments and soils”. Analytica Chimica Acta 479 (2003) 233–248.
- 15.CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. 2016. Guidance manual for environmental site characterization in support of environmental and human health risk assessment. Volume 1. Guidance Manual.
- 16.CEA-ENAC-01 Rev. 16. 2016. “Criterios para la utilización de la marca ENAC o referencia a la condición de acreditado”.
- 17.CIRCULAR SOBRE REMEDIACIÓN DEL SUELO. 2013. Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda. (Government Gazette, no. 16675, de 27 de junio de 2013).
- 18.CITYCHLOR. 2013. “Soil-gas monitoring: soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques”.
- 19.CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO. (COMUNIDAD DE MADRID). 2017. “Guía de investigación de la calidad del suelo”.
- 20.IHOBE. Dpto. de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. 2015. “Guía de excavaciones selectivas en el ámbito de los suelos contaminados”. INERIS-

- BARGE. 2010. "UBM procedure for the measurement of inorganic contaminant bioaccessibility from solid matrices".
- 21.NORMA MEXICANA NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
- 22.NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
- 23.NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- 24.REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de noviembre de 2006. Texto Vigente: Última reforma publicada DOF 31-10-2014.
- 25.SCIENTIFIC, ENGINEERING, RESPONSE AND ANALYTICAL SERVICES (SERAS), 2002. Manual wáter level measurements. Standard Operating Procedures 2043.
- 26.SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. 2010. Guía técnica para orientar en la elaboración de estudios de caracterización de sitios contaminados.
- 27.SECRETARIAT OF THE MINAMATA CONVENTION ON MERCURY. 2019. United Nations Environment Programme, Guidance on the management of contaminated sites.

28. UNE-ISO 14507:2004. “Calidad del suelo. Pretratamiento de muestras para la determinación de contaminantes orgánicos”.
29. UNE-ISO 10381-1:2007. “Calidad del suelo. Muestreo. Parte 1: Directrices para el diseño de los programas de muestreo”.
30. UNE-ISO 10381-2:2007. “Calidad del suelo. Muestreo. Parte 2: Directrices sobre técnicas de muestreo.”
31. UNE-EN ISO/IEC 17025:2005. “Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”.
32. UNE-CEN/TR 15310-2 IN:2008. “Caracterización de residuos. Muestreo de residuos. Parte 2: Orientación en técnicas de muestreo”.
33. UNE-ISO 10381-5:2010. “Calidad del suelo. Muestreo. Parte 5: Líneas directrices para el estudio de suelos contaminados en emplazamientos industriales y urbanos”.
34. UNE-ISO 10381-7:2010. “Calidad del suelo. Muestreo. Parte 7: Líneas directrices para el muestreo del gas del suelo”.
35. UNE-EN ISO 15175:2011. “Calidad del suelo. Caracterización de suelos en relación con la protección de las aguas subterráneas”.
36. ISO 18512:2007 “Calidad del suelo: orientación sobre el almacenamiento a largo y corto plazo de muestras de suelo”.
37. UNE-EN ISO/IEC 17020:2012. “Evaluación de la conformidad. Requisitos para el funcionamiento de diferentes tipos de organismos que realizan la inspección”.
38. UNE-EN ISO 5667-3:2013. “Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua”.
39. WILSON J.T., WEAVER J.W., WHITE H. 2012. EPA Groundwater issue: “An approach for developing site-specific lateral and vertical inclusion zones within which structures should be evaluated for

petroleum vapor intrusion due to releases of motor fuel from underground storage tanks”.

ANEXO 1

LISTA DE VERIFICACIÓN PARA DESARROLLAR EL MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO	
Nombre del Sitio:	
Dirección:	
Ciudad, Estado:	Proyecto No:
Criterio de Evaluación	Comentarios/Discusión
Fuente de contaminación (tipo y ubicación).	
Contaminante (incluir la ficha técnica, en caso de existir).	
Volumen estimado del contaminante derramado, infiltrado, descargado o vertido.	
Fecha cuando ocurrió o se identificó el derrame, infiltración, descarga o vertido.	
Descripción de fuentes, vías y receptores.	
Medidas de urgente aplicación.	
Características y condiciones antropogénicas (actuales e históricas) del sitio.	
Resumen de los medios afectados.	Suelo: Agua Subterránea: Agua Superficial: Sedimento: Aire:
Acciones correctivas que se tomaron.	Suelo: Agua Subterránea: Agua Superficial: Sedimento: Aire:

Contaminantes de preocupación:
En el suelo (fase sólida).
En el agua subterránea (fase disuelta).
En fase vapor.
Líquido en fase no acuosa (fase libre).
Metas reglamentarias de limpieza en:
Suelo.
Agua subterránea.
Agua superficial.
Vapor (gas en el suelo / aire interior).
Vía aérea.
Otros.
Receptores sensibles.
Uso de agua subterránea local.
Pozos residenciales (distancia/dirección desde el sitio).
Pozos municipales (distancia/dirección desde el sitio).
Cuerpos de agua superficial (distancia/dirección desde el sitio).
Abastecimiento de agua público comunitario: tomas de agua.
Edificios residenciales.
Áreas con actividades agropecuarias.
Identificar todas las áreas de uso público dentro de un radio de 500 metros.
Resumen de la información disponible.
Uso/estado histórico y actual del sitio.
Propiedades adyacentes: uso de suelo/actividad.
Colindancia Norte.
Colindancia Este.
Colindancia Sur.
Colindancia Oeste.

Suelo.
Estratigrafía.
Profundidad al agua subterránea.
Zona de variación de niveles.
Profundidad al basamento rocoso.
Heterogeneidades.
Cubierta de suelo.
Proximidad a construcciones.
Presencia de contaminación de fondo.
Agua Subterránea.
Dirección del flujo del agua subterránea.
Profundidad al agua subterránea.
Gradiente hidráulico.
Porosidad/Permeabilidad.
Conductividad hidráulica.
Radio de influencia hidráulica.
Ubicación de las zonas de recarga y descarga.
Ubicación de cualquier influencia de bombeo aledaño al área evaluada.
Agua Superficial.
Tipos de cuerpos de agua superficial.
Vegetación afectada.
Suelo/sedimento afectado.
Dirección de corrientes superficiales.
Relación agua subterránea-agua superficial.
Condiciones climáticas.
Tipo de clima.
Datos de precipitación.
Dirección del viento.

Aire (gas del suelo/aire interior).

Fase libre presente a menos de 30 metros de un edificio.

Presencia de sótanos.

Condición del piso/paredes o losa del sótano.

Presencia de agua subterránea o producto libre en sótanos.

Impacto del gas del suelo o del aire interior por encima de los niveles de detección aplicables.

Otros riesgos identificados (ejemplo: olor).

Identificación de Receptores.

Especies expuestas actuales y futuras.

Áreas ambientalmente sensibles.

Vías de exposición a la población humana.

Población humana actualmente o potencialmente expuesta.

Medidas de remediación.

Área(s) remediada(s).

Efectividad de la remediación.

Resultado de la acción de remediación.

Plan de Monitoreo después de las acciones de remediación.

Desviaciones o ajustes a las medidas de remediación.

Archivos adjuntos:

Mapa de ubicación del sitio.

Mapa de infraestructura local.

Mapa topográfico.

Mapa edafológico.

Mapa geológico.

Mapas de elevación del nivel estático.

Mapas de datos químicos del agua subterránea.

Registros de perforación.

Esquemas de construcción de pozos (abastecimiento, monitoreo, etc.).

Secciones geológicas.

Mapa de radio de pozo de aprovechamiento.

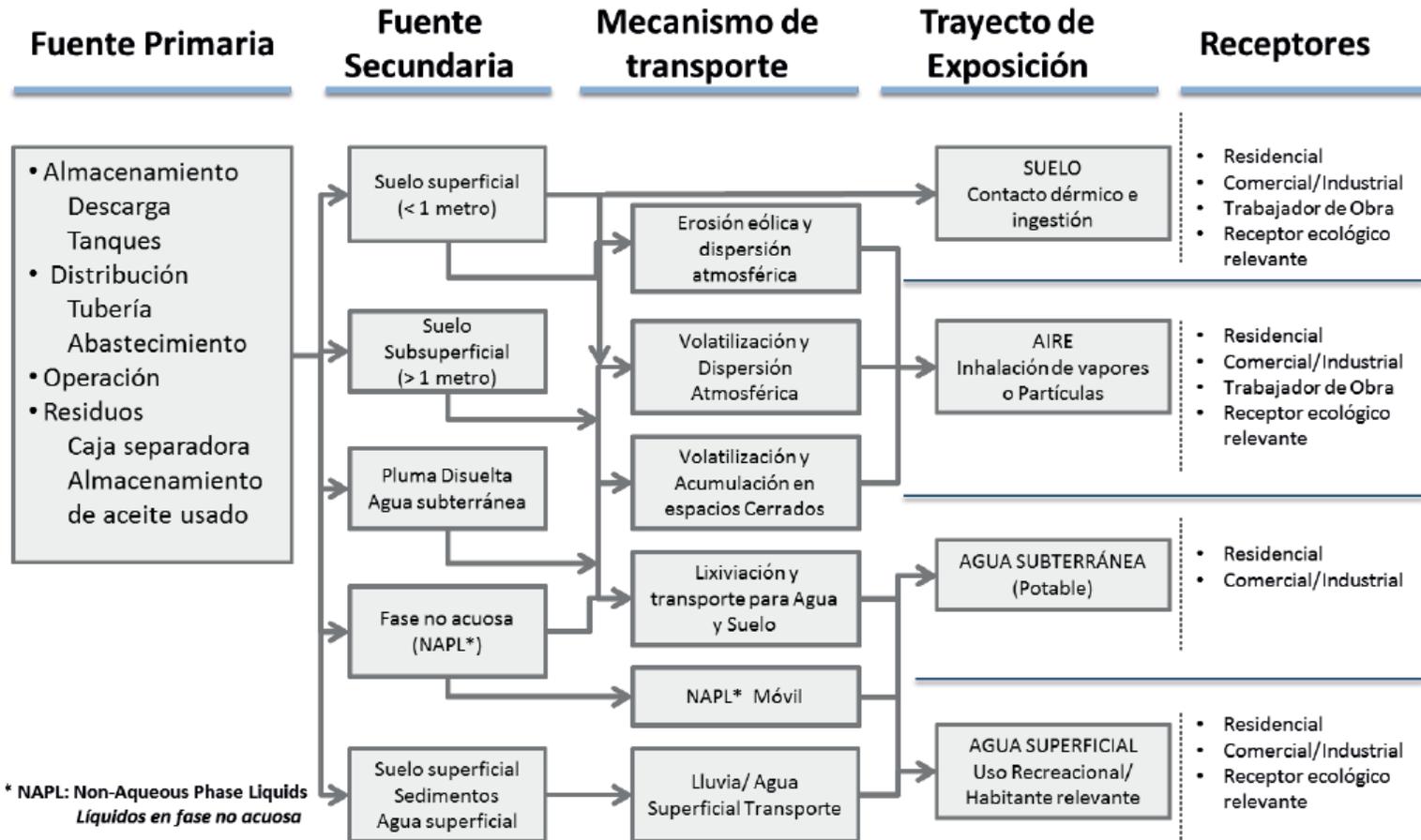
Modelo de pluma de contaminación en suelo.

Modelo de pluma de contaminación en agua subterránea.

Diseño del sistema de remediación.

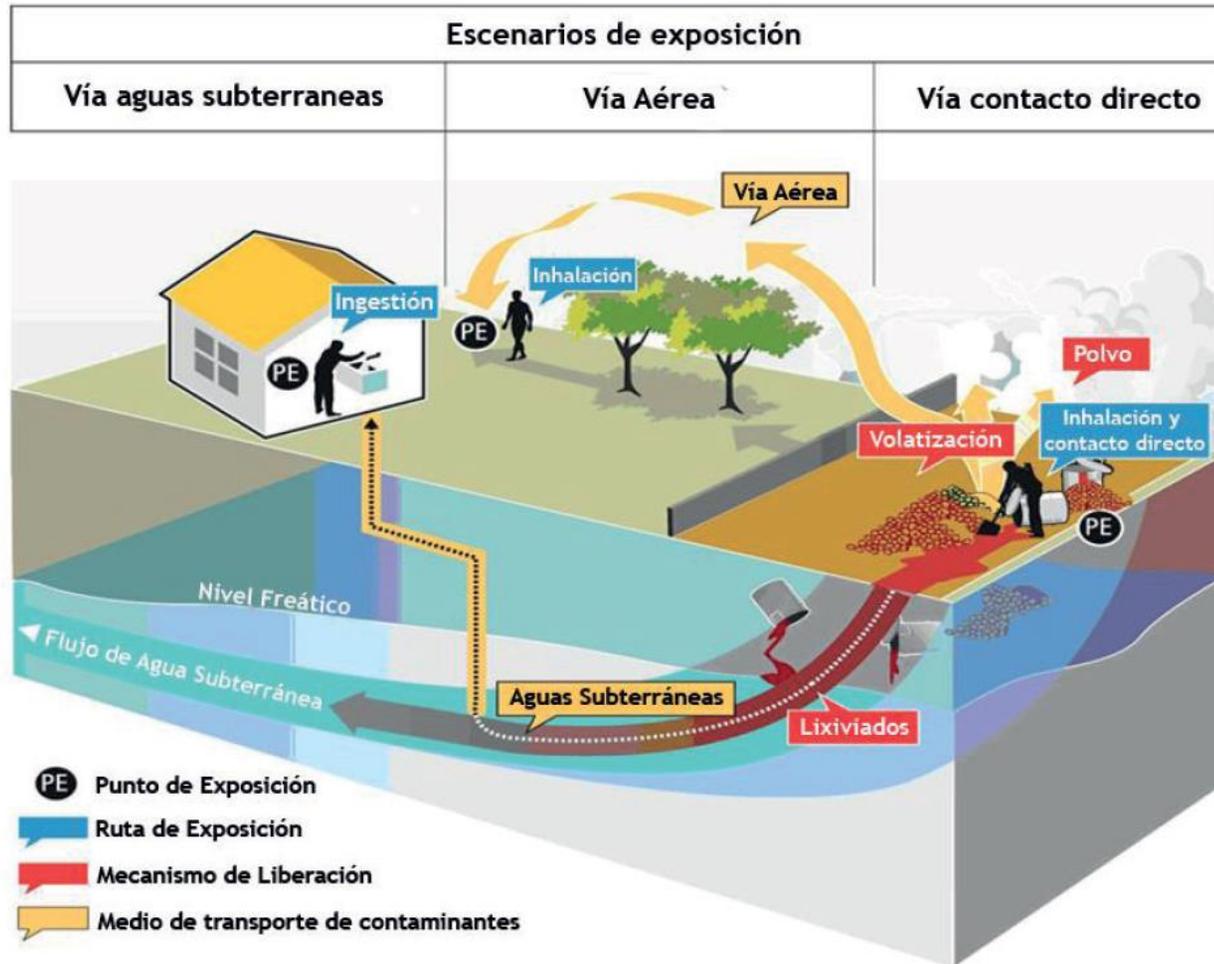
Diagrama de proceso e instrumentación de la remediación.

ANEXO 2



* NAPL: Non-Aqueous Phase Liquids
Líquidos en fase no acuosa

Fuente: CETESB. 2011



Fuente: Andreas Marker. 2012