



Anexo 3. Guía Metodológica para Análisis Detallado – Por riesgo Químico

**Informe de avance y desarrollo
ORDEN 3, numeral 3, referente a Pasivos Ambientales**

**Sentencia 25000234100020130245901
Ventanilla minera.**

NOVIEMBRE 2024

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	3
1. ANTECEDENTES	4
1.1 Pasivos Ambientales en Colombia	4
2. OBJETIVO DE LA GUÍA.....	5
3. ALCANCE DE LA GUÍA	5
4. SOBRE LA GESTIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES EN COLOMBIA ..	6
5. SOBRE LA GESTIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS EN COLOMBIA..	8
6. ANÁLISIS DETALLADO O EVALUACIÓN DE RIESGO.....	8
6.1 Revisión de la información	8
6.2 Identificación del tipo de riesgo.....	10
6.3 Evaluación de riesgo	10
6.4 Evaluación de Riesgo Químico.....	11
6.4.1 Planeación de la investigación detallada.....	11
6.4.1.1 Identificación de peligros	12
6.4.1.2 Identificación de rutas de exposición relevantes.....	13
6.4.1.3 Identificación preliminar de los contaminantes de interés (CDI)	17
6.4.1.4 Identificación y caracterización de potenciales receptores	19
6.4.1.5 Identificación de las áreas de interés en el sitio	20
6.4.1.6 Muestreo	20
6.4.1.7 Medición y análisis	27
6.4.1.8 Identificación y gestión de la incertidumbre de la información	28
6.4.2 Caracterización por matriz o medio	28
6.4.2.1 Investigación hidrogeológica	28
6.4.2.2 Caracterización del suelo	30
6.4.2.3 Caracterización de agua subterránea.....	41
Características de la fuente en la zona no saturada.....	52
Características de la pluma de afectación en el agua subterránea.....	52
Procedimientos para la Caracterización de la Zona No Saturada.....	53
Procedimientos para la Delimitación de Plumas Contaminantes en Aguas Subterráneas.....	54
6.4.3 Modelo conceptual para evaluación de riesgo	56
6.4.3.1 Modelo conceptual de aguas subterráneas	57
6.4.4 Evaluación de riesgo químico.....	58
6.4.4.1 Identificación del peligro y evaluación de toxicidad.....	58
6.4.4.2 Evaluación de la exposición	61
6.4.4.3 Caracterización del riesgo para humanos	68
6.4.4.4 Caracterización del riesgo no carcinogénico.....	70
6.4.4.5 Caracterización del riesgo carcinogénico	71
6.4.4.6 Caracterización del riesgo ambiental	73
Análisis de la exposición.....	73



Ambiente

Caracterización de los efectos ambientales.	73
Caracterización de los riesgos ambientales.	74
6.4.4.7 Evaluación del riesgo por niveles	74
NIVEL 1: LÍMITES GENÉRICOS BASADOS EN RIESGO (LGBR)	75
NIVEL 2: CONCENTRACIONES CALCULADAS ESPECÍFICAS PARA EL SITIO (CCES NIVEL 2)	76
NIVEL 3: CONCENTRACIONES CALCULADAS ESPECÍFICAS PARA EL SITIO (CCES NIVEL 3)	77
SIGLAS	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

INTRODUCCIÓN

Esta guía se formula dando alcance a los lineamientos establecidos en el Artículo 8 de la Ley 2327 de 2023, y en el cual se enuncia:

ARTÍCULO 8. Identificación y comprobación de pasivos ambientales. *En los casos en los que las autoridades ambientales identifiquen la existencia de un área en sospecha de tener pasivos ambientales, tendrán que adelantar los estudios preliminares de riesgos que sean necesarios para determinar la configuración del pasivo ambiental, teniendo en cuenta una metodología técnica de referencia y criterios establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.*

De configurarse el pasivo ambiental, la autoridad ambiental competente deberá proceder a identificar, con las metodologías establecidas para tal fin al presunto generador del mismo e iniciar las acciones necesarias para su intervención, sin perjuicio de la adopción de las medidas preventivas y sancionatorias a las que haya lugar...”

El contenido de este documento se centra en el desarrollo técnico detallado de las etapas de análisis preliminar y análisis detallado o evaluación de riesgo, de las cuales se hace referencia en la Estrategia para la Gestión de Pasivos Ambientales.



1. ANTECEDENTES

1.1 Pasivos Ambientales en Colombia

En el artículo 2 de la Ley 2327 de 2023 se da la definición de pasivo ambiental *"Entiéndase por Pasivo Ambiental las afectaciones ambientales originadas por actividades antrópicas directa o indirectamente por la mano del hombre, autorizadas o no, acumulativas o no, susceptibles de ser medibles, ubicables y delimitables geográficamente, que generan un nivel de riesgo no aceptable a la vida, la salud humana o el ambiente, de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Salud, y para cuyo control no hay un instrumento ambiental o sectorial"*.

Desde el año 2010, a través de los objetivos de los Gobiernos propuestos por los planes nacionales de desarrollo (PND) se han incluido consideraciones relacionadas con la gestión de pasivos ambientales. Recientemente, el PND 2022-2026 Colombia potencia mundial de la vida, en su meta 4 Transformación productiva, internacionalización y acción climática; catalizador A. Naturaleza viva: revitalización con inclusión social se incluye la implementación de modelos de gestión integral para la prevención, atención recuperación y revitalización de pasivos ambientales; y en el catalizador C. Transición energética justa, segura, confiable y eficiente se menciona adelantar la reforma normativa minera que permita la creación de instrumentos para la gestión del cierre minero y restauración de los pasivos ambientales que se derivan de estas actividades.

2. OBJETIVO DE LA GUÍA

Esta guía establece los lineamientos técnicos para la comprobación de sitios contaminados y los pasivos ambientales en Colombia, a partir de la evaluación de riesgo a la salud humana y al ambiente que las dinámicas de los sitios en sospecha pueden generar. En este sentido, se tienen como propósitos:

- Establecer los criterios técnicos, generales y específicos, para realizar la evaluación de riesgo químico a nivel detallado, mediante una metodología robusta que permita obtener resultados fundamentados en datos analíticos y evidencia objetiva.
- Presentar los lineamientos básicos para la generación de los informes técnicos con los que se consolida la información y análisis de riesgo químico.
- Orientar la investigación hacia la obtención de resultados que respalden la toma de decisiones fundamentadas, con el propósito de apoyar la gestión del riesgo o intervención de pasivos ambientales.

3. ALCANCE DE LA GUÍA

Esta guía se construye como una herramienta para las autoridades ambientales competentes, de carácter local o regional que son responsables de realizar la gestión para la comprobación de sitios contaminados o de pasivos ambientales en Colombia.

Así mismo, este documento podrá ser usado por consultores o empresas consultoras independientes que son asignados como responsables del desarrollo de la evaluación de riesgo para la comprobación de la existencia de pasivos ambientales.

4. SOBRE LA GESTIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES EN COLOMBIA

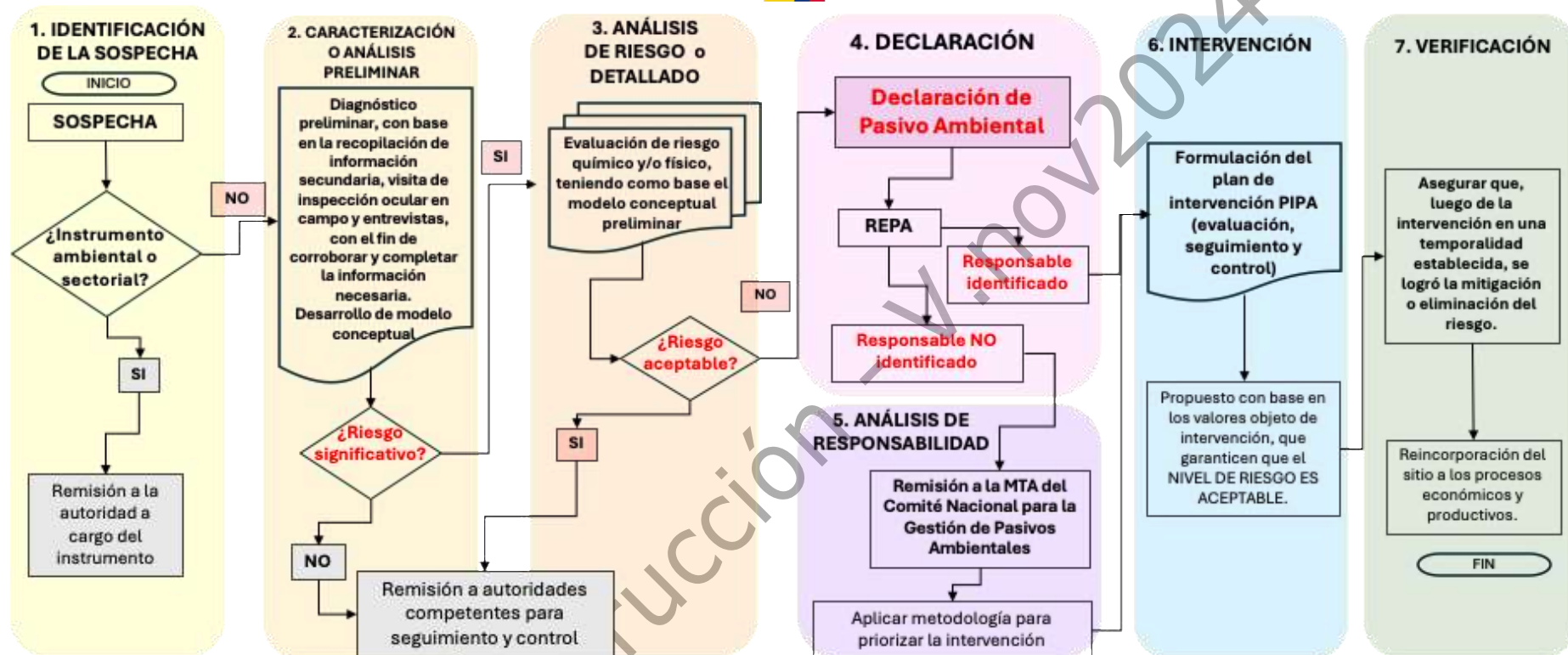
La gestión de un sitio en sospecha de ser un pasivo ambiental se detalla en la Estrategia para la Gestión de Pasivos Ambientales en Colombia. De manera general, esta gestión se realiza a través de la ejecución de 7 etapas las cuales cobijan desde la identificación de un sitio en sospecha, hasta la verificación de la mitigación o eliminación del riesgo asociado a través de la eficacia de la intervención del pasivo ambiental. La consecución de la aplicación eficaz de estas etapas, sustentadas en el desarrollo sistemático de las actividades y en la generación de evidencia sólida a nivel técnico, permitirá (i) alcanzar de manera efectiva la reincorporación de las zonas declaradas como pasivos ambientales a los procesos productivos para los cuales se realizó la intervención; o, (ii) en aquellos casos donde la intervención está orientada al aislamiento, se logrará mantener zonas controladas que no representan un riesgo para la vida, la salud humana o el ambiente.

Dentro de esta gestión, la identificación y comprobación de los pasivos ambientales de los que trata el artículo 8 de la Ley 2327 de 2023, hace referencia a la caracterización o análisis preliminar como etapa de la identificación, y el análisis detallado o evaluación de riesgo como la comprobación del pasivo ambiental.

Con el fin de señalar de manera precisa las etapas desarrolladas en esta guía se presenta la figura XXX, en la cual se describe el flujograma de actividades enmarcadas en la gestión de pasivos ambientales.



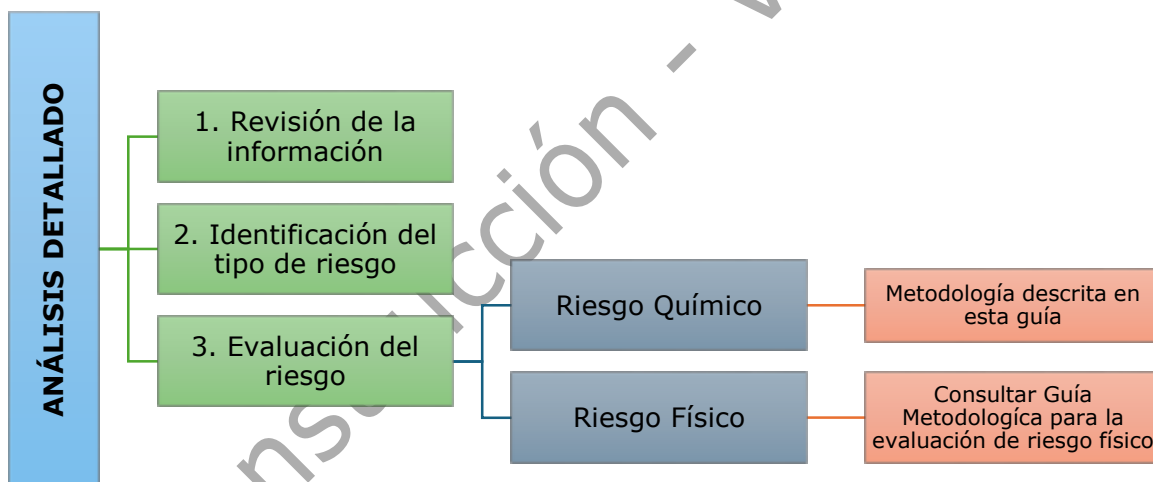
Ambiente



5. SOBRE LA GESTIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS EN COLOMBIA

6. ANÁLISIS DETALLADO O EVALUACIÓN DE RIESGO

Esta etapa se realiza cuando se ha identificado riesgo significativo en la etapa preliminar, acorde con el flujograma presentado en la figura XXX. El objetivo de la etapa de análisis detallado o evaluación de riesgo es evaluar, con base en la información recopilada en el análisis preliminar y de información primaria obtenida en esta etapa, la posibilidad de que la dinámica del sitio bajo sospecha pueda generar efectos adversos a la salud humana y/o al ambiente, como consecuencia de un peligro y una exposición. Para realizar la evaluación de riesgo y alcanzar el objetivo formulado en esta etapa se deben desarrollar las actividades presentadas en la Figura xxxx y las cuales son descritas en detalle a continuación.



6.1 Revisión de la información

En esta fase se requiere revisar la información recabada en la etapa de análisis preliminar, teniendo claro las deficiencias de información que fueron identificadas en la construcción del modelo conceptual preliminar, dado que para el desarrollo de la evaluación de riesgo resulta como elemento esencial disponer de un modelo conceptual completo.



Ambiente

Para la revisión de información se propone analizar si el informe del análisis preliminar incluye los siguientes aspectos relevantes para el desarrollo de la etapa de análisis detallado:

- ✓ Información acerca del uso del suelo y de sus alrededores.
- ✓ Información relacionada con las dimensiones del sitio en sospecha.
- ✓ Información del área ambiental potencialmente afectada.
- ✓ Información relacionada con la topografía del sitio.
- ✓ Tipo de cobertura de la superficie.
- ✓ Descripción en porcentaje de zonas ocupadas, zonas verdes, bosques, parques, pavimento, entre otros.
- ✓ Identificación de cuerpos de agua superficial, tanto en el sitio en sospecha como en áreas circundantes. Esta información debe incluir la distancia desde el sitio hasta los cuerpos identificados.
- ✓ Información relacionada con probabilidad de inundación del sitio acorde con las características del mismo.
- ✓ Identificación de ecosistemas potencialmente sensibles.
- ✓ Información geográfica de los puntos de mediciones en campo (si aplica).
- ✓ Características climáticas de la zona.
- ✓ Características de los ecosistemas del sitio y zonas circundantes.
- ✓ Identificación de zonas construidas como tanques de almacenamiento subterráneo, corredores de servicios públicos, zanjias, vertederos, entre otros.
- ✓ Identificación de la presencia de residuos, escombros, almacenamiento de productos químicos, o cualquier fuente potencial de contaminación.
- ✓ Descripción de signos visibles de contaminación en la superficie del suelo o del agua.
- ✓ Registro fotográfico nítido del sitio en sospecha y áreas adyacentes.
- ✓ Identificación de actividades económicas desarrolladas en el sitio.
- ✓ Identificación de materiales, materias primas, productos químicos, entre otros, empleados en el desarrollo de la actividad económica.
- ✓ Información relacionada con el manejo de residuos.
- ✓ Mapa(s) de la zona, incluido el sitio en sospecha.
- ✓ Identificación de la posible contaminación relacionada con las actividades económicas desarrolladas en el sitio, con su respectiva descripción cronológica.
- ✓ Información relacionada con acciones previas que se hayan tomado para mitigar o reducir las posibles afectaciones ambientales.
- ✓ Identificación de los posibles contaminantes que generan la afectación.



Ambiente

- ✓ Información cuantitativa de los posibles contaminantes en las matrices afectadas.
- ✓ Modelo conceptual preliminar en el que se identifique claramente fuentes, receptores, mecanismos de exposición, rutas de exposición.
- ✓ Medios o matrices afectadas (agua superficial, agua subterránea, suelo, aire).

La información faltante deberá ser recopilada en el desarrollo de esta etapa, ajustándose al progreso de las actividades que conforman la ejecución del análisis detallado.

6.2 Identificación del tipo de riesgo

En este punto, a partir de la identificación de los escenarios de riesgo realizada en la etapa de análisis preliminar, se debe tener claridad acerca del tipo de riesgo que genera la afectación del sitio en sospecha, considerando si el riesgo es generado por contaminación química (riesgo químico), procesos físicos (riesgo físico) o una combinación de estos dos fenómenos.

Identificar el tipo de riesgo asociado permitirá aplicar de manera precisa la evaluación de riesgo con la cual se definirá si el sitio en sospecha será o no declarado un pasivo ambiental.

6.3 Evaluación de riesgo

La evaluación de riesgo es una herramienta útil que soporta la toma de decisiones con base en la mejor información científica disponible y no en percepciones o juicios de valor. La información que proporciona la evaluación de un riesgo apoya las decisiones de control ambiental, intervención, jerarquización de la importancia ambiental de las medidas, así como estimar cuantitativamente los daños a la salud humana o a los ecosistemas derivados de una exposición.

La evaluación de riesgos hace una estimación cuantitativa de un riesgo, permitiendo dar respuesta a preguntas como:

- ✓ ¿Existe un riesgo por exposición a este peligro?
- ✓ ¿Qué se sabe de este riesgo?
- ✓ ¿Quién puede verse más afectado por este riesgo?
- ✓ ¿Cuáles son las fuentes y los riesgos?
- ✓ ¿Qué vías de exposición deben ser investigadas?
- ✓ ¿Qué decisiones se necesitan tomar y cuándo?



Ambiente

Los riesgos pueden ser ambientales o a la salud, por lo que al desarrollar la evaluación se debe plantear que aspecto está afectado, de acuerdo a las condiciones encontradas y evaluadas en el sitio en sospecha.

El análisis de riesgos de un sitio en sospecha de configurarse pasivo ambiental deberá incluir no sólo la situación actual del mismo sino también cualquier situación futura previsible que pueda diferir sensiblemente de la actual, ya sea por la evolución de la distribución y tipología de los contaminantes y cambios en las condiciones de exposición de algunos receptores potenciales como consecuencia de cambios en los usos del suelo o de otros recursos relevantes. En este sentido, en los numerales que preceden se presenta la metodología para la evaluación de riesgo químico y físico.

6.4 Evaluación de Riesgo Químico

La evaluación de riesgo químico se refiere al análisis del riesgo que la presencia de compuestos químicos, derivados de actividades antrópicas, puede generar sobre la salud o el ambiente en diversos escenarios. Este proceso no solo permite identificar dichos riesgos, sino que también respalda la toma de decisiones dentro del marco de la gestión del riesgo. Además, facilita la optimización de costos, la selección de alternativas adecuadas para la intervención, la planificación estratégica y la implementación de medidas preventivas pertinentes, asegurando así el cumplimiento de los objetivos establecidos para las acciones de remediación.

Para asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados para el desarrollo de la evaluación de riesgo, se recomienda considerar las actividades descritas a continuación.

6.4.1 Planeación de la investigación detallada

Realizar una planeación del desarrollo de esta etapa, teniendo en cuenta la información faltante, permitirá plantear las estrategias más apropiadas que permitan garantizar el cumplimiento de los objetivos trazados. Planear el desarrollo de las actividades permitirá: (i) formular los mecanismos para capturar información de gran relevancia en esta investigación, (ii) realizar un análisis profundo y preciso de la situación en estudio dado que se tiene claro las necesidades y uso de los datos a recopilar, (iii) optimizar costos, y (iv) asegurar la realización de un trabajo efectivo.



Ambiente

Como parte de la planeación de la investigación para evaluación de riesgo químico deberá considerar:

- ✓ Identificación de peligros
- ✓ Identificación de rutas de exposición relevantes
- ✓ Identificación de los contaminantes de interés
- ✓ Identificación y caracterización de potenciales receptores
- ✓ Identificación de los puntos de interés en el sitio
- ✓ Muestreo
- ✓ Medición y análisis
- ✓ Identificación y gestión de la incertidumbre de la información

En cada uno de estos ítems es necesario evaluar la profundidad de la información y, de acuerdo con los requerimientos establecidos, ampliarla o profundizar en ella, considerando su relevancia, dado que sustenta la evaluación de riesgos y, a su vez, la posible declaratoria o desistimiento como pasivo ambiental.

6.4.1.1 Identificación de peligros

La magnitud del riesgo y de las posibles consecuencias a la salud o al ambiente está asociada al peligro, extensión y duración de la exposición. En este sentido resulta de gran importancia conocer las propiedades químicas y físicas de los contaminantes ya que este conocimiento permitirá dilucidar cómo éstos pueden pasar de un medio a otro hasta llegar al punto en el cual pueden entrar en contacto con los receptores y, a su vez, si pueden o no ser absorbido por una u otra vía.

A medida que se cuente con una mayor comprensión de la dinámica del sitio en sospecha se podrá realizar una identificación más adecuada de los peligros presentes; por lo que la identificación de peligros puede considerarse una actividad dinámica a lo largo del desarrollo de las etapas para identificar y confirmación de un pasivo ambiental. Para lograr la identificación precisa de los peligros en el escenario de evaluación es necesario contar con información relacionada con:

- (i) Propiedades Físicas y Químicas de los contaminantes y su comportamiento en los medios o matrices ambientales ya que estos pueden presentar transformaciones influenciadas por las condiciones del medio tales como temperatura, humedad, energía UV, entre otros. Estos cambios pueden ser degradación, generación



Ambiente

de metabolitos o compuestos secundarios que pueden ser más o menos tóxicos y que pueden tener diferente movilidad en el medio y a su vez variar las vías de exposición.

- (ii) Datos toxicológicos y epidemiológicos de efectos a la salud con relación a las sustancias específicas. En este sentido, y con miras a obtener información que aporte a la evaluación de riesgo, se hace necesario contar con información relacionada con los efectos cancerígenos y no cancerígenos que puedan presentar tanto los contaminantes como los compuestos secundarios que pueden encontrarse en el sitio en sospecha.

En la tabla siguiente se presentan algunas bases de datos disponibles para consulta relacionada con propiedades físicas, propiedades químicas y datos toxicológicos de diversas sustancias.

AGENCIA	INFORMACIÓN
ATSDR Agency for Toxic Substances and Disease Registry	https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_toxfaqs_index.html ATSDR cuenta con hojas informativas (ToxFAQs™) que contienen resúmenes acerca de sustancias peligrosas, sus efectos sobre la salud, e información relacionada con la exposición a estas sustancias.
EPA	https://www.epa.gov/iris A través del Integrated Risk Information System, EPA brinda información de toxicidad de sustancias químicas que puedan estar en el ambiente y que pueden afectar la salud humana.
EU Pesticides database	https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en La EU presenta en esta base de datos información toxicológica de plaguicidas (sustancias activas, sustancias básicas, protectores y sinergistas) aprobadas o no para su uso por la Unión Europea.
PubChem	https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ Es una colección de información química, asociada a NIH (National Library of Medicine), en la cual se puede consultar información relacionada con propiedades físicas, propiedades químicas, actividad biológica, seguridad y toxicidad de sustancias químicas.

6.4.1.2 Identificación de rutas de exposición relevantes

La identificación de las rutas de exposición es de gran importancia en el modelo conceptual, e implica conocer claramente los elementos que están involucrados en el proceso de movilización de contaminantes con su respectiva interrelación y evidenciar si existe la probabilidad de que los contaminantes contenidos en una fuente puedan entrar en contacto con los receptores. Este análisis debe realizarse considerando posibles exposiciones pasadas ya que la ruta de exposición puede cambiar con el tiempo.



Ambiente

Junto con la ruta de exposición, es fundamental identificar si en el receptor puede presentarse una exposición agregada (exposición a un agente químico por múltiples rutas) o una exposición acumulada (exposición simultánea o consecutiva a diferentes sustancias químicas que ejercen su efecto a través de mecanismos comunes), e incluirlo en la descripción del modelo conceptual.

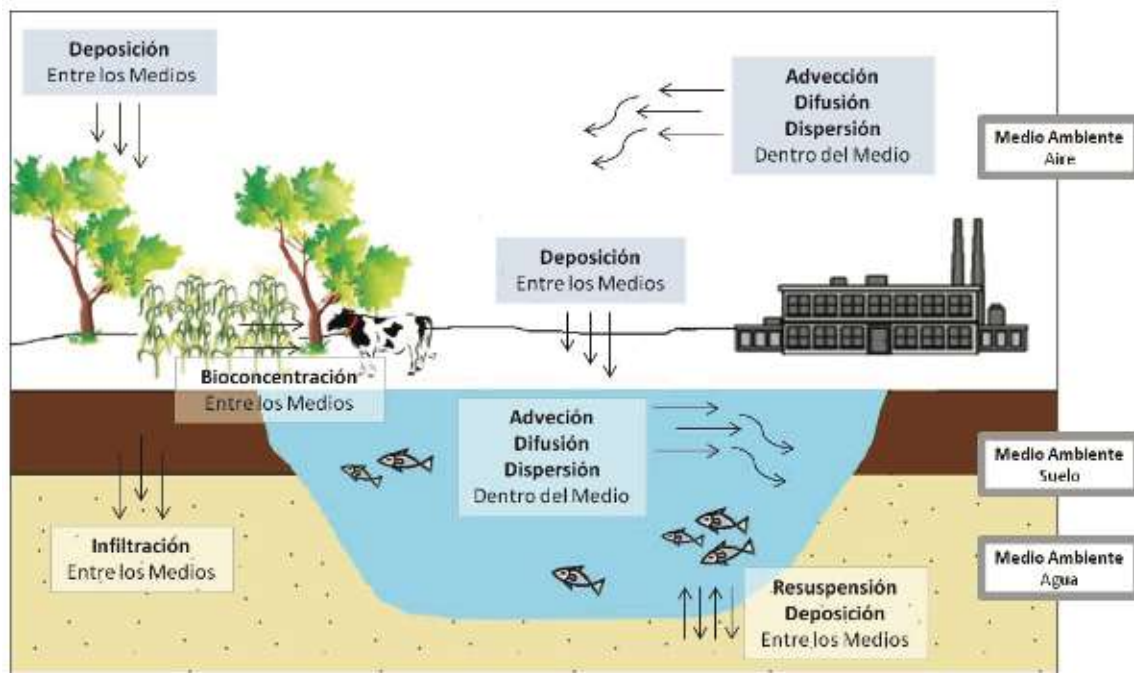
Los elementos a tener en cuenta en la identificación de rutas de exposición son:

- (i) Fuente de exposición: corresponde al punto de emisión u origen de la contaminación al ambiente. Resulta importante establecer si la fuente es activa o no e identificar el(los) tipo(s) de contaminantes y su procedencia. Algunos ejemplos de fuentes son: tanques de almacenamiento, vertederos, zonas de almacenamiento de residuos, entre otros.

Dentro de los parámetros de la fuente que se deben conocer se encuentran: la geometría, condiciones físicas y químicas, velocidad de emisión, fuerza de emisión y geografía.

- (ii) Medios afectados: hace relación a los medios que pueden recibir directa o indirectamente el contaminante proveniente de la fuente y a través de los cuáles se realiza el transporte del contaminante. Estos medios son: aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo, subsuelo, biota, aire, sedimentos.
- (iii) Mecanismo de transporte: hace referencia a los procesos por medio de los cuales se realiza el transporte del contaminante, su transferencia o transformación entre los diferentes medios. En la figura XXX se presenta una diagrama con los mecanismos de transporte de contaminantes en el ambiente.

Figura: (tomada de La evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica).



Para esta identificación se debe considerar:

- ✓ Los posibles procesos de transporte que pueden llevar los contaminantes lejos de su fuente.
- ✓ Factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la persistencia o movimiento del contaminante dentro y a través de los medios.
- ✓ Condiciones ambientales específicas del sitio en sospecha que determinan el mecanismo de transporte y la transformación que pueden tener los contaminantes. En la figura XXX se presentan las diferentes reacciones o fenómenos que pueden presentar los contaminantes en el ambiente.

Para caracterizar el transporte de los contaminantes en los diferentes medios se recomienda tener disponible la siguiente información:

MEDIO	INFORMACIÓN SEGÚN EL MEDIO
Agua subterránea	Hidrogeología Geoquímica Pluviometría y tasa de infiltración Fuentes de recarga, descarga, corrientes de descarga y filtraciones



Ambiente

MEDIO	INFORMACIÓN SEGÚN EL MEDIO
	Dirección del flujo de las aguas subterráneas, profundidad y espesor de los acuíferos Gradiente hidráulico Espesor saturado del acuífero Conductividad hidráulica Localización Usos dados al agua subterránea
Agua superficial / sedimentos	Propiedades químicas (dureza, pH, salinidad, temperatura, conductividad, sólidos suspendidos totales) Afluentes y arroyos Punto y áreas de descarga de fuentes no puntuales Localización del sistema de drenaje de aguas pluviales Velocidad de flujo, área y profundidad Usos dados al agua superficial Tipo de suelos y sedimentos Distribución por tamaño de partícula Contenido orgánico de los sedimentos Zonas inundables Condiciones de oxígeno
Suelo	Propiedades físicas y químicas del suelo (tamaño de partícula, tipo de suelo, contenido de materia orgánica, permeabilidad, pH, etc.) Topografía y tipo de cubierta vegetal, si la hay Precipitación Usos del suelo
Aire	Topografía Dirección predominante del viento y velocidad Precipitaciones y temperatura promedio Condiciones de contaminación atmosférica existentes
Alimentos	Especies de plantas y animales consumidos en la zona Tipo de suelo Patrones de migración de la fauna Hábitos alimenticios de la fauna de la zona
Biota	Peso seco, porciones comestibles, porcentaje de humedad, contenido de lípidos, etapa del ciclo de vida

(iv) Puntos de exposición: corresponde a los lugares en los cuales los receptores pueden entrar en contacto con el contaminante que se encuentra en un medio.

(v) Vías de exposición: corresponde a las vías a través de las cuales los contaminantes pueden entrar en contacto con el receptor e ingresar al sistema provocando un efecto adverso. Estas pueden ser inhalación (partículas en suspensión, gases, vapores), ingestión (aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo y alimentos) y, contacto dérmico.

En la tabla siguiente se presentan las vías de exposición en correlación con los medios.

MEDIO	VÍA DE EXPOSICIÓN POSIBLE
Agua	Ingestión directa Contacto y reacción dérmica / contacto y reacción ocular Inhalación secundaria derivados de actividades domésticas
Suelo	Ingestión directa (niños de pocos meses a 5 años) -fenómeno pica- Contacto y reacción dérmica / contacto y reacción ocular Inhalación de compuestos químicos volátiles presentes en el suelo Inhalación de partículas de polvo que pueden tener adherido contaminantes
Aire	Inhalación Contacto y reacción dérmica / contacto y reacción ocular
Biota / cadena alimenticia	Ingestión directa de alimentos vegetales o de origen animal provenientes de la zona afectada Contacto dérmico con plantas, animales o productos contaminados

6.4.1.3 Identificación preliminar de los contaminantes de interés (CDI)

En este contexto, los contaminantes de interés hacen referencia a las sustancias químicas que pueden estar generando afectaciones a la salud humana y/o al ambiente y que están presentes en un sitio en sospecha de configurarse pasivo ambiental. El modelo conceptual inicial se convierte en el punto de partida para definir los contaminantes de interés (CDI) a tener en cuenta durante el desarrollo del análisis detallado, resaltando que, aún con esta información puede existir incertidumbre en la identificación exacta de los contaminantes por falta de información.

En general, la definición de los contaminantes de interés se realiza a partir de la información obtenida a partir de la medición de los contaminantes; por lo tanto, en la planeación de la investigación es importante considerar si, a partir de la recopilación de información del análisis preliminar se soporta la identificación de estos contaminantes o si, por el contrario, es necesario incluir todos los posibles contaminantes en la caracterización del sitio en sospecha para que posteriormente se realice la definición de los CDI.

En la selección de los contaminantes de interés se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- (i) Concentración del (los) contaminante(s) en el medio afectado: se debe contar con la información cuantitativa que permita establecer cuantitativamente la presencia de un contaminante en un medio;



Ambiente

asimismo, estos datos deben asociarse y analizarse en cada ruta de exposición definida en el modelo conceptual.

- (ii) Límites genéricos basados en riesgo (LGBR), niveles máximos de contaminantes (NMC) o valores de referencia: como elemento de entrada en la definición de los CDI se debe tener disponible los LGBR o los NMC para poder comparar esta información y determinar si la concentración de un contaminante supera o no los límites establecidos bajo los cuales se puede generar una afectación a la salud humana o al ambiente. Cuando no se cuenta con la información de LGBR o NMC, se puede incluir valores de referencia internacionales para lo cual se debe justificar tanto su uso como la selección de la información.
- (iii) Niveles de concentración basales o de fondo: esta información permitirá asociar la presencia de contaminantes a actividades antropogénicas desarrolladas en el sitio en sospecha.
- (iv) Información toxicológica de los contaminantes: este es un factor de influencia en la definición de los CDI, ya que resulta de gran importancia analizar información como la persistencia de los contaminantes en los medios de interés (biomagnificación, bioacumulación, movilidad) y la toxicidad de los compuestos (efectos agudos, subagudos, crónicos, carcinógenos, mutagénicos, neurotóxicos, alterados endocrino).

En la siguiente figura se presenta el proceso a seguir en la selección de los CDI.

No.	ACCIÓN	DECISIÓN
1.	Comparar las concentraciones máximas de los contaminantes con los niveles de concentración basales o de fondo.	No considerar los contaminantes que tengan concentraciones iguales o inferiores a los niveles de fondo. Si se superan los niveles de fondo, el contaminante debe continuar en la aplicación de la acción No. 2
2.	Comparar las concentraciones máximas de los contaminantes con los LGBR o NMC o valores de referencia	Se consideran CDI aquellos contaminantes que superen los LGBR o los NMC. Si los contaminantes no superan los límites establecidos, se debe continuar en la aplicación de la acción No. 3 Si no existen LGBR o NMC establecidos para ese contaminante, este será considerado CDI.



Ambiente

No.	ACCIÓN	DECISIÓN
3.	Revisión de información toxicológica	Se consideran CDI cuando: El contaminante tengo importancia considerable acorde con la toxicidad, movilidad, persistencia, bioacumulación, carcinogenicidad, mutagenicidad y alteradores endocrinos. El contaminante es de gran importancia en las rutas de exposición definidas. Los factores de equivalencia tóxica son significativos (TEF). El factor de bioacumulación (FBA) es ≥ 1000

6.4.1.4 Identificación y caracterización de potenciales receptores

Otro de los elementos fundamentales de la evaluación de riesgos para la salud es la identificación de los potenciales receptores (individuos, comunidades, poblaciones, ecosistemas) y los efectos adversos o impactos que se pueden presentar en estos; por lo que para cada ruta de exposición es necesario identificar los receptores posiblemente expuestos. La información de caracterización de receptores humanos, correspondiente a la descripción de las características de la población, edades, condiciones de susceptibilidad (factores intrínsecos que pueden incrementar el riesgo, edades extremas, enfermedades preexistentes) y vulnerabilidad (mayor riesgo derivado de condiciones ambientales – pobreza, desnutrición, condiciones sanitarias inadecuadas), estilos de vida, características de comportamiento, condiciones de salud, uso del suelo, etc., ha sido identificada de manera general a partir de la elaboración del modelo conceptual para la evaluación preliminar, sin embargo, para la evaluación detallada puede ser necesario profundizar en la información de la población en estudio, ya que diferentes factores (edad, género, embarazo), pueden influenciar la absorción, distribución y metabolismo de los contaminantes químicos. De acuerdo al contaminante en estudio y a las vías de exposición, la evaluación de riesgo se realiza para todos los receptores o solo para los que se han identificado como críticos, considerando la clasificación de la población, entre población residencial, población usuaria de la zona, trabajadores, población en tránsito, población de “alto riesgo” (presentan mayor vulnerabilidad o sensibilidad a ciertos contaminantes y pueden ser niños, mujeres embarazadas, enfermos y tercera edad), y población de susceptibilidad particular por razones de raza, etnia u otros factores sociodemográficos.

Con respecto a los receptores ambientales, se requiere identificar cuales se consideran de especial importancia, de acuerdo a su abundancia, diversidad, tasa de renovación, potencial de exposición (metabolismo, hábitos alimenticios,



Ambiente

localización), vulnerabilidad (altamente susceptibles a contaminantes) y su importancia económica y social. Debido a la amplia diversidad de especies que pueden estar presentes, pueden identificarse los diferentes hábitats afectados (terrestres o acuáticos) y en ellos seleccionar los receptores representativos.

6.4.1.5 Identificación de las áreas de interés en el sitio

Para focalizar las estrategias de trabajo en campo, el sitio en sospecha puede ser subdividido en áreas de interés identificadas geográficamente. Estas áreas específicas que son de interés y en el cual va a hacerse el análisis deben ser definidas claramente con el fin de identificar los receptores humanos y ambientales sobre los que se van a llevar a cabo la caracterización y la evaluación de riesgos. Estas áreas pueden definirse con base en la identificación y localización de áreas con afectaciones, y basados en liberaciones específicas, medio de transporte del contaminante y vías de exposición. Así mismo, la delimitación es importante para llevar a cabo el proceso de muestreo.

6.4.1.6 Muestreo

Previamente a la realización del muestreo, es necesario asegurar que se tendrá acceso al sitio en sospecha, ya que si no se cuenta con este permiso por parte del propietario o responsable del predio se deberá iniciar las acciones legales para obtener el ingreso a la zona.

Una vez se cuenta con el permiso para acceder, y con el objetivo de asegurar la caracterización cuantitativa de los compuestos de interés en el sitio en sospecha y que los resultados analíticos obtenidos a partir de las muestras sean válidos, se realizará la planificación del muestreo dando cumplimiento a los lineamientos de la norma ISO/IEC 17025.

Considerando la relevancia que tiene el muestreo dentro de la validez de los resultados de medición, la caracterización del sitio en sospecha, la evaluación de riesgo y la toma de decisiones; se recomienda que la planificación incluya como mínimo los elementos presentados en la figura siguiente.



Con relación al tamaño de la muestra y los puntos de muestreo, estos deben ser definidos con base en criterios objetivos, para lo cual se deben tener en cuenta las siguientes aspectos generales:

- ✓ Áreas de interés que serán muestreadas: para obtener una caracterización más precisa del sitio, este puede ser subdividido en áreas de interés en las cuales se requerirá una mayor toma de muestras.
- ✓ Métodos estadísticos para selección de los puntos de muestreo y tratamiento de los datos.
- ✓ Capacidad y precisión de los métodos estadísticos para la evaluación de riesgo: con el objetivo de obtener un nivel de certidumbre aceptable, el tamaño de la muestra dependerá de la variabilidad en las concentraciones que se tengan de los contaminantes en el sitio; en este sentido se debe prever esta situación, dado que un bajo número de muestras con estas características de variabilidad derivará en una mayor incertidumbre en las concentraciones medias del sitio, dificultad para definir una distribución estadística de los datos y límites superiores de confianza más altos que la media. Con el fin de controlar esta situación, es importante identificar múltiples áreas de interés cada una con su propio conjunto de muestras y aplicar sobre los resultados estadística descriptiva para reducir la variabilidad total.
- ✓ Los análisis a los que se someterán las muestras y las metodologías analíticas, lo cual permitirá definir la cantidad de muestra, métodos de conservación, equipos específicos para el muestreo.



Ambiente

- ✓ Disponibilidad y competencia del personal, ya que los responsables del muestreo deben estar capacitados y contar con experiencia en la toma de muestras y manipulación de los equipos empleados en el muestreo.
- ✓ Otras consideraciones: dentro de la planificación del muestreo es necesario evaluar otros factores como logística, equipos de muestreo, costos del muestreo, consideraciones del laboratorio para la medición, entre otros.

✓

Una vez se evalúen estos factores, se procederá a seleccionar los puntos de muestreo y el tipo de muestra, para lo cual se presentan las siguientes consideraciones para cada uno de estos aspectos.

- (i) Selección de los puntos de muestreo: esta selección deberá realizarse bajo criterio estadístico, de tal manera que se asegure de manera confiable, que los puntos que serán muestreados serán representativos del sitio en sospecha para la respectiva evaluación de riesgo y toma de decisiones.

Los puntos de muestreo pueden seleccionarse a través de la aplicación de muestreo aleatorio simple, muestreo sistemático, muestreo intencional o la combinación de estas técnicas de muestreo. En la tabla siguiente se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de estas técnicas.

TÉCNICAS DE MUESTREO	TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Muestreo deliberado	No probabilístico	Puede emplearse en la caracterización de un sitio (análisis preliminar) o en la evaluación de contaminación que resulte obvia visualmente.	No se recomienda su uso para obtener información asociada a la evaluación de riesgos. Puede haber sobreestimación o subestimación en la caracterización del sitio. Conlleva un sesgo asociado que puede resultar significativo
Muestreo aleatorio simple	Probabilístico	Genera imparcialidad en los puntos de muestreo. Debe existir independencia entre los puntos. Se pueden estimar concentraciones	

TÉCNICAS DE MUESTREO	TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
		promedio para el área de interés. En caso de existir una tendencia o un gradiente de concentración en área de interés, el muestreo aleatorio asegura la inclusión de información a lo largo del gradiente.	
Muestreo sistemático	Probabilístico	Se debe incluir un componente aleatorio en la selección de la ubicación inicial a partir de la cual se construye la cuadrícula de ubicación del muestreo. La cuadrícula se puede formar en varios patrones (triángulos, rectángulos, hexágonos). Recomendado para áreas pequeñas con concentraciones elevadas.	Se debe aplicar el cálculo de la varianza para estimar los límites de confianza de la concentración promedio.

- (ii) Tipos de muestra: se pueden coleccionar dos tipos de muestras según se defina en el plan de muestreo, los cuales pueden ser muestras simples o muestras compuestas.

Las muestras simples representan una única parte de un medio, recolectada en un lugar y momento específicos; mientras que las muestras compuestas combinan submuestras de diferentes ubicaciones y/o momentos. Las muestras compuestas pueden provocar la dilución de los contaminantes o distorsionar la concentración real de un punto específico; por lo que no se recomienda como única información para la evaluación de riesgos ni para la caracterización de hotspots. Este muestreo puede resultar útil si las concentraciones y por lo tanto las exposiciones varían con el tiempo o el espacio, como ocurre con ríos o arroyos.

También se deberá considerar si las muestras serán tomadas en la superficie o en profundidad. Es recomendable que el muestreo se



Ambiente

realice en profundidad, ya que esto permitirá evidenciar la distribución del contaminante a lo largo de un perfil.

- (iii) Otros factores de influencia en el muestreo: en la tabla xxx se presentan otros factores a definir en la planificación del muestreo.

FACTORES DE INFLUENCIA	CONSIDERACIONES GENERALES
Consideraciones de tiempo y factores meteorológicos	<p>El diseño del muestreo debe considerar la influencia de estos factores en las concentraciones químicas, dado que pueden generar variabilidad en los resultados. Con el objeto de minimizar la variabilidad se recomienda considerar las siguientes prácticas:</p> <ul style="list-style-type: none">- Incluir ciclo de muestreo anual o por estaciones: se recomienda considerar mínimo dos eventos de muestreo los cuales deben tener lugar durante los extremos de las estaciones climáticas.- Estimar la variabilidad: para la evaluación de riesgo los datos no deben estar correlacionados; sin embargo, algunas muestras repetidas pueden correlacionarse por lo que es necesario aplicar estimadores de varianza que puedan considerar la variable de correlación. Si esto no se aplica, los datos correlacionados se tratan como una muestra aleatoria que puede ser empleada para calcular límites de confianza superior.
Mediciones en campo	<p>Si en el análisis preliminar no se realizaron mediciones en campo, en esta etapa se pueden efectuar pero teniendo en cuenta que esta información no debería ser utilizada en la evaluación de riesgo. Este tipo de mediciones permiten justificar la necesidad de un muestreo detallado y soportar técnicamente su planificación.</p>
Tiempo y costo del muestreo	<p>El tiempo y costo del muestreo puede ser una limitante al momento de seleccionar las áreas de interés y puntos de muestreo, por lo que es importante sopesar el muestreo con el tiempo y costo involucrado; y de ser necesario implementar las estrategias más adecuadas que permitan obtener la información requerida para la evaluación de riesgo.</p>
Protocolos de muestreo	<p>Los protocolos de muestreo deben promover la homogeneidad de las muestras, asegurar la inalterabilidad de las muestras y garantizar la representatividad de la situación del sitio.</p> <p>En el protocolo de muestreo se debe considerar (i) el objetivo del muestreo, (ii) procedimientos para la toma de muestras, conservación, manipulación y transporte de muestras y, (iii) los análisis y metodologías analíticas que se aplicaran en la medición de las muestras. Tener claridad en esta información permitirá registrar los detalles esenciales que pueden ser requeridos en el análisis de la información.</p>

FACTORES DE INFLUENCIA	CONSIDERACIONES GENERALES
Equipos de muestreo	Los equipos empleados para la toma de muestras deben garantizar que no generaran alteraciones en la composición química de la misma. Así mismo, se deben considerar los elementos para almacenar, preservar y almacenar la muestra los cuales deben asegurar que la muestra será inalterada desde su toma hasta el ingreso al laboratorio para su análisis.
Toma de muestras para control de calidad	La planificación del muestreo debe considerar, la toma de muestras que puedan ser empleadas para asegurar la validez tanto del muestreo como de la medición. Estas muestras pueden ser: - blanco de muestras: son muestras tomadas en campo que sirven para establecer una línea base del estado natural del sitio en sospecha, detectar alguna contaminación asociada a los equipos de muestreo o contaminación cruzada. - duplicado de muestras: se utilizan para evaluar la precisión del método de muestreo y la homogeneidad de la muestra tomada. - muestras divididas: son empleadas en los casos donde los análisis serán realizados por dos laboratorios independientes. - blancos de transporte: corresponde a muestras blanco que se llevan hasta el campo y de regreso sin ser manipuladas. Estas sirven para identificar algún tipo de contaminación durante la manipulación y transporte de las muestras
Conservación de las muestras	De ser necesario, se debe contar con protocolos adicionales para la preservación de las muestras de tal manera que se garantice la estabilidad tanto de la matriz como de los analitos hasta el análisis y medición. Así mismo, con el fin de garantizar la adecuada identificación de las muestras, estas deben ser etiquetadas con base en un procedimiento estandarizado, establecido por el responsable del muestreo.

Finalmente, en la tabla siguiente se presentan recomendaciones generales para la ejecución adecuada del muestreo en campo, sin importar la matriz o medio objetivo.

ETAPA DEL MUESTREO	RECOMENDACIONES
Antes del muestreo	<ul style="list-style-type: none"> Asegurar que el embalaje de los recipientes y frascos / viales, ya sea vacíos o con muestras, sea el adecuado para la conservación y transporte de las muestras. Antes de seleccionar el (los) equipos e instrumentos que el muestreo requiere, realizar las inspecciones de rutina para asegurar que el equipo está en condiciones óptimas y que se puede utilizar u operar en condiciones seguras. Verificar que el embalaje y traslado de los equipos se realiza bajo procedimientos estandarizados que garantizan que va llegar al sitio en iguales condiciones.

ETAPA DEL MUESTREO	RECOMENDACIONES
	<ul style="list-style-type: none"> • Antes de operar cualquier equipo de muestreo se debe revisar cuidadosamente, considerar el instructivo de manejo y aplicar las recomendaciones correspondientes al mismo. • Delimitar y señalizar el área donde se va a trabajar e impedir el acceso a esta área de personas particulares o no autorizadas. Este encerramiento se debe mantener durante la preparación del área y la recolección de la muestra. • Revisar el estado de los Elementos de Protección Personal (EPP) que usara el personal responsable del muestreo. Dentro de estos se encuentran: gafas, botas, casco, máscara para vapores (teniendo en cuenta el tipo de sustancia a manipular, tanto del preservante si aplica como la del posible contaminante), guantes (carnaza, nitrilo, látex, anticorte, etc) y trajes de protección adecuados. Utilice bloqueador solar y repelente. • Si el muestreo se realiza en espacios cerrados, asegurar la implementación de sistemas de ventilación que permitan reducir la concentración de vapores que pueden ser liberados al ambiente durante las actividades de muestreo por manipulación del suelo. • Asegurar que el equipo de muestreo sea nuevo cuando se requiera, o limpio y descontaminado si es reutilizable. • Iniciar las labores de muestreo únicamente cuando el responsable haya dado la orden para hacerlo.
Durante el muestreo	<ul style="list-style-type: none"> • Acatar las señales y/o advertencias del sitio donde va a operar. • Mantener el área de trabajo ordenado y limpio con el fin de evitar accidentes y prevenir posible contaminación cruzada. • Hacer uso de los EPP todo el tiempo del muestreo. • No deben existir distracciones mientras se realiza el muestreo. Se deben suspender las labores si el personal se encuentra con síntomas de agotamiento o enfermedad, dado que puede ocasionar accidentes. • No utilizar ropa suelta o joyas (relojes, pulseras, cadenas, anillos), dado que pueden causar accidentes. • No consumir bebidas ni comidas mientras se está realizando el muestreo. • Hacer uso apropiado de preservantes cuando estos sean usados. • Manipular cuidadosamente los recipientes de almacenamiento de las muestras, principalmente al cerrar, de tal manera que la presión al realizar el ajuste de cierre no afectará el envase y que las muestras no se van a derramar durante el transporte. • Mantener un recipiente para almacenar los residuos resultantes (guantes, paños de limpieza, bailer, etc.) en cada punto de muestreo, con el fin de no generar contaminación cruzada.
Después del muestreo	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar el embalaje de las muestras para asegurar que movimientos bruscos durante el transporte no afecten los recipientes que contienen las muestras. • Revisar que los mecanismos de conservación de las muestras se mantendrán inalterables durante el transporte, como por ejemplo el uso de hielo o hielo seco cuando las muestras requieren condiciones de refrigeración o congelación. • Disponer de los residuos resultantes de manera adecuada.

En el numeral 6.4.2 se incluyen consideraciones específicas asociadas al muestreo para cada una de las matrices o medios ambientales que son objeto de estudio en el análisis detallado.

6.4.1.7 Medición y análisis

La medición de las muestras debe ser desarrollada por laboratorios que tengan los ensayos requeridos acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025, los cuales a través de su acreditación demuestran la competencia para la ejecución de los ensayos y aseguran la validez de los resultados emitidos. Adicionalmente, a la acreditación es necesario tener en cuenta otras consideraciones para la selección del proveedor de los servicios de medición. Dentro de estas se encuentran:

- ✓ Revisar los límites de detección y cuantificación del ensayo requerido, ya que estos deben estar por debajo de los valores que posiblemente pueden encontrarse en las matrices de estudio.
- ✓ Verificar que el alcance de la acreditación puede cubrir los requerimientos de medición que se necesitan para determinar los niveles de contaminantes en los medios de interés. Así mismo, asegurar que la acreditación esta otorgada para la medición en estos medios y no para otras matrices diferentes.
- ✓ Revisar la oferta de laboratorios a nivel regional, departamental o nacional que puedan prestar los servicios de medición requeridos. En caso de que la oferta no esté disponible para los analitos o matrices de interés, expandir la búsqueda de proveedores a nivel internacional, teniendo en cuenta que deben estar acreditados por los organismos de acreditación de su país. En estos casos también aplica la verificación del cumplimiento de las características de desempeño de los métodos con las necesidades de medición que se tengan.
- ✓ Considerar las indicaciones de envío de las muestras, que pueden ser dadas por los laboratorios, para asegurar la integridad de las mismas hasta el momento de su medición.
- ✓ Evaluar los costos asociados al envío, implementación de mecanismos de conservación de las muestras cuando se requiero y medición de las mismas; con el fin de asegurar que se cuenta con los recursos para todos los análisis requeridos.

6.4.1.8 Identificación y gestión de la incertidumbre de la información

La incertidumbre en la evaluación de riesgo puede describirse como una falta de conocimiento con respecto a alguna información o parámetro incluido en el análisis. Considerar la incertidumbre con respecto a la información de entrada o a los valores de los parámetros del modelo conceptual es de vital importancia dado que los resultados serán empleados en el proceso de toma de decisiones para la gestión de las fuentes de contaminación o de los pasivos ambientales.

Los parámetros en la evaluación de riesgo pueden verse afectados por dos fuentes de incertidumbre que corresponden a (i) aleatoriedad, debido a la variabilidad de los fenómenos o porque no se pueden modelar todos los factores que afectan al sistema que se está estudiando; y (ii) falta de información, con respecto a los valores de los parámetros de entrada de la evaluación de riesgos. Estas fuentes de incertidumbre pueden estar bajo control a través de la recopilación de datos y la aplicación de un análisis estadístico para la fuente asociada a la aleatoriedad; y en cuanto a la fuente asociada a la falta de información se puede aceptar la información que expertos técnicos puedan proporcionar.

6.4.2 Caracterización por matriz o medio

La etapa de análisis detallado se fundamenta en la obtención y análisis cuantitativo de información primaria, por lo que una vez se haya realizado la planificación de la investigación y se tenga claro las matrices ambientales que sobre las cuales se genera la afectación ambiental, se requiere realizar una caracterización exhaustiva de cada matriz. En este sentido, a continuación, se presentan los aspectos claves que enmarcan la identificación de cada una de las matrices ambientales que pueden encontrarse en un sitio en sospecha.

6.4.2.1 Investigación hidrogeológica

El objetivo de una investigación hidrogeológica de un sitio en sospecha consiste en caracterizar los problemas de contaminación en el suelo y el agua subterránea con suficiente detalle para facilitar el diseño de un programa de acción correctiva costo efectiva (Bedient et. al, 1997).

Para cumplir con el objetivo anterior, la investigación del sitio implica la medición de los parámetros físicos que controlan el transporte subsuperficial de contaminantes en un sitio específico. Se debe adquirir la información y datos



Ambiente

geológicos, hidrológicos y químicos para que en forma integrada se defina la naturaleza y la extensión de la contaminación en el suelo y agua subterránea, y el potencial de migración de contaminantes dentro del sistema natural de flujo de agua subterránea.

La cuantificación analítica en los puntos de contacto ofrece un dato preciso y fiable, con un bajo grado de incertidumbre, sin embargo, solo refleja el momento de tiempo en el que fue tomado y no la evolución de la concentración en el tiempo, por lo cual, cuando la exposición se ha dado en un mayor periodo de tiempo que la medición, se recomienda realizar el respectivo análisis por medio de modelos, incorporando las incertidumbres derivadas del mismo modelo.

Los procesos hidrogeológicos son por naturaleza complejos, debido a la heterogeneidad de las propiedades geológicas y los efectos transitorios de los fenómenos de recarga y descarga en un acuífero. Adicionalmente, se puede tener más complejidad, ya que los contaminantes generalmente están distribuidos de forma irregular en la matriz porosa y en el agua subterránea, además reaccionar con ellas. Por otra parte, la caracterización detallada del transporte de un contaminante en cada milímetro del acuífero es poco práctica. Desde una perspectiva ingenieril, el objetivo es, definir los procesos de contaminación subsuperficial hasta el nivel de detalle necesario para diseñar medidas eficaces de control, o revertir estos procesos, teniendo siempre en cuenta la protección a la salud humana y el ambiente.

La investigación hidrogeológica de un sitio, es el procedimiento mediante el cual se desarrolla un "modelo de trabajo" de la migración de la pluma contaminante dentro del régimen de flujo de agua subterránea. En todos los casos, este modelo del ambiente subsuperficial se construye a partir de tres componentes principales de la información:

- (i) Geología: El componente físico dentro del cual los fluidos subsuperficiales llegan, se almacenan y fluyen.
- (ii) Hidrología: El movimiento de fluidos a través de este componente físico.
- (iii) Química: La naturaleza de los constituyentes químicos que se transportan en el sistema de flujo subsuperficial, y las interacciones químicas y físicas entre los contaminantes y la formación subsuperficial y las aguas subterráneas que están ocurriendo.
- (iv)

Con frecuencia, los dos primeros componentes físicos se integran en uno solo, denominado componente hidrogeológico.

Usualmente el modelo del sitio se construye incluyendo sistemáticamente cada uno de estos componentes:

- (i) Geología. Se debe caracterizar el perfil estratigráfico debajo del sitio e identificar los estratos que sirven como posibles conductos para el flujo de fluidos y las características geológicas que pueden influir en el movimiento y la acumulación de líquidos de fase no acuosa (NAPLs).
- (ii) Hidrología. Se debe medir la distribución de la carga (cabeza) hidráulica dentro de la zona de saturación para determinar la velocidad real y la dirección del movimiento del agua subterránea a través de esta zona.
- (iii) Química. Se recolectan y analizan las muestras de agua para determinar la extensión lateral y vertical de la migración de la contaminación dentro del régimen de flujo de agua subterránea. También se toman muestras de suelo para determinar si la fuente es el suelo, como también para determinar los parámetros de adsorción en la fase sólida.
- (iv)

En la práctica se superpone la adquisición de datos para los tres componentes anteriores. Por ejemplo, se puede perforar un pozo para caracterizar la geología del sitio, que a su vez proporciona muestras de suelo para análisis de laboratorio de la concentración de contaminantes, y finalmente puede convertirse en un pozo de monitoreo para recoger muestras de agua subterránea y datos hidrológicos.

6.4.2.2 Caracterización del suelo

- (i) Muestreo

La tabla siguiente presenta los equipos de muestreo más comunes empleados para la toma de muestras de suelo.



Ambiente

TÉCNICA MUESTREO	MÉTODO	MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE MUESTRA	TIPO DE SUELO		¿SE PUEDE USAR LA TÉCNICA POR DEBAJO DE LA ZONA VADOSA?	TIPO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD DE MUESTREO	OBSERVACIONES
			NO ADECUADO	ADECUADO				
Métodos Manuales								
Barreno Manual	Rotatorio	Barreno	<ul style="list-style-type: none">Gravilla no cohesivaPiedrasEscombrosTerrones de material	<ul style="list-style-type: none">ArcillaSedimentoArena cohesiva y terreno similar	No	Disturbada	0 – 2.0 m	Muestreo hasta 5.0 m, posible en terreo arenoso cohesivo
Excavación Manual	Excavación	Herramienta de muestreo	Concreto sólido u obstrucción similar	Todos los tipos	No	Disturbada y no disturbada	0 – 1.5 m	En terreno inestable los lados pueden requerir apoyo
Métodos Mecánicos								
Barreno eléctrico	Rotatorio	Con barreno	<ul style="list-style-type: none">Gravilla no cohesivaPiedras grandesTerrones de material	<ul style="list-style-type: none">ArcillaSedimentoArena cohesiva y terreno similar	No	Disturbada	0.05 – 2.0 m	Muestreo hasta 5.0 m, posible en terreno arenoso cohesivo
Perforación de impulsos/sondeo dinámico	Apisonamiento	Con herramienta para muestra en la maquina	<ul style="list-style-type: none">GravillasPiedras grandesTerrones de material	<ul style="list-style-type: none">ArcillaSedimentoArena cohesiva y terreno similar	No	Disturbada y no disturbada	0.5 – 1.0 m	En terreno inestable los lados pueden requerir apoyo
Orificios								
Herramienta de cable	Percusión	Con herramienta de perforación	<ul style="list-style-type: none">Obstrucciones	<ul style="list-style-type: none">ArcillaSedimentoArena cohesiva y	Si	Disturbada y no disturbada	0.5 – 3.0 m	



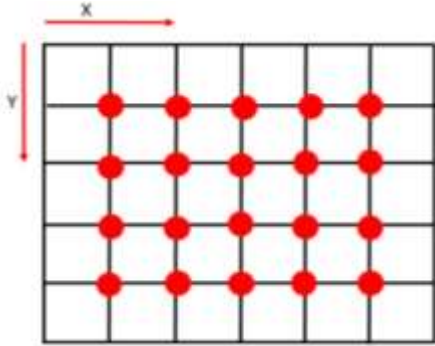
Ambiente

TÉCNICA MUESTREO	MÉTODO	MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE MUESTRA	TIPO DE SUELO		¿SE PUEDE USAR LA TÉCNICA POR DEBAJO DE LA ZONA VADOSA?	TIPO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD DE MUESTREO	OBSERVACIONES
			NO ADECUADO	ADECUADO				
				terreno similar				
Perforadoras rotatorias	Rotatorio	No se realiza muestreo. Solo para formación de orificios	• Obstrucciones sólidas	• Todos los suelos	No	Ninguno	1.0– 40 m	Adecuado para pasar las capas superiores de suelo que no sean de interés.
Barreno excavadora	Percusión	No posible	• Obstrucciones sólidas	• Todos los suelos	No	Ninguno	1.0– 20 m	Adecuado para pasar las capas superiores de suelo que no sean de interés.
Barreno de aspas continuas	Rotatorio	No posible	• Obstrucciones sólidas	• Todos los suelos	No	Ninguno	1.0– 20 m	Adecuado para pasar las capas superiores de suelo que no sean de interés.
Barreno de vástago hueco	Rotatorio	Equipo de muestreo abajo del vástago	Obstrucciones sólidas	Todos los suelos	Si	Disturbada y no disturbadas	1.0– 20 m	Muestreo abajo del centro del vástago con barreno <i>in situ</i>
Perforación de lavado	Presión	No posible	• Suelo cohesivo • Gravillas • Piedra • Ladrillo	• Sedimento • Arena • Gravilla fina	No	Ninguno	0– 10 m	Adecuado para pasar las capas superiores de suelo que no sean de interés.
Excavaciones con máquina								
Calicatas	Excavación	Con herramientas de muestreo	Grandes obstrucciones solidas	Todos los suelos y materiales	No	Disturbada y no disturbada	0 – 6 m	----

En la tabla siguiente se presentan los métodos de muestreo aplicados para suelo.

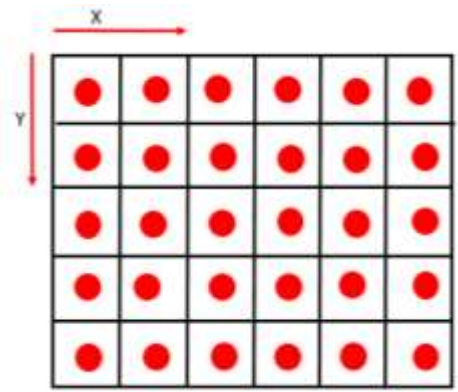
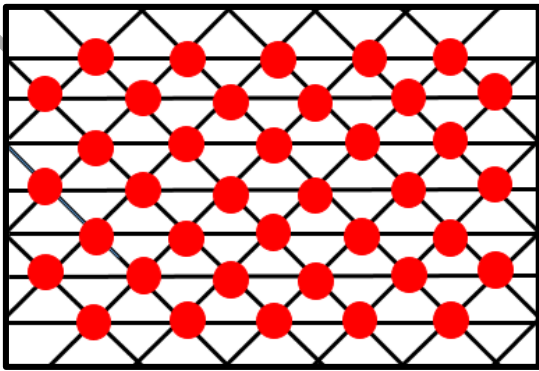
MÉTODO DE MUESTREO	CARACTERÍSTICAS
Manual	El método de muestreo manual es utilizado para recolectar muestras superficiales, la profundidad puede ser variable, y se debe tener en cuenta aquella profundidad a la que el método llega a ser impráctico, por la dureza del suelo, y la calidad del tipo de muestra recolectada. Entre los equipos utilizados para este método de muestreo se encuentran las cucharas y barrenos manuales.
Empuje directo	El método de muestreo por empuje directo se efectúa tomando la muestra mediante los dispositivos como la cuchara partida (Split spoon) o los contenedores y/o revestimientos (Liners). Estos dispositivos de muestreo cambian según el equipo de perforación que se utilice. Este método se ha generalizado ya que el procedimiento es por incamamiento, y la muestra queda directamente en el contenedor o liner, evitando que se manipule, quedando completamente contenida dentro del muestreador, sin tener espacio vacío, evitando que salgan los volátiles.
Métodos con taladros rotativos mecánicos	Utiliza equipos con perforadores rotatorios y muestreadores de pared delgada (shelby).
Muestreo con retroexcavadora	Se utiliza este tipo de maquinaria para abrir calicatas de volumen considerable

En cuanto a los tipos de muestreo, en la tabla siguiente se presentan los esquemas de muestreo que pueden ser aplicados con sus características.

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
Patrones de muestreo con distribución uniforme	
Rejillas regulares <p>En el plano se trazan rejillas con líneas paralelas y perpendiculares equidistantes, permitiendo que todas las celdas tengan las mismas dimensiones. El tamaño de las celdas depende del detalle requerido, entre más detalle se requiera las celdas son más pequeñas. Se marca un punto en cada celda, ya sea al centro o en las intersecciones, pero en todas las celdas los puntos deben quedar en el mismo lugar.</p> <p>Este patrón es apropiado cuando no se conoce la distribución de contaminantes en el sitio. Sin</p>	

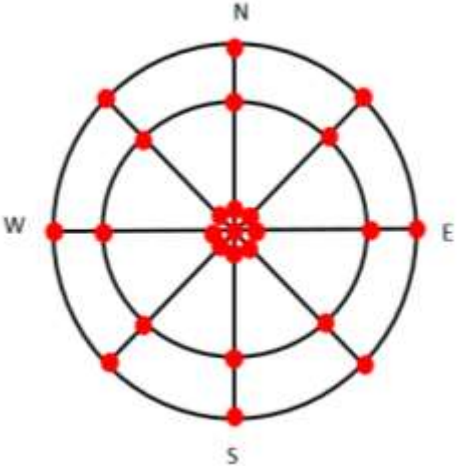
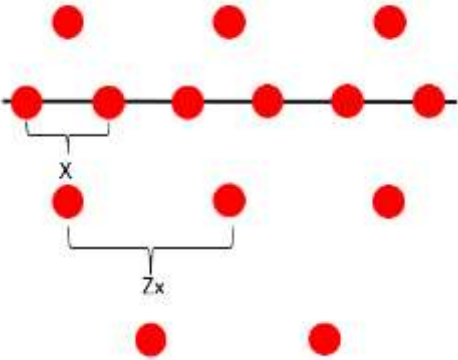


Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
<p>embargo, también se utiliza cuando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio y la contaminación es distribuida de manera uniforme.</p> <p>Se recomienda ampliamente la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	
<p>Rejillas triangulares</p> <p>En el plano se trazan rejillas con líneas paralelas equidistantes tratando de conformar triángulos equiláteros, todos con las mismas dimensiones. El tamaño de las celdas depende del detalle requerido, entre más detalle se requiera la rejilla es más cerrada. Cuando en este patrón se marca un punto en el centro de cada celda, éste queda rodeado por 3 puntos que se encuentran a la misma distancia d_x, entonces se puede calcular el radio no muestreado ($r = (d_x/3) (\sqrt{3})$), así como el área circular no muestreada ($A = \pi r^2 = \pi d_x^2/3$).</p> <p>Este patrón es apropiado cuando no se conoce la distribución de contaminantes en el sitio. Sin embargo, también se utiliza cuando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio y la contaminación es distribuida de manera uniforme.</p> <p>Se recomienda ampliamente la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	

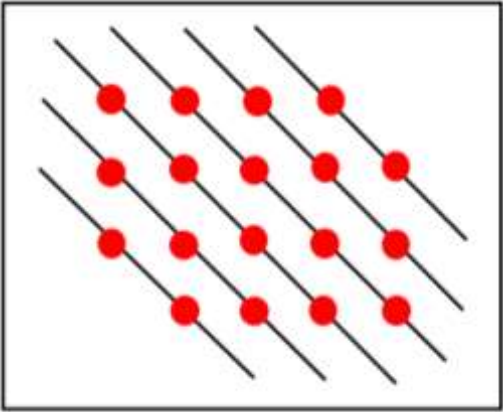
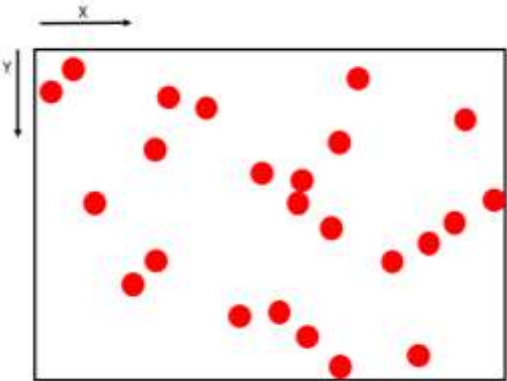


Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
<p>Rejilla circular</p> <p>Es de utilidad para delimitar la zona contaminada en instalaciones donde existen tanques de almacenamiento o se conoce la fuente que corresponde a un solo punto. Para determinar la influencia se trazan círculos concéntricos, cuya separación es función del detalle que se requiera. Se trazan líneas rectas considerando los 8 puntos cardinales principales y se ubican los puntos de muestreo en las intersecciones. Se espera que con esta rejilla las mayores concentraciones de contaminantes se ubiquen en el centro.</p> <p>Este patrón se utiliza cuando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio por contaminación puntual.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde hayan ocurrido fugas o derrames puntuales. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde se aplique una remediación in-situ en contaminaciones puntuales.</p>	
<p>Sobre una línea</p> <p>En el caso de que la contaminación siga una línea recta, como en aquellos referidos a fugas de ductos, los puntos de muestreo pueden ser marcados para cubrir la zona impactada y las zonas aledañas. Para ello se marca una línea recta sobre la tubería y puntos separados una distancia "x" y en líneas auxiliares paralelas se incluyen puntos traspaleados, separados a una distancia "x", o "2x". Los puntos de las líneas auxiliares pueden estar salteados. La separación de las líneas auxiliares está en función del detalle que se pretenda para el estudio.</p> <p>Este patrón se utiliza cuando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio por contaminación puntual.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde</p>	

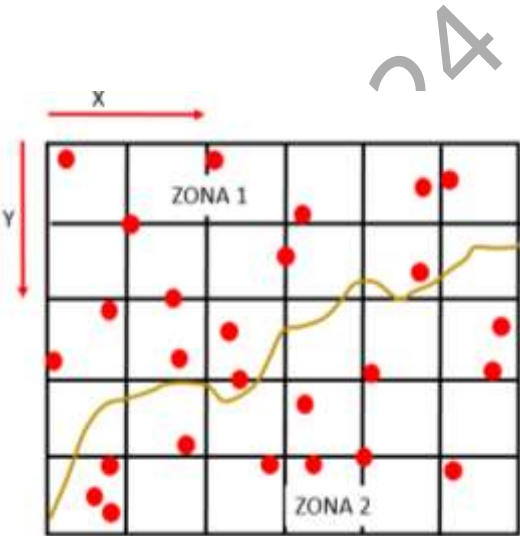
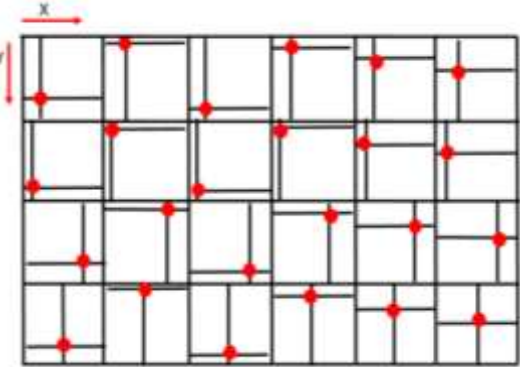


Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
<p>hayan ocurrido fugas a lo largo de ductos. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde se aplique una remediación in-situ a lo largo de ductos.</p>	
<p>Diagonales múltiples</p> <p>En el plano se traza una diagonal central y líneas paralelas, sobre las cuales se ubican los puntos de muestreo, manteniendo la misma distancia entre ellos. Es deseable que la separación de las líneas sea similar a la distancia entre los puntos en una misma línea; entre mayor detalle sea requerido, las distancias serán más cortas.</p> <p>Sin embargo, también se utiliza cuando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio y la contaminación es distribuida de manera uniforme.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable sólo si se asegura equidistancia entre los puntos. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable sólo si se asegura homogeneidad en el suelo y equidistancia entre los puntos.</p>	
Patrones de muestreo con distribución aleatoria	
<p>Aleatorio</p> <p>Este es uno de los patrones empleados en los métodos estadísticos. Los puntos de muestreo se eligen al azar, con ayuda de programas de cómputo o tablas estadísticas, no importa la distribución de instalaciones, ni los antecedentes del sitio. Este patrón es muy irregular, no sigue ninguna lógica. Pueden quedar manchas de contaminación en los espacios vacíos y pasar desapercibidas durante el muestreo.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde hayan ocurrido fugas o derrames puntuales. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos es recomendable en sitios donde se</p>	

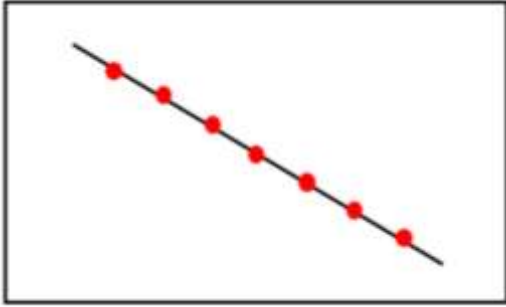
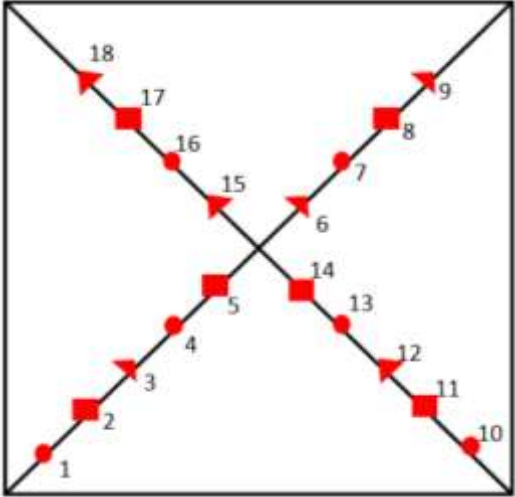


Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
aplique una remediación in-situ en contaminaciones puntuales.	
<p>Aleatorio sobre rejilla regular</p> <p>En inglés se conoce como “estratified”, pero en este escrito se eliminó el término para evitar confusiones en caso de referirse a los estratos del suelo. Este es otro de los patrones empleados en los métodos estadísticos. Para marcar los puntos de muestreo se crea una rejilla regular en el plano, se elige un número igual de puntos distribuidos aleatoriamente en cada celda, con ayuda de una tabla de números aleatorios o con programas de cómputo; el plano se divide en zonas. Este patrón tiene la desventaja de que algunos puntos pueden quedar muy cercanos y otros muy alejados, en los espacios vacíos pueden pasar desapercibidas contaminaciones puntuales.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos no es recomendable dado que podría subestimar la mancha de contaminación. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos no es recomendable.</p>	
<p>Aleatorio desalineado sobre rejilla regular</p> <p>Este patrón es también empleado en los métodos estadísticos. Este patrón es similar al anterior, la diferencia radica en que en algunas celdas la coordenada “x” se mueve al azar, y en el resto de las celdas se mueve la coordenada “y”, o viceversa. El patrón tiene las mismas desventajas que el aleatorio sobre rejilla regular, en el sentido de que algunos puntos pueden quedar muy cercanos y otros muy alejados, en los espacios vacíos pueden pasar desapercibidas contaminaciones puntuales.</p> <p>La aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos no es recomendable dado que podría subestimar la mancha de contaminación. En el caso de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos no es recomendable.</p>	

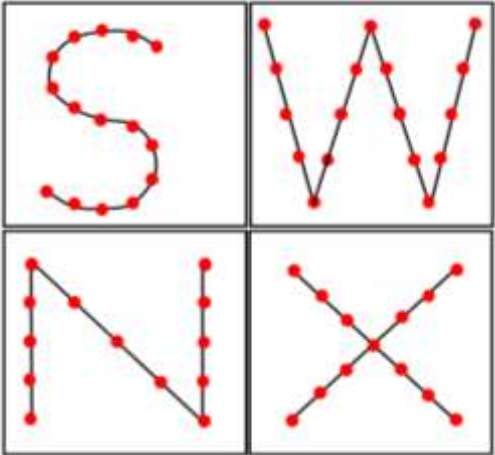
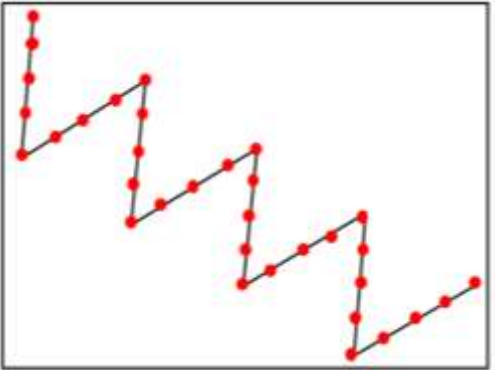
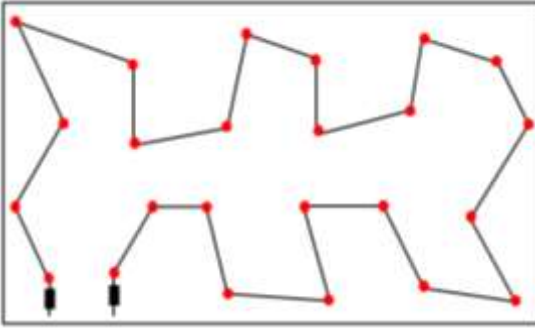


Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
Patrones de muestreo con distribución heterogénea	
<p>Diagonal simple</p> <p>Sobre el plano se traza una línea diagonal, sobre la cual se ubican los puntos de muestreo, manteniendo la misma distancia entre ellos. Este patrón no permite resultados representativos.</p> <p>No es recomendable la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	
<p>Diagonales cruzadas rotantes</p> <p>Este patrón de muestreo es de utilidad en sitios que se deben estar monitoreando en forma permanente para obtener información de los cambios a lo largo del tiempo, por ejemplo aquellos donde se está dando seguimiento a una atenuación natural. Este arreglo se recomienda para superficies en forma cuadrada, sobre el plano se marcan dos líneas diagonales perpendiculares a partir de los vértices. Sobre cada línea se marcan los puntos de muestreo como se muestra en la siguiente figura, en los muestreos subsecuentes se hace una rotación de las diagonales de 45°, en el sentido de las manecillas del reloj, manteniendo fijo el punto central. De esta forma se pueden hacer 8 muestreos consecutivos para cubrir toda el área. Cuando las dimensiones y forma del área de estudio permiten acomodar varios cuadrados, será necesario tomar muestras de las intersecciones de los cuadrados, donde los puntos 9 y 10 del primer cuadrado están cercanos a los puntos 1 y 18 del cuadrado siguiente, respectivamente.</p> <p>No es recomendable la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos. En cuanto a remediación es recomendado sólo en aquellos sitios donde la contaminación es uniforme y se va a dar seguimiento a una atenuación natural.</p>	



Ambiente

PATRÓN DE MUESTREO	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
<p>Muestreo irregular en forma de N, S, X o W</p> <p>En superficies en forma cuadrada se dibujan las letras referidas y sobre las líneas se marcan los puntos de muestreo tratando de que sean equidistantes, sin embargo, estos patrones no permite resultados representativos, ya que quedan espacios vacíos, donde pueden existir contaminaciones puntuales.</p> <p>No es recomendable la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	
<p>Zig-zag</p> <p>Sobre el plano, se dibuja una línea en zig-zag, y sobre ésta se marcan los puntos de muestreo, tratando de que sean equidistantes. Al igual que en el caso anterior, estos patrones no permite resultados representativos, ya que quedan espacios vacíos, donde pueden existir contaminaciones puntuales.</p> <p>No es recomendable la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	
<p>Zig-zag transverso</p> <p>Sobre el plano se marca una línea en zig-zag irregular tratando de que cubra toda la superficie de estudio, y sobre ésta, se marcan los puntos de muestreo, tratando de que sean equidistantes. Estos patrones tampoco permiten resultados representativos, ya que quedan espacios vacíos, donde pueden existir contaminaciones puntuales.</p> <p>No es recomendable la aplicabilidad de este patrón de muestreo en casos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.</p>	

(ii) Aspectos generales para la toma de muestras de suelo

- La muestra obtenida debe tener un tamaño que permita obtener mínimo 250 g de fracción final para analizar después de tamizada. No aplica para contaminantes volátiles.
- Garantizar que la toma de la muestra obtenida facilite o permita la preparación de muestras compuestas.
- Se debe garantizar que los equipos e instrumentos utilizados no contaminen las muestras, para este fin se deben limpiar con brocha o cepillo, o con agua entre la obtención de cada muestra.
- En el caso de los muestreos verticales que se realizan por medio de pozos o excavaciones se requiere abarcar los diferentes horizontes, las cuales se deben identificar en cuanto a color, textura, grado de compactación, etc. Con respecto a horizontes se debe considerar lo indicado en la tabla siguiente.

HORIZONTES	MUESTRAS
Horizontes con un espesor menor a 30 cm	Tomar una muestra que abarque el total del espesor
Horizontes con un espesor mayor a 30 cm	Tomarse tantas muestras como sea necesarias para cubrir el espesor total
Profundidades mayores a 2 m	El intervalo de muestreo debe definirse y justificarse

Fuente: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales -SEMARNAT-, 2010.

- El muestreo superficial se realiza con cuchara o espátula de acero inoxidable o plástico, o utilizar una herramienta similar.
- Generalmente, las muestras son simples.
- Dado el caso, la muestra compuesta debe estar integrada por cinco muestras simples tomadas en tresbolillo y distribuidas uniformemente.
- Si es necesario, resto de plantas deben ser retiradas del sitio antes del muestreo.
- Cantos mayores a 2 cm de diámetro deben ser retiradas.



Ambiente

- Tomar registro fotográfico del sitio donde se identifiquen los puntos de muestreo

6.4.2.3 Caracterización de agua subterránea

(i) Aspectos generales

El muestreo de agua subterránea es un componente clave de cualquier programa de monitoreo y de caracterización de un sitio. Existen muchos factores que pueden afectar la integridad de las muestras recolectadas en pozos de monitoreo o en otros puntos (pozos de bombeo, pozos abandonados, piezómetros, manantiales, aljibes), y de la calidad de los análisis de resultados generados por el muestreo (muy importante por ejemplo en hidrogeología forense, en la determinación del origen espacial y temporal de una contaminación). Algunos de estos factores están relacionados con la hidráulica de pozos, el diseño la instalación y mantenimiento de los puntos de monitoreo; el tipo y dispositivos para purga y muestreo, los procedimientos de muestreo y manejo de las muestras

(ii) Delimitación del área de muestreo

Desde el punto de vista hidrogeológico es importante delimitar el área del muestreo, para esto se precisa establecer el tipo de acuífero a monitorear teniendo en cuenta el modelo geológico, geofísico y estructural. Así como definir el flujo sus zonas de recarga, tránsito y descarga. Establecer las relaciones río – acuífero. Adicionalmente buscar información relacionada con fuentes de contaminación (IDEAM, 2003).

En caso que el muestreo este asociado a los efectos de una contaminación será preciso obtener información para determinar la dimensión de la afectación. Se debe considerar el uso actual del suelo, topografía con lo cual se pueda dar indicaciones de la distribución de los contaminantes. De igual forma, en el caso en que un derrame o fuga se haya presentado recientemente, se deben indicar la cantidad y tipo de contaminantes involucrados (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales México -SEMARNAT-, 2010).

(iii) Selección de la red de monitoreo de aguas subterráneas

Una red de monitoreo o de referencia, es una serie de pozos para toma de muestras utilizados para conocer el estado de las aguas subterráneas y evaluar las variaciones cuantitativas y cualitativas del recurso. Una red para estudiar las



Ambiente

aguas subterráneas depende del tamaño del sitio a estudiar. Así mismo la complejidad de la zona desde un punto de vista hidrogeológico. Otro factor decisivo corresponde a los propósitos de la red. Sin embargo la disponibilidad financiera es un factor decisivo para el establecimiento de la red de monitoreo (Banco Mundial, 2002 - 2006).

Para esto se deberá considerar pozos poco profundos, manantiales y pozos principales de suministro de agua donde el flujo es activo. Deben evitarse los pozos donde el flujo puede ser bajo o estar estancado. Los pozos utilizados para el muestreo deben estar ubicados a lo largo de los gradientes hidráulicos principales, y algunos deben localizarse aguas debajo de áreas potencialmente problemáticas debido a la vulnerabilidad, considerándose:

- ✓ Presencia de áreas urbanas con descargas de aguas residuales diversas
- ✓ Presencia de centrales eléctricas que posean descargas de aguas residuales que se infiltren en el subsuelo
 - Presencia de actividades extractivas con descargas y/o filtraciones potencialmente peligrosas.
- ✓ Sitios de disposición de residuos sólidos peligrosos y/o municipales
- ✓ Existencia de áreas donde se desarrolla agricultura intensiva
- ✓ Formaciones con rasgos kársticos desarrollados a través de los cuales puedan transportarse contaminantes desde la superficie al acuífero profundo subyacente

Formaciones con presencia de fallas o fisuras de desarrollo significativo y a través de las cuales puedan infiltrarse contaminantes al acuífero subyacente (Autoridad Nacional del Agua del Perú -ANA-, 2014).

(iv) Información preliminar

Tipos de datos requeridos para adelantar muestreos de aguas subterráneas.

TIPO INFORMACIÓN	INFORMACIÓN BÁSICA	INFORMACIÓN MULTITEMPORAL
Propiedades del acuífero	<ul style="list-style-type: none">• Búsqueda de registros de pozos de producción existentes en el área de muestreo (perfiles hidrogeológicos, niveles y calidad).• Registros de pruebas de bombeo.	<ul style="list-style-type: none">• Monitoreo del nivel de agua subterránea.• Monitoreo de la calidad del agua subterránea.
Uso del agua subterránea	<ul style="list-style-type: none">• Infraestructura de bombeo de agua subterránea en pozos de producción.• Inventario de los usos del agua subterránea.• Consumo en riego u otros usos.	<ul style="list-style-type: none">• Registros y/o pronósticos de población o usuarios del recurso.• Monitoreo del consumo de agua subterránea.

TIPO INFORMACIÓN	INFORMACIÓN BÁSICA	INFORMACIÓN MULTITEMPORAL
	<ul style="list-style-type: none"> • Concesiones de agua subterránea otorgados por las autoridades (incluir volúmenes). 	<ul style="list-style-type: none"> • Variación de los niveles de agua en los pozos de producción.
Información de apoyo	<ul style="list-style-type: none"> • Inventario del uso del suelo en el área de muestreo. • Mapas, secciones e información en general geológica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Datos meteorológicos. • Medición de caudales aguas superficiales, datos hidrológicos en general. • Imágenes de satélite multitemporales para definir los diferentes usos del suelo a través del tiempo en el área.

Fuente: (Banco Mundial, 2002 - 2006). Modificado AQUAVIVA SAS.2016.

(v) Modelo hidrogeológico conceptual

El Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), es una herramienta útil para adelantar un muestreo y diseñar un plan de monitoreo. Este modelo integra las evaluaciones geológica, geofísica, hidrológica, geoquímica, hidráulica e hidrodinámica y requerirá mayor o menor resolución de acuerdo al propósito del análisis. Este modelo se actualiza a través del tiempo, dependiendo de la incorporación y consecución de información, obtenidas a través de monitoreos (IDEAM, 2015).

(vi) Identificación de variables de análisis

Este aspecto se relaciona con la definición de los parámetros a muestrear. Existen variables hidrodinámicas, variables físico – químicos y microbiológicos, variables para análisis isotópicos. La selección de las variables mínimas a medir dependerá del objetivo del muestreo además de las condiciones geológicas de la zona y la evaluación de las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea. En la *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, se relacionan y describen estas variables.

Variables a analizar y parámetros empleados.

VARIABLES	TIPO DE PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Hidrodinámicas	Hidráulicos	Nivel de piezométrico, Conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
Físico-químicos y microbiológicos		Dureza total, pH, Temperatura, Conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, oxígeno

VARIABLES	TIPO DE PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
		disuelto, potencial redox, alcalinidad y los iones mayores (Calcio, Sodio, Potasio, Cloruro, Sulfato, nitrato, bicarbonato, Magnesio), entre otros.
Análisis isotópicos		^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C en Carbonatos disueltos y ^{15}N

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016

(vii) Identificación de tipos de pozos

Dentro del plan de muestreo es indispensable incorporar el tipo de pozos en los que se tomaran las muestras, ya sea en pozos construidos o en pozos existentes adecuados efectuar el muestreo, que cuenten con las especificaciones técnicas para considerarse como pozos de monitoreo. Es decir que a futuro sobre estos se puedan realizar más muestreos. Los pozos se clasifican acorde con la iError! N o se encuentra el origen de la referencia.

Tipos de pozos que pueden ser usados para el muestreo de aguas subterráneas.

TIPO DE POZO	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
Pozos convencionales o pozos de observación	<ul style="list-style-type: none"> Constituyen pozos dedicados exclusivamente al monitoreo. Con el objeto de observar la presencia generalizada de variaciones de profundidad en la carga hidráulica y/o la calidad del agua, se pueden utilizar piezómetros. 	<ul style="list-style-type: none"> Existen tres tipos de piezómetros: sencillos, dobles y múltiples (piezómetros anidados). Las especificaciones técnicas para la construcción de pozos de monitoreo de aguas subterráneas se encuentran en la Norma Técnica Colombiana (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 1996).
Pozos no convencionales	<ul style="list-style-type: none"> Pozos abandonados que se adecuan para ser utilizados como pozos de monitoreo. 	<ul style="list-style-type: none"> Deben cumplir con especificaciones mínimas relacionadas con el diseño, captar únicamente el acuífero objeto de monitoreo y cumplir con disposiciones sanitarias que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie.

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016.

(viii) Procedimiento de muestreo

- ✓ Detección de gases y vapores: la primera actividad en cada punto de muestreo es destapar el pozo y registrar con un fotoionizador si hay presencia de volátiles, vapores o gases en la columna de aire por



Ambiente

encima de la columna de agua. Usualmente esta labor se hace con un fotoionizador o detector de fotoionización (PID por sus siglas en inglés) debidamente calibrado.

- ✓ Medición del nivel de agua y espesor de producto libre: La medición de niveles requiere un conocimiento del modelo hidrogeológico conceptual pues los niveles registrados deben corresponder a una unidad acuífera en particular y no a la mezcla de varias unidades cuando el acuífero es multicapa, pues las condiciones hidráulicas de cada una son diferentes dependiendo de las condiciones de presión y confinamiento (IDEAM, 2015).

El nivel de agua y el espesor de producto libre (si existe), se deben medir antes de purgar el pozo respectivo. Las mediciones de nivel de agua no deben hacerse después de purgar y antes de muestrear, dado que puede alterar la columna de agua y aumentar la turbiedad. No obstante, posterior a completar el muestreo se puede medir el nivel del agua (Autoridad Nacional del Agua del Perú -ANA-, 2014). Conviene subrayar que la medición directa de los niveles de agua subterránea en los pozos de observación se puede hacer con instrumentos de operación manual o con ayuda de instrumentos de registro continuo. Existen varios métodos y dispositivos para medir el nivel de agua, siendo los más utilizados las sondas eléctricas y los transductores de presión. En la Tabla xxx, se presenta una descripción de los equipos más comunes utilizados para medición de niveles.



Ambiente

Instrumentos y equipos utilizados en la medición de niveles de pozo.

TIPO	EQUIPO / INSTRUMENTO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Manual	Cinta seca	Cinta (plástica, metálica, cable) graduada que se sumerge en la boca del pozo. Se mide la superficie mojada de la cinta para determinar el nivel de la columna de agua.	<ul style="list-style-type: none">• Método económico• No requiere calibración• Método rápido al ser directo el resultado.	<ul style="list-style-type: none">• No es preciso requiere repeticiones para confirmar resultados.• No es efectivo después de 50 metros de profundidad.
	Cinta y peso	Consta de un peso unido al extremo de un cable que cae a una velocidad constante, desde un instrumento portátil situado en la superficie. La longitud del cable libre, equivale a la profundidad del nivel del agua, la cual se registra en un contador de revoluciones.		<ul style="list-style-type: none">• La precisión del instrumento depende de la experticia del operador que lo manipula.
	Sonda eléctrica	Es un sistema de electrodos situados al final de un cable. La corriente fluye a través del sistema cuando los electrodos están sumergidos en el agua. El cable se calibra con cintas adhesivas o señales a intervalos prefijados de uno o dos metros. La profundidad exacta del nivel del agua se mide hasta la señal más próxima marcada sobre el cable, mediante una regla de acero.	<ul style="list-style-type: none">• Este sistema es muy útil cuando se hacen mediciones repetidas del nivel del agua a intervalos frecuentes durante las pruebas de bombeo.• Se pueden realizar con facilidad mediciones del nivel del agua hasta una profundidad de 150 m hasta 300 m.	<ul style="list-style-type: none">• Los límites de la profundidad de la medición están asociados esencialmente a la longitud del cable eléctrico y al diseño del circuito eléctrico, así como al peso del equipo y al esfuerzo que hay que realizar para enrollar y desenrollar el cable.• El grado de exactitud de la medición depende de la habilidad del operador y de la exactitud con la que se hayan fijado las señales al cable.



Ambiente

TIPO	EQUIPO / INSTRUMENTO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Flotador	Consta de un flotador unido a un contrapeso mediante un cable que pasa por una polea. Las variaciones del nivel del agua pueden medirse por el cambio de nivel del contrapeso o de una señal fija sobre el cable. Se puede unir a la polea una escala de lectura directa.	<ul style="list-style-type: none">• Brinda una lectura directa.• Se encuentra fijo en el pozo y se puede revisar de manera permanente.• Es económico.	<ul style="list-style-type: none">• Tiene limitaciones ante fluctuaciones de escasa amplitud en el nivel.
Automático	Se utilizan numerosos y diferentes tipos de registradores automáticos del nivel de agua.		<ul style="list-style-type: none">• Son portátiles.• Fáciles de instalar• Funcionan sin operador durante períodos de tiempo variables.• Son capaces de medir las variaciones lineales y temporales del nivel de agua subterránea con distintas velocidades de registro, en diferentes escalas de tiempo y de nivel.• El mismo instrumento, puede ser utilizado durante varios períodos de observación y para un extenso intervalo de variaciones de agua subterránea en numerosos pozos de observación.	<ul style="list-style-type: none">• Es un equipo costoso, que requiere personal entrenado.• Requiere mantenimiento y calibración.

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016

- ✓ Determinación de parámetros hidráulicos del acuífero: los parámetros hidráulicos corresponden principalmente a la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, los cuales se determinan mediante ensayos directos, denominados ensayos de acuífero o de bombeo (pruebas de bombeo). Tienen por objeto medir el descenso de nivel resultante de un bombeo u otro factor de estrés hidrológico similar para, seguidamente, calcular los parámetros hidráulicos (OMM, 2012).

Principalmente durante los ensayos de bombeo se determinan los parámetros hidráulicos cuando el bombeo está controlado y se mantiene generalmente constante, mientras se miden los niveles de agua en el pozo bombeado y en los pozos de observación cercanos (red de monitoreo). Los cálculos hidráulicos parten de determinar el caudal bombeado el cual se puede medir con Vertederos calibrados, Orificio libre, Descarga libre en tubería, Canaleta Parshall, Contadores, entre otros.

Para el cálculo de los parámetros hidráulicos se requiere como mínimo la información en las tolerancias establecida en la tabla siguiente.

Información requerida para el cálculo de los parámetros hidráulicos.

INFORMACIÓN	TOLERANCIA
Caudal del pozo de control	± 10 %
Profundidad hasta el agua en los pozos, por debajo del punto de referencia	± 3 mm
Distancia del pozo de control a cada pozo de observación	± 0,5 %
Elevación de los puntos de referencia	± 3 mm
Distancia vertical entre los puntos de referencia y la superficie del terreno	± 30 mm
Profundidad total de los pozos	± 1%
Profundidad y longitud de los intervalos con rejillas en todos los pozos	± 1%
Información general	Diámetro, tipo de camisa, tipo de rejilla, método de construcción de todos los pozos analizados

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016.

- ✓ Purga del pozo: es una actividad que se debe realizar previo a la toma de muestras físico-químicas, con el fin de tomar una muestra representativa de las condiciones hidrogeológicas. Es un proceso que consiste en la remoción de un cierto volumen de agua del pozo, el cual es reemplazado por una porción de la zona adyacente que es representativa de las



Ambiente

características actuales del acuífero. En la tabla xxx se presentan los métodos de purga más frecuentemente utilizados.

Métodos de purga más comunes.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
Criterio del volumen almacenado dentro del pozo	Consiste en extraer varias veces el volumen de agua almacenado en la perforación. Se recomienda retirar al menos tres veces el volumen para la obtención de una muestra representativa. No es viable cuando hay muy bajo caudal de aporte.
Criterio de la estabilización de parámetros	Consiste en realizar mediciones regulares de algunos parámetros (pH, temperatura, Eh, conductividad eléctrica, etc.) en la propia línea de extracción. Se puede considerar que se han estabilizado los parámetros cuando en al menos tres lecturas consecutivas realizadas con más de dos minutos de separación o por la mitad del volumen almacenado en el pozo, difieren en menos de los rangos indicados en la iError! No se encuentra el origen de la referencia..

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016.

Criterios para definir estabilización de parámetros durante la purga.

PARÁMETRO	CRITERIO DE ESTABILIZACIÓN
Oxígeno disuelto	$\pm 0,2$ mg/L
Conductividad eléctrica	$\pm 5,0$ μ ohms/cm si los valores son inferiores a 1000 μ hms/cm $\pm 10,0$ μ ohms/cm si los valores son superiores a 1000 μ ohms/cm
pH	$\pm 0,1$ unidades de pH
Temperatura	$\pm 0,1$ °C
Turbiedad	< 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbiedad)
Eh (Potencial redox)	± 30 mV

Fuente: IDEAM, 2015. Modificado AQUAVIVA SAS.2016.

Para la purga se utilizan generalmente los mismos equipos que para el muestreo, el listado de los equipos recomendados para efectuar la purga y muestreo se encuentran en la tabla siguiente.

Equipos recomendados para realizar la purga y toma de muestras.

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Bombas eléctricas sumergibles	Están disponibles en materiales plásticos y de acero para pozos de 2" y 4", a velocidad constante o variable; con rangos de caudal desde 10 L/min hasta de 1 L/s, con bombeos hasta de 100 m de profundidad. Para purga de pozos y muestreo se requieren bombas de alta capacidad.



Ambiente

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
	En general, este tipo de bombas colocadas permanentemente en el pozo son adecuadas para el muestreo físico-químico y microbiológico.
Bombas peristálticas y de succión	Son bombas de succión. Deben utilizarse con precaución cuando se muestrean volátiles, la succión puede extraer los volátiles que están en solución. No sirve para muestrear niveles de agua por debajo de 7 m de succión.
Bombas eléctricas centrifugas superficiales	Cuando el nivel del agua está por debajo de los 9 m, se pueden utilizar utilizando un eyector. Este tipo de bombeo se puede efectuar en pozos con un revestimiento mayor a 4".
Bombas manuales	Se pueden utilizar en pozos de poco diámetro entre 1" y 2". Dentro de este rango están las bombas inerciales, que también se pueden operar con un motor que apliquen una acción de vaivén sobre la tubería.
Bombas operadas con aire o gas	En este rango están las bombas de vejiga, que se utilizan ampliamente tanto para purga como para muestreo de agua
Bombeo neumático	Es el bombeo mediante un compresor de aire, inyectando aire dentro del pozo, desalojando la muestra fuera del pozo. Es un método no apto para muestreo de volátiles, y produce bastante agitación dentro del pozo. Se utiliza con frecuencia para limpiar y purgar pozos de bombeo.
Bombeo por baldeo (achicadores-bailers)	Es un sistema manual, que consiste en un tubo de teflón con una válvula de pie en la parte baja del recipiente, la válvula está abierta cuando el bailer desciende y se cierra cuando empieza a ascender. Presenta problemas cuando el agua está turbia porque no permite un buen cierre de la válvula. En purga tienen la desventaja que evacuan poco volumen.
Muestreadores "ladrón" o cucharón	Son dispositivos que pueden ser bajados en un pozo a una profundidad específica. Los muestreadores dejan fluir el agua y se pueden sellar a una profundidad específica por medio de un mensajero mecánico o una trampa operada eléctricamente.

Fuente: AQUAVIVA SAS.2016.

Es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones especiales durante la purga del pozo:

- Si el pozo tiene un volumen de agua bajo, se debe purgar hasta que quede seco y posteriormente esperar entre 6 a 12 horas para recolectar la muestra.
- Los pozos utilizados (bombeados) de manera continua para suministro a la población o agricultura no necesitan ser purgados.
- Si el pozo tiene un volumen elevado de agua que no pueda ser evacuado con un vaciador descartable pequeño, se deben revisar los parámetros de calidad del agua mínimo cinco (5) veces. Si no cumple con los criterios de



Ambiente

estabilización, es necesario utilizar otro mecanismo de evacuación (Autoridad Nacional del Agua del Perú -ANA-, 2014).

- Si posterior a la purga de tres (3) volúmenes del pozo, los resultados de los parámetros medidos no se estabilizan, se puede hacer un purgado adicional. Se debe tener precaución de lavar con agua destilada o desionizada los medidos y sondas cada vez que se tome un volumen (Autoridad Nacional del Agua del Perú -ANA-, 2014).
- En el caso específico de que el pozo sean artesanales (nivel freático se encuentra a nivel de la superficie), o si las muestras tienen características artesanales (el agua subterránea se encuentra en constante afloramiento), no se necesita purgado (Autoridad Nacional del Agua del Perú -ANA-, 2014).
- Todo el desarrollo del proceso y eventos ocurridos durante la purga deben ser registrados en la cadena de custodia.

Teniendo en cuenta la eficiencia y economía, el programa de trabajo se debe diseñar de tal forma que provea los datos necesarios, maximizando el uso de los recursos disponibles.

Para lograr los objetivos en una forma costo efectiva, se debe hacer una delimitación inicial de las fuentes de contaminación antes del trabajo de campo y laboratorio. Se debe recolectar toda la información disponible sobre la geología subterránea, el flujo de agua subterránea, y la naturaleza, extensión y el tiempo en que se pudo producir la liberación de contaminantes, y así poder seleccionar los sitios de muestreo. Se deben determinar el tipo de datos, su calidad, y las tecnologías apropiadas de muestreo y de pruebas, para asegurar que la toma de datos cumpla no sólo con los requisitos de ingeniería, sino también con los requisitos reglamentarios del proyecto.

Como base para una estrategia de investigación del sitio, todos los problemas de contaminantes en el subsuelo se deben ver como dos zonas de contaminación: (1) contaminación de suelos (o roca) en la zona no saturada; y (2) líquidos de fase no acuosa (NAPLs) y / o aguas subterráneas que contienen contaminantes disueltos dentro de la zona de saturación. Estas dos zonas difieren significativamente en cuanto a sus mecanismos de transporte de contaminantes, y por lo tanto de las acciones correctivas requeridas, por lo que deben ser abordadas individualmente en el curso de la investigación del sitio hidrogeológico.

Características de la fuente en la zona no saturada.

La mayoría de los incidentes de liberación de sustancias químicas peligrosas al ambiente subsuperficial ocurren como derrames en la superficie de productos o desechos o filtración de lixiviados desde la base de vertederos de residuos, o depósitos de materiales. A medida que el frente húmedo percola a través de la zona no saturada de suelo (o roca), una parte significativa de la masa contaminante puede retenerse en la matriz de suelo no saturado, debido a los efectos de filtración, adsorción o retención por tensión capilar. Este suelo contaminado es una fuente secundaria de contaminación, que puede durar muchos años, liberando en forma continua contaminación hacia aguas pluviales que fluyen a través de la superficie del sitio o que percolan verticalmente a través de la zona no saturada hasta la tabla de agua.

Dependiendo del tamaño, las características geológicas de la zona no saturada como la fuente residual de la naturaleza y concentración de los contaminantes, la protección de los recursos de aguas superficiales y subterráneas se podría efectuar mediante la excavación completa y remoción de los suelos contaminados, o con el cubrimiento del sitio para minimizar el efecto de la lluvia o extracción de contaminantes por medio de ventilación o lavado in situ del suelo.

Para el diseño de las medidas correctivas apropiadas, la investigación del sitio hidrogeológico debe abarcar toda la extensión lateral y vertical de los contaminantes residuales en la zona no saturada y el potencial de liberación de contaminantes a los recursos hídricos locales.

Características de la pluma de afectación en el agua subterránea.

Los contaminantes disueltos contenidos en los lixiviados que llegan hasta la tabla de agua (ó zona saturada), penetran y se extienden lateralmente y verticalmente dentro del sistema natural del agua subterránea, de acuerdo a los gradientes locales de flujo. Los contaminantes líquidos en fase libre pueden estar sujetos a un "gradiente de densidad" adicional de los líquidos livianos de la fase no acuosa (LNAPL por su sigla en inglés, como la gasolina) flotando por encima de la zona de saturación y depositándose en las zonas más elevadas de los estratos. Por otra parte, los líquidos densos de la fase no acuosa (DNAPLs, por sus siglas en inglés) pueden percolar hacia abajo dentro de la zona saturada, llegando y extendiéndose sobre las unidades de confinamiento subyacentes. Cuando son



Ambiente

derrames estos son más a nivel superficial (Spill), y liberación más de filtración o lixiviación.

En todos los casos, los problemas de contaminación del agua subterránea (en la zona saturada) son problemas de fluidos. El contaminante entra en el sistema de aguas subterráneas como un fluido y por lo tanto se puede eliminar o controlar como un fluido. A diferencia de la contaminación dentro de la zona de suelo no saturado, la excavación y remoción del suelo o de la masa rocosa en la zona de contaminación del agua subterránea no es práctica ni necesaria. Por lo tanto, la investigación hidrogeológica del sitio debe proporcionar información definitiva sobre la extensión lateral y vertical real de los contaminantes disueltos y en fase libre en el agua subterránea, así como sobre los procesos hidráulicos que controlan la migración de los contaminantes.

- DESARROLLO DE UN PLAN DE TRABAJO PARA INVESTIGACIÓN DETALLADA DEL SITIO

De acuerdo a los numerales anteriores, en la práctica, la investigación hidrogeológica del sitio hidrogeológico procede en dos etapas:

1. Delimitar la fuente en la zona no saturada, con la masa de producto o productos químicos, y los suelos contaminados asociados dentro de la zona no saturada.
2. Determinar la presencia y extensión de la migración de contaminantes dentro del sistema de aguas subterráneas subyacentes.

Procedimientos para la Caracterización de la Zona No Saturada.

Los objetivos del estudio de caracterización de la fuente son:

- Localizar la zona de liberación de los contaminantes
- Identificar los contaminantes de interés (CDI)
- Determinar sus concentraciones
- Delimitar la material fuente, o la masa de suelo no saturada que puede actuar como fuente continua de contaminación al agua subterránea o superficial.

Para comenzar la delimitación, se debe obtener la información química disponible sobre la fuente sospechosa del derrame o de la liberación subterránea (lixiviación) de los contaminantes (por ejemplo, un desecho o un derrame de producto), y así tener una base para el diseño del programa de muestreo y análisis de laboratorio. Si dicha información no está disponible o es inadecuada,



Ambiente

se deben recolectar muestras de suelo en el sitio de liberación, y analizarse para identificar los contaminantes de interés. A continuación, se deben seleccionar los ensayos de campo, y los indicadores apropiados, con base en la prevalencia, la movilidad y la toxicidad de los contaminantes principales de interés.

En la etapa de la delimitación de la fuente, se lleva a cabo un programa de muestreo y ensayos de campo para definir la extensión aparente lateral y vertical de la contaminación dentro de la zona no saturada. En cada punto de muestreo de suelo, se deben realizar el muestreo y las pruebas de campo en forma continua en profundidad hasta que se encuentre suelo limpio o la zona saturada. Las pruebas de campo típicas para el caso de contaminación por hidrocarburos incluyen análisis de vapor orgánico y pruebas con indicadores colorimétricos.

Para confirmar la extensión aparente lateral y vertical de la contaminación observada, se deben analizar en laboratorio las muestras de los suelos "limpios" que se encuentran en cada punto de muestreo. También se deben analizar muestras representativas dentro de la zona de contaminación para determinar las concentraciones de contaminantes totales y lixiviados, con el fin de caracterizar la masa y la movilidad de los contaminantes de interés.

Procedimientos para la Delimitación de Plumas Contaminantes en Aguas Subterráneas.

El objetivo de una investigación de contaminación en el agua subterránea es determinar la presencia y la extensión tridimensional de los contaminantes disueltos o en fase libre, así como la velocidad y dirección de la contaminación en el sistema de flujo de agua subterránea.

Los principales pasos a seguir son:

- Identificación y caracterización de todas las zonas potenciales de contaminación de la zona de estudio.
- Programa de monitoreo para la detección de contaminantes, y la magnitud y dirección del flujo saturado, mediante la instalación de 1 a 3 puntos de muestreo de agua subterránea en cada sitio de fuente conocida o sospechosa (esto, para identificar todos los sitios de liberación de contaminantes de interés que pongan en riesgo las aguas subterráneas).

La extensión tridimensional de la pluma en la zona saturada debe llevarse a cabo en forma escalonada para minimizar el número de puntos de muestreo de agua subterránea de la siguiente forma:

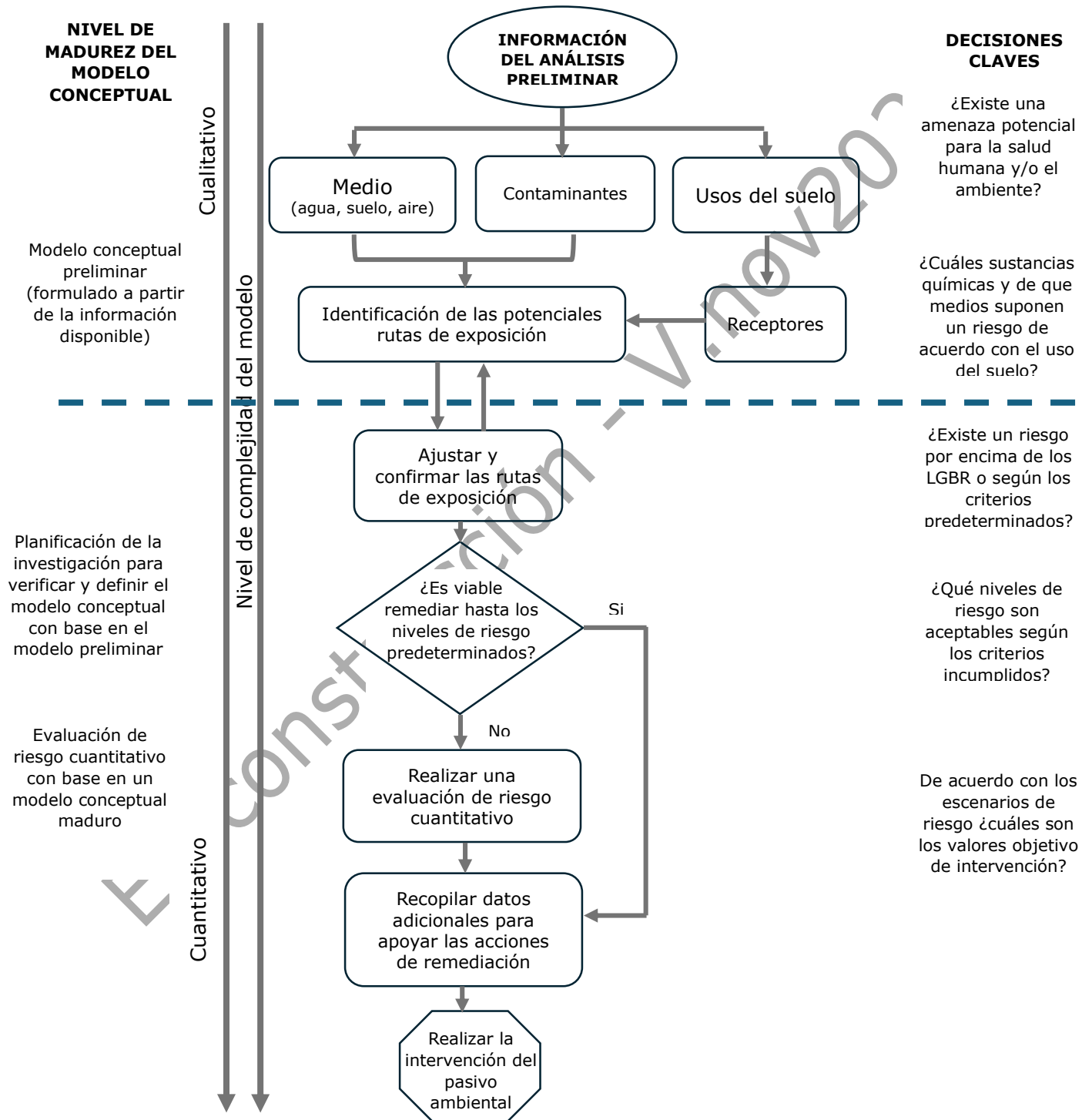


Ambiente

- 1.** Determinar la dirección principal de flujo, calculando la distancia (longitud) potencial con base en la edad o tiempo probable de la liberación, y en la velocidad de movimiento determinada durante el estudio de monitoreo de detección esta longitud potencial de la pluma contaminante se determina como $\text{longitud} = \text{velocidad de filtración} \times \text{tiempo}$. Se deben colocar puntos de muestreo a lo largo del eje de la pluma para localizar el gradiente real.
- 2.** Definir el ancho de la pluma contaminante mediante puntos adicionales de muestreo en 1 o 2 líneas en forma transversal al eje principal de la pluma.
- 3.** Determinar la migración vertical del contaminante, mediante muestreo de agua subterránea a diferentes profundidades.

Si se comprueba que la pluma contaminante se extiende a través del todo el espesor de la unidad superior que contiene agua, puede ser necesario muestrear y analizar el agua subterránea en el siguiente estrato del horizonte subyacente para establecer el límite vertical de la contaminación. En este caso hay que tener cuidado que cualquier punto de monitoreo que penetre la capa impermeable o semipermeable de confinamiento que separa los estratos superior e inferior de agua se complete de tal forma que no sea un conducto artificial para la migración de contaminantes (que no haya contaminación cruzada y no sea una fuente artificial de contaminación para el estrato inferior).

6.4.3 Modelo conceptual para evaluación de riesgo





Ambiente

6.4.3.1 Modelo conceptual de aguas subterráneas

Los procesos hidrogeológicos son por naturaleza complejos, debido a la heterogeneidad de las propiedades geológicas y los efectos transitorios de los fenómenos de recarga y descarga en un acuífero. Adicionalmente, se puede tener más complejidad, ya que los contaminantes generalmente están distribuidos de forma irregular en la matriz porosa y en el agua subterránea, además reaccionar con ellas. Por otra parte, la caracterización detallada del transporte de un contaminante en cada milímetro del acuífero es poco práctica. Desde una perspectiva ingenieril, el objetivo es, definir los procesos de contaminación subsuperficial hasta el nivel de detalle necesario para diseñar medidas eficaces de control, o revertir estos procesos, teniendo siempre en cuenta la protección a la salud humana y el ambiente.

La investigación hidrogeológica de un sitio, es el procedimiento mediante el cual se desarrolla un "modelo de trabajo" de la migración de la pluma contaminante dentro del régimen de flujo de agua subterránea. En todos los casos, este modelo del ambiente subsuperficial se construye a partir de tres componentes principales de la información:

- 1. Geología:** El componente físico dentro del cual los fluidos subsuperficiales llegan, se almacenan y fluyen.
- 2. Hidrología:** El movimiento de fluidos a través de este componente físico.
- 3. Química:** La naturaleza de los constituyentes químicos que se transportan en el sistema de flujo subsuperficial, y las interacciones químicas y físicas entre los contaminantes y la formación subsuperficial y las aguas subterráneas que están ocurriendo.

Con frecuencia, los dos primeros componentes físicos se integran en uno solo, denominado componente hidrogeológico.

Usualmente el modelo del sitio se construye incluyendo sistemáticamente cada uno de estos componentes:

- 1. Geología.** Se debe caracterizar el perfil estratigráfico debajo del sitio e identificar los estratos que sirven como posibles conductos para el flujo de fluidos y las características geológicas que pueden influir en el movimiento y la acumulación de líquidos de fase no acuosa (NAPLs).



Ambiente

- 2. Hidrología.** Se debe medir la distribución de la carga (cabeza) hidráulica dentro de la zona de saturación para determinar la velocidad real y la dirección del movimiento del agua subterránea a través de esta zona.
- 3. Química.** Se recolectan y analizan las muestras de agua para determinar la extensión lateral y vertical de la migración de la contaminación dentro del régimen de flujo de agua subterránea. También se toman muestras de suelo para determinar si la fuente es el suelo, como también para determinar los parámetros de adsorción en la fase sólida.

En la práctica se superpone la adquisición de datos para los tres componentes anteriores. Por ejemplo, se puede perforar un pozo para caracterizar la geología del sitio, que a su vez proporciona muestras de suelo para análisis de laboratorio de la concentración de contaminantes, y finalmente puede convertirse en un pozo de monitoreo para recoger muestras de agua subterránea y datos hidrológicos.

6.4.4 Evaluación de riesgo químico

6.4.4.1 Identificación del peligro y evaluación de toxicidad

Una vez definidos claramente los contaminantes de interés (los que representan riesgo para la salud humana y el ambiente), se hace necesario identificar su capacidad de generar efectos adversos en la salud humana y el ambiente para lo cual se requiere revisar información relacionada con la toxicidad aguda, subcrónica, crónica, reproductiva, del desarrollo, y genotóxica del respectivo contaminante.

El análisis de toxicidad se enfoca en la recopilación y revisión de las características toxicológicas de cada uno de los contaminantes, teniendo en cuenta información cualitativa relacionada con la identificación de los peligros, e información cuantitativa basada en relaciones dosis respuesta, las cuales examinan la relación existente entre la exposición y los efectos de interés.

Estas características son los indicadores que definen los contaminantes como agentes de riesgo para la salud humana y el ambiente, según los mecanismos de acción que manifiestan y, en particular, los que caracterizan la relación entre la dosis del contaminante recibido y la aparición de un efecto adverso en la población expuesta.

De manera general, cuando los receptores son humanos se consideran los siguientes aspectos:

- ✓ Vía por la cual penetra el contaminante (pulmonar, digestiva, dérmica), valores de referencia y efectos que se presentan.
- ✓ Dosis de referencia (DR) o concentraciones de referencia (CR) para sustancias con efectos sistémicos (depende del periodo sobre el que se promedia la exposición), y factores pendiente (FP) o unidades de riesgo de cáncer (UR) para sustancias con efectos cancerígenos para las vías de exposición oral, inhalación y dérmica, junto a otro tipo de información (órganos afectados, tipo de efecto, sinergias, periodo de exposición, etc.)

Esta información puede consultarse en diferentes fuentes, dentro de las que se recomiendan las referidas en la **Tabla 1**. En caso de existir discrepancia entre los datos aportados por varias fuentes de información, debe darse prioridad a las que se consideren más fiables, es decir, aquellas que presentan mayor cantidad de evidencias y estudios científicos. Al documentar la información toxicológica recopilada, deben incluirse las fuentes consultadas, valorándose el grado de fiabilidad e incertidumbre de los datos seleccionados.

Tabla 1: Fuentes de consulta de información toxicológica de contaminantes para la evaluación de riesgos sobre salud humana.

FUENTES DE CONSULTA DE INFORMACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Organización Mundial de la Salud (OMS): Programa Internacional sobre Seguridad Química (IPCS), Criterios de salud ambiental (EHC). http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_numerical/en/# • Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) de la OMS: Principal referencia a nivel mundial sobre el cáncer. Monografías del Programa de Evaluación de Riesgos Cancerígenos para la Salud Humana (IARC Monographs Programme on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans). http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php • Agencia de protección ambiental de EE.UU. (USEPA): Sistema integrado de información de riesgos - IRIS (Integrated Risk Information Service). Informes toxicológicos sobre gran cantidad de contaminantes. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/simple_list.cfm • Centro de Control de Enfermedades de EE.UU. Agencia para las sustancias tóxicas y el registro de enfermedades –ATSDR) Perfiles Toxicológicos (ATSDR Toxicological Profiles) http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/index.asp Minimal Risk Levels (MRLs) http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/index.html <p>Centro de la Ciencia del Riesgo – Departamento de Salud Ambiental – Universidad de Cincinnati http://med.uc.edu/eh/centers/rsc</p>

FUENTES DE CONSULTA DE INFORMACIÓN

- Agencia de protección ambiental de California
<http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/index.asp>

Fuente: AQUAVIVA SAS.

Para la evaluación de la toxicidad de los receptores ambientales se cuenta con diferentes parámetros eco toxicológicos significativos (NOAEL, LOAEL, LC50, LD50, etc.). En evaluaciones simplificadas de riesgos, el parámetro toxicológico que se suele utilizar para establecer la relación entre exposición y efectos sobre el receptor es la concentración prevista sin efecto (PNEC).

Es importante en esta etapa tener en cuenta las incertidumbres relacionadas con el método utilizado, para obtener los valores de los parámetros toxicológicos recopilados (variación intra e interespecies, periodo de muestreo, umbrales de detección, etc.). En todo caso, se deben indicar para cada contaminante significativo las fuentes de información de las que proceden los datos toxicológicos utilizados, valorando su fiabilidad. También es importante explicar los contaminantes y vías de exposición para los que no existen referencias toxicológicas mínimamente fiables. Ver **Tabla 2**.

Tabla 2: Fuentes de consulta de información ecotoxicológica de contaminantes para evaluación de riesgos en ecosistemas.

FUENTES DE CONSULTA DE INFORMACIÓN

- Agencia de protección ambiental de EE.UU. (USEPA): Ecotox. Base de datos ecotoxicológicos de acceso libre
<https://cfpub.epa.gov/ecotox/>
- Agencia de protección ambiental de EE.UU. (USEPA): Sistema integrado de información de riesgos - IRIS (Integrated Risk Information Service). Informes toxicológicos sobre gran cantidad de contaminantes
https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/simple_list.cfm

Canadian Council of Ministers of the Environment Canadian Environmental Quality Guidelines
<http://st-ts.ccme.ca/en/index.html>

Toxicological Benchmarks for Wildlife
Sample, BE, Opresko, D M y Suter II, G W (1996), *Toxicological Benchmarks for Wildlife: 1996 revision, ES/ER/TM-86/R3*, Risk Assessment Program, Health Sciences Research Division, Oak Ridge, Department of Energy, Office of Environmental Management, Estados Unidos de América.

Fuente: AQUAVIVA SAS.



Ambiente

6.4.4.2 Evaluación de la exposición

El análisis de las condiciones de exposición implica conocer claramente cuál es la fuente que emite el contaminante de interés, cual es el mecanismo de transporte, cuál es su punto de exposición y cuáles son las vías por las que se presenta la exposición. Por medio de esta evaluación, se busca medir o estimar la intensidad, frecuencia, ruta y duración del evento en el cual se presenta la exposición al contaminante de interés, expresándolo en términos de dosis del mismo a través de cada una de las vías de exposición. Esto va a permitir aproximarse al conocimiento estimado de la cantidad que efectivamente ingresa al organismo tras el contacto con la matriz ambiental potencialmente contaminada, a través de la ruta definida.

La evaluación de la exposición se soporta en una descripción detallada del entorno y de los hábitos de los potenciales receptores humanos (escenario humano) y del ambiente de flora y fauna. La evaluación de la exposición involucra la estimación de la intensidad de la exposición (basada en muestreo ambiental, modelación del destino y transporte, cálculo de dosis) y como varía de acuerdo al tiempo de exposición, grupos o rutas de exposición.

El proceso de elaboración del modelo conceptual ha permitido identificar las rutas y los respectivos receptores, por lo que el resto del proceso se soporta en la cuantificación en el medio de contacto y en el punto de exposición, con el fin de cuantificación de la exposición.

✓ Cuantificación de la exposición.

Para la cuantificación de la exposición en receptores humanos se dispone de métodos directos e indirectos. Los métodos directos se basan en el monitoreo personal y el uso de biomarcadores, sin embargo, su uso es limitado por costos, por lo cual los métodos indirectos son más frecuentemente utilizados. Estos últimos se soportan en mediciones y datos de monitoreo ambiental, así como en modelos que cuantifican el transporte de los agentes a través de las vías identificadas, obteniendo de esa manera un estimado de la exposición.

✓ Cuantificación en el medio de contacto y en el/los puntos/s de exposición

La medición del contaminante puede hacerse de forma directa en los puntos de exposición, o puede estimarse a partir de modelos.

La cuantificación analítica en los puntos de contacto ofrece un dato preciso y fiable, con un bajo grado de incertidumbre, sin embargo, solo refleja el momento de tiempo en el que fue tomado y no la evolución de la concentración en el tiempo, por lo cual, cuando la exposición se ha dado durante un periodo de

tiempo prolongado, se recomienda realizar el respectivo análisis por medio de modelos, incorporando las incertidumbres derivadas del mismo modelo.

La cuantificación específica de la exposición de cada receptor (humano y ambiental) se obtiene a partir de la medición de la concentración de los contaminantes de interés en los medios de contacto o mediante la determinación de la ingestión/dosis a las que está sometido el receptor a través de cada vía de exposición. En ambos casos un requisito previo es establecer en cada medio de contacto la concentración de cada contaminante que se considera representativo de las condiciones de exposición del receptor (concentraciones representativas de la exposición).

En escenarios específicos, en los que el nivel de riesgo a la salud humana sea elevado y se requiera documentar el real impacto que está presentando la población a raíz de la exposición a contaminantes químicos, se considera de gran utilidad poder ejecutar mediciones biológicas en la población, con el fin de valorar de forma objetiva el grado de exposición y el impacto que pueda estar presentando la población.

Así mismo se requiere conocer los factores que determinan la exposición y que se comportan como variables para el cálculo de la misma. En la **Tabla 3**, se presentan los principales factores relacionados.

Tabla 3: Factores determinantes de la exposición.

ASPECTO	FACTOR
Contaminante en el medio de interés	Concentración
	Propiedades físico - químicas
	Biodisponibilidad
Receptor humano	Peso
	Superficie corporal
	Tasa ingestión
	Tasa de inhalación
Escenario	Frecuencia exposición
	Duración exposición

Fuente: AQUAVIVA SAS.

Conforme a lo anterior, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor obtenido debe reflejar la media de las concentraciones que se van a dar durante todo el periodo de exposición considerado. La concentración media permite una mejor estimación del riesgo asociado con exposiciones crónicas, ya que el valor medio se aproxima a la estimación más probable de



Ambiente

la concentración a la que un receptor estaría expuesto durante un plazo prolongado.

- Por su parte la concentración máxima es mejor para la estimación del riesgo asociado a exposiciones agudas o subcrónicas; su uso puede proporcionar además una estimación útil del límite superior del riesgo potencial.
- En la evaluación de exposiciones crónicas, siempre hay que tener en cuenta la persistencia (o capacidad de degradación) del contaminante en el medio en cuestión.
- Para contaminantes persistentes es razonable derivar la concentración representativa de la exposición a partir de las concentraciones existentes en la situación actual.
- Un enfoque razonablemente conservador y habitual es utilizar como valor representativo de la concentración de cada contaminante un percentil estadístico (normalmente el percentil debe ser entre 90 o 95) de los valores detectados en el medio de contacto, estableciendo matices en función de la vía y del punto de exposición concretos.
- Cuando la cantidad de mediciones no permite calcular percentiles, una alternativa es utilizar las concentraciones máximas y las concentraciones medias de forma que se obtenga un rango de riesgo potencial.

El cálculo general de la exposición se realizará por medio de diferentes fórmulas y sus respectivos factores de cálculo de acuerdo a las diferentes vías potencialmente involucradas (ingestión, inhalación, contacto dérmico). Este proceso idealmente debe ser efectuado por profesionales con experiencia en el análisis de riesgos, quienes de acuerdo a la disponibilidad de información, determinarán cuál es la mejor fórmula para calcularla, considerando los valores de referencia disponibles y los respectivos factores de exposición.

No se debe perder de vista que las características biológicas y fisiológicas de las poblaciones de cada región, sus hábitos y comportamientos pueden variar significativamente, por lo que se recomienda utilizar para los factores de exposición, datos de fuentes regionales o nacionales. De no estar disponibles, se recomienda utilizar datos de literatura internacional, dentro de los cuales, la principal referencia es el "Exposure Factors Handbook", publicado por la EPA en 2011. Así mismo, a continuación, se relacionan las expresiones matemáticas que pueden ser aplicada para la cuantificación de la exposición considerando las diferentes vías.

Ingestión

Ingesta Media Diaria

Formula genérica para el cálculo de la ingesta media diaria de determinado contaminante a través de determinada vía.

$$I = \frac{C \times TC}{P} \times \frac{T_E}{P_E}$$

ELEMENTO	DEFINICIÓN			
I = Ingesta media diaria	Cantidad de contaminante a la que se ve expuesto un receptor a través de una vía de exposición concreta promediada sobre un periodo de exposición determinado y normalizada por el peso corporal del receptor			
C = Concentración representativa de la exposición	Cantidad de contaminante en el medio de contacto (suelo, agua, aire, alimentos) que mejor representa la situación media de exposición durante el periodo evaluado			
TC = Tasa de contacto	Cantidad del medio contaminado (suelo, agua, aire, alimentos) que entra en contacto con el receptor en la unidad de tiempo a la que se refiere la ingesta (un día en el caso de la ingesta media diaria).			
P = Peso corporal del receptor	Peso en kg			
TE = Tiempo de exposición.	Suma de las duraciones de cada uno de los episodios en los que el receptor está efectivamente en contacto con los contaminantes a lo largo del periodo de exposición			
PE = Periodo de exposición.	Duración total del intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición			
	Contaminante Carcinógeno			
	Contaminante sistémico			
	Efecto agudo	Efecto subcrónico	Efecto crónico	
	70 años	Variable (horas)	7 años (Valor máximo)	30 años (adultos) 6 años (niños)

Ingesta de suelo

Cálculo de la ingesta media diaria asociada a la ingestión accidental (o voluntaria, en el caso de los hábitos de pica infantil) de suelo o polvo contaminado.

$$I = 10^{-5} \times \frac{C \times TI_S}{P} \times \frac{T_E}{P_E}$$

I_s = Ingesta media diaria de contaminante debido a ingestión de suelo o polvo contaminado (mg/kg·día).

C_s = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg).

TI_s = Tasa de ingestión de suelo o polvo contaminado (mg/día).

P = Peso corporal (kg).

TE = Tiempo de exposición (día).

PE = Periodo de exposición (día).

Ingestión de alimentos contaminados

Cálculo de la ingesta de cada contaminante a través de un alimento.

$$I_{al} = \frac{C_{al} \times F_{al} \times TI_{al}}{P} \times \frac{TE}{PE}$$

I_{al} = Ingesta media diaria de contaminante debido a consumo de un alimento contaminado (mg/kg·día).

C_{al} = Concentración del contaminante en el alimento (mg/kg).

F_{al} = Fracción contaminada sobre el total de alimentos consumidos del mismo tipo (adimensional).

TI_{al} = Tasa de ingestión del alimento (kg/día).

P = Peso corporal (kg).

TE = Tiempo de exposición (año).

PE = Periodo de exposición (año).

Ingestión de agua contaminada

Cálculo de la ingestión de agua contaminada.

$$I_w = \frac{C_w \times TI_w}{P} \times \frac{TE}{PE}$$

I_w = Ingesta media diaria de contaminante debido a ingestión de agua contaminada (mg/kg·día).

C_w = Concentración del contaminante en el agua (mg/l).

TI_w = Tasa de ingestión de agua contaminada (l/día).

P = Peso corporal (kg).

TE = Tiempo de exposición (día).

PE = Periodo de exposición (día).

Observación: La ingestión de agua contaminada puede ocurrir básicamente en tres circunstancias: por consumo de agua de bebida, por ingestión durante el baño/ducha y por ingestión durante el baño recreativo (aguas superficiales). En



Ambiente

cada caso, los medios de contacto son diferentes, debiendo adaptarse los valores de la concentración, tasa de ingestión y tiempo de exposición para que sean coherentes con el medio y situación que se está valorando.

Inhalación

Para estos cálculos la tasa de inhalación debe determinarse en función del tipo de actividad desarrollada por cada receptor en cada escenario de análisis.

Inhalación de partículas

Cálculo de exposición asociado a la inhalación de partículas de suelo o polvo contaminado.

$$I_p = 24 \times 10^8 \times \frac{C_{pa} \times F_{10} \times C_{10} \times TI_a}{P} \times \frac{TE}{PE}$$

I_p = Ingesta media diaria de contaminante debido a inhalación de partículas en el aire (mg/kg·día).

C_{pa} = Concentración de partículas en el aire (mg/Nm³).

F_{10} = Fracción de partículas respirables (< 10 µm; adimensional).

C_{10} = Concentración del contaminante en las partículas respirables (mg/kg).

TI_a = Tasa de inhalación de aire (Nm³/h).

P = Peso corporal (kg).

TE = Tiempo de exposición (día).

PE = Periodo de exposición (día).

Inhalación de vapores

Cálculo de la exposición asociado a la inhalación de contaminantes en fase de gaseosa.

$$I_v = 24 \times \frac{C_a \times TI_a}{P} \times \frac{TE}{PE}$$

I_v = Ingesta media diaria de contaminante debido a inhalación de vapores o gases del aire (mg/kg·día).

C_a = Concentración del contaminante en el aire (mg/Nm³).

TI_a = Tasa de inhalación de aire (Nm³/h).

P = Peso corporal (kg).

TE = Tiempo de exposición (día).

PE = Periodo de exposición (día).

Contacto dérmico

Contacto dérmico con suelo

Cálculo para estimar la dosis absorbida por contacto dérmico con suelo contaminado

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{C_s \times S_c \times AD \times ABS}{P} \times \frac{T_E}{P_E}$$

I_{ds} = Dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con polvo o suelo contaminado (mg/kg·día).

C_s = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg).

S_c = Superficie corporal expuesta (cm²/día).

AD = Factor de adherencia suelo-piel (mg/cm²).

ABS = Factor de absorción dérmica (adimensional).

P = Peso corporal (kg).

T_E = Tiempo de exposición (día).

P_E = Periodo de exposición (día).

Contacto dérmico con agua

Cálculo para estimar la dosis absorbida a través de la piel por contacto con agua contaminada

$$I_{dw} = 2.4 \times 10^{-2} \times \frac{C_w \times S_c \times K_p}{P} \times \frac{T_E}{P_E}$$

I_{dw} = Dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con agua contaminada (mg/kg·día).

C_w = Concentración del contaminante en el agua (mg/l).

S_c = Superficie corporal expuesta (cm²).

K_p = Constante de permeabilidad dérmica del contaminante (cm/hora).

P = Peso corporal (kg).

T_E = Tiempo de exposición (día).

P_E = Periodo de exposición (día).

Factores de exposición sugeridos para adultos*

PARÁMETRO	VALOR SUGERIDO	UNIDADES	OBSERVACIÓN
Parámetros anatómicos y fisiológicos			
Peso corporal	70	kg	Promedio de vida – Hombre y Mujer combinado
Talla	166	cm	Hombre y mujer combinado
Exposición dérmica			
Área total de superficie dérmica	1.7966	m ²	Hombre y mujer combinado

PARÁMETRO	VALOR SUGERIDO	UNIDADES	OBSERVACIÓN
Área expuesta de superficie dérmica	0.600	m ²	Hombre y mujer combinado
Parámetros de exposición oral			
Ingesta de agua	1.2	L/día	Hombre y mujer combinado
Ingesta de alimento	1400	g /día	Hombre y mujer combinado
Ingesta de suelo	50	mg/día	Hombre y mujer combinado
Parámetros de exposición inhalatoria			
Inhalación (para exposiciones de largo termino)	15	m ³ /día	Hombre y mujer combinado

* Los parámetros propuestos corresponden a los sugeridos por la Guía Australiana para evaluación de riesgos a la salud humana por peligros ambientales. Los valores sugeridos son estimaciones propuestas para cálculos generales, sin embargo, estos pueden ser ajustados si se dispone de la respectiva información.

6.4.4.3 Caracterización del riesgo para humanos

El nivel de riesgo estimado en cualquier tipo de evaluación puede ser descrito como cualitativo (categoría baja, media, alta) o cuantitativo (con una estimación numérica). Para este se propone establecer un criterio de tipo cuantitativo.

El resultado final de evaluación obtenida en la evaluación de riesgos a la salud es la caracterización del riesgo, la cual se encarga de integrar los resultados del análisis de la toxicidad y del análisis de la exposición, para cuantificar y evaluar el nivel de riesgo. En resumen, el riesgo obtenido es el producto de la toxicidad por la exposición. Esto significa que el riesgo a la salud de las personas o receptores, derivado de la exposición a contaminantes presentes en las fuentes de contaminación, depende tanto de la toxicidad de los contaminantes presentes como de la probabilidad de que las personas y demás receptores entren en contacto con ellos. Para esto, se integran los resultados de las fases anteriores para calcular los valores de riesgo (para el caso de salud humana, los correspondientes a la exposición por diferentes vías) y se comparan éstos con los criterios de aceptabilidad establecidos para el caso.

Como los estudios de toxicidad realizados para la estimación de los valores de referencia son efectuados en animales, se requiere utilizar un factor de incertidumbre que explique las posibles diferencias que se presentan entre los



Ambiente

modelos animales y la realidad humana, el cual brinde un margen de seguridad para la protección de los humanos.

Si no se cuenta con valores de referencia, la caracterización es de tipo cualitativa. De manera general, la caracterización de riesgo está enfocada en responder las siguientes preguntas:

- ¿Se identificó un riesgo para la población humana?
- ¿Los contaminantes están biodisponibles?
- ¿Existe alguna evidencia de toxicidad?
- ¿Hay en el sitio poblaciones de alto riesgo?
- ¿Se detectaron factores que aumentan la exposición de la población a los contaminantes?
- ¿Existen factores que pudieran incrementar la toxicidad de los químicos presentes en el sitio (por ejemplo, desnutrición)?
- ¿Las muestras ambientales y los análisis de laboratorio son confiables?
- ¿En la literatura existen antecedentes como los encontrados en el sitio estudiado?
- ¿El daño es reversible?
- ¿Cuál es la magnitud del riesgo encontrado?
- ¿El riesgo puede incrementarse si no se toman medidas correctivas?
- ¿En caso de no intervenir, el riesgo originado por la afectación puede incrementarse o puede extenderse?
- ¿Qué otras medidas de control y aseguramiento pueden tomarse para evitar o reducir la exposición?
- ¿Existe alguna acción que la comunidad pueda tomar para disminuir el riesgo?

De manera general, y cuando se cuenta con valores de referencia, la caracterización se realiza calculando el índice de riesgo total asociado a cada contaminante de interés considerando los diferentes medios, rutas y vías de exposición definidas en el modelo conceptual. Posteriormente se calcula la suma de los riesgos individuales por todas las rutas y vías de exposición y finalmente se determina el riesgo total de todos los contaminantes de interés seleccionados como la suma de los riesgos totales de cada contaminante de interés seleccionado.

Riesgo Total (RT) = Riesgo INGESTIÓN + Riesgo INHALACIÓN + Riesgo DÉRMICO

Dónde:

Riesgo ING = Riesgo por ingestión de suelo o agua (subterránea/superficial)



Ambiente

Riesgo INH = Riesgo por Inhalación de suelo, polvo o sustancias volátiles
Riesgo DER = Riesgo por contacto dermal

Para valorar los niveles de riesgo que representan los índices calculados, deben establecerse previamente los criterios de aceptabilidad del riesgo, es decir, aquellos rangos dentro de los cuales el riesgo es admisible en unas determinadas circunstancias, así como los umbrales a partir de los cuales puede hablarse de una situación de riesgo inaceptable. La caracterización del riesgo debe de calcularse para efectos cancerígenos y para efectos no cancerígenos. En ambos casos, se calcula el riesgo individual para los diferentes grupos poblacionales expuestos (por ej. niños, adultos), considerando los diferentes escenarios relevantes de exposición. Ver **Tabla 7**.

Tabla 4: Criterios de aceptabilidad de riesgo para la salud humana de acuerdo al tipo de contaminante.

Criterio de aceptabilidad del riesgo	Contaminante con efecto carcinogénico	Contaminante con efecto no carcinogénico
Riesgo Aceptable	$RT \leq 10^{-5}$	$IRT \leq 1$
Riesgo No Aceptable	$RT > 10^{-5}$	$IRT > 1$

Fuente: Adaptado de Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Comunidad de Madrid.2004.

6.4.4.4 Caracterización del riesgo no carcinogénico

Cuando se trata de contaminantes no carcinogénicos, se espera identificar el valor de exposición documentado en la población o individuo en estudio y compararlo con la concentración de referencia a la cual no se presentan efectos, con el fin de contar con un criterio de caracterización del riesgo. Para tal fin se utiliza la siguiente formula:

$$IR = DE_1 / DR$$

IR: Índice de riesgo (sin unidad)

DE: Dosis de Exposición (mg/kg*día) - INGESTA

DR: Dosis de Referencia (mg/kg*día)

Un índice de riesgo inferior a 1 representa generalmente un riesgo aceptable, mientras que un índice superior a 1 se considera preocupante por tratarse de una exposición elevada que puede representar un riesgo. En casos donde el índice de riesgo supera el valor de 10, el riesgo es considerado muy elevado y

se debe tomar acciones correctivas inmediatas para proteger a la población y a receptores ambientales. Posteriormente, se calcula el índice de riesgo total, sumando los índices de riesgo de las diferentes vías, de acuerdo a lo planteado en la **Tabla 5**. Se considera un riesgo aceptable cuando dicho valor es < 1 .

Tabla 5: Cuantificación del riesgo para contaminantes no carcinogénicos.

VÍA	CONTAMINANTE DE INTERÉS	INGESTA	DOSIS REFERENCIA	ÍNDICE DE RIESGO INDIVIDUAL	ÍNDICE DE RIESGO INTEGRADO POR VÍA	ÍNDICE INTEGRADO DEL ESCENARIO
Vía 1	A B C	I_{A1} I_{B1} I_{C1}	DR_{A1} DR_{B1} DR_{C1}	$IR_{A1} = I_{A1} / DR_{A1}$ $IR_{B1} = I_{B1} / DR_{B1}$ $IR_{C1} = I_{C1} / DR_{C1}$	$IR_1^T = IR_{A1} + IR_{B1} + IR_{C1}$	$IR^T = IR_1^T + IR_2^T$
Vía 2	B	I_{B2}	DR_{B2}	$IR_{B2} = I_{B2} / DR_{B2}$	$IR_2^T = IR_{B2}$	

Fuente: Adaptado de Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Comunidad de Madrid. 2004.

Cuando en el área de influencia exista posibilidad de afectación originada por agentes microbiológicos, se deberán evaluar los componentes ambientales susceptibles de presentar contaminación, específicamente agua para consumo humano, con el fin de conocer la carga bacteriana de la misma. De acuerdo al escenario que se identifique, debe indagarse si la población del área de influencia se encuentra en riesgo de exposición a cuerpos de agua contaminados con descargas biológicas provenientes de asentamientos humanos o aguas residuales de campos agrícolas o pecuarios; de ser así, deben tomarse muestras y efectuar mediciones microbiológicas para estimar el riesgo.

6.4.4.5 Caracterización del riesgo carcinogénico

Para la caracterización del riesgo para contaminantes con potencial de carcinogénesis, el desarrollo de modelos matemáticos a partir de datos experimentales, sigue siendo la metodología más usada para la identificación de la relación dosis – respuesta. A partir de dichos modelos se obtienen los valores del Factor de Pendiente de Cáncer (FPC) y el Factor de Riesgo Unitario (FRU), utilizados para caracterizar la relación dosis-respuesta.

El FPC hace referencia al límite superior del intervalo de confianza de 95% de una estimación de la probabilidad de respuesta, por unidad de exposición, durante todo el periodo de vida y cuantifica el incremento de probabilidad de desarrollar cáncer como resultado de la exposición a una sustancia; se expresa en las unidades $1/(mg/kg/d)$.

Por su parte el índice de riesgo para sustancias con efectos carcinogénicos expresa una estimación del incremento de la probabilidad de desarrollar cáncer como resultado de una exposición a una sustancia a través de una determinada

vía. La cuantificación del índice de riesgo asociado a una vía y contaminante se expresa a través de la siguiente formula:

$$R_{ij} = I_{ij} \times FP_{ij}$$

R_{ij} = Índice de riesgo cancerígeno resultante de la exposición al contaminante (i) a través de la vía (j).

I_{ij} = Ingesta media diaria del contaminante (i) a través de la vía (j) promediada para 70 años de exposición (mg/kg·día).

FP_{ij} = Factor pendiente para el contaminante (i) y vía (j) (mg/kg·día)

La estimación del riesgo cancerígeno de cada Contaminante de Preocupación (i) se realizará para todas las rutas de exposición completas y potenciales, de ser consideradas probables, en los que se encuentre dicho contaminante y para todas las vías de exposición. Todos los riesgos cancerígenos individuales estimados serán sumados en lo que se denominará Índice de Riesgo Total (R_T), como lo plantea la **Tabla 6**.

Tabla 6: Cuantificación del riesgo para contaminantes carcinogénicos.

VÍA	CONTAMINANTE DE INTERÉS	INGESTA	FACTOR PENDIENTE	ÍNDICE DE RIESGO INDIVIDUAL	ÍNDICE DE RIESGO INTEGRADO POR VÍA	ÍNDICE INTEGRADO DEL ESCENARIO
Vía 1	A	I_{A1}	FP_{A1}	$R_{A1} = I_{A1} \times FP_{A1}$	$R_1^T = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}$	$R^T = R_1^T + R_2^T$
	B	I_{B1}	FP_{B1}	$R_{B1} = I_{B1} \times FP_{B1}$		
	C	I_{C1}	FP_{C1}	$R_{C1} = I_{C1} \times FP_{C1}$		
Vía 2	B	I_{B2}	FP_{B2}	$R_{B2} = I_{B2} \times FP_{B2}$	$R_2^T = R_{B2}$	

Fuente: Adaptado de Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Comunidad de Madrid. 2004.

Para la caracterización del riesgo cancerígeno se debe tener en cuenta el riesgo basal de cáncer (aquel atribuible a diferentes causas acumulativas indeterminadas) y el riesgo extra de cáncer de por vida (RECV), el cual es el límite superior de la probabilidad de que una persona contraiga cáncer (ya sea tratable o letal) durante su vida entera, entre todas las personas expuestas de por vida a una concentración promedia del contaminante y por encima de la probabilidad basal normal de contraer cáncer. Se considera que un RECV de uno en un millón ($1:1.000.000 = 1E-6 = 1 \times 10^{-6}$) o menos, corresponde a estar por debajo de un nivel de riesgo significativo, y un nivel de RECV de uno en diez mil ($1:10.000 = 1E-04 = 1 \times 10^{-4}$) o más es en general considerado un riesgo inaceptable.



Ambiente

6.4.4.6 Caracterización del riesgo ambiental

La caracterización del riesgo ambiental es la determinación de la probabilidad de que un sistema sufra un efecto adverso. La metodología aplicada a este proceso es similar a la utilizada para la evaluación de riesgos a la salud humana. Los componentes más importantes de la evaluación de riesgos son las estimaciones del peligro para los componentes ecológicos en función de la exposición a una o varias sustancias identificadas y la probabilidad de que esa exposición ocurra.

Análisis de la exposición.

La caracterización de la exposición es una determinación directa del rango de la concentración en el ambiente o, si está disponible, de la dosis efectiva que recibe la biota, de un factor contaminante en particular. La finalidad del análisis de la exposición es cuantificar la presencia del contaminante de interés en el ecosistema; aunque no siempre se cuenta con la medición, ni se pueden documentar los efectos. El procedimiento más empleado para determinar la exposición es la química analítica, donde se obtienen las concentraciones en los sustratos y los medios y también en los componentes biológicos del ecosistema.

Una vez identificada la exposición, es necesario calcular la exposición de los componentes bióticos de interés al contaminante y también estimar las dosis de exposición y concentraciones probables.

Caracterización de los efectos ambientales.

La caracterización de los efectos ambientales es la etapa más importante del proceso de evaluación de riesgos ambientales. Para tal fin es importante conocer las relaciones entre la dosis o concentración y la respuesta a la toxicidad, en una situación en particular para determinada especie; esta información puede ser determinada con exactitud en ciertas condiciones de laboratorio. Esta información puede ser revisada en las fuentes recomendadas.

La evaluación de los datos de toxicidad básicos depende de su calidad, del número de réplicas, de la pertinencia de los efectos biológicos seleccionados (estudios de toxicidad realizados previamente que permiten identificar los respectivos efectos de acuerdo a la dosis. Esta es información debe ser consultada de acuerdo al contaminante) y del realismo del estudio en comparación con el ecosistema para el cual se está preparando la evaluación de riesgos. Para desarrollar esta etapa es necesario realizar un muestreo y análisis para los receptores ambientales encontrados en el sitio o área de sospecha.

Caracterización de los riesgos ambientales.

La caracterización del riesgo es la etapa final del proceso de evaluación de riesgos. Este componente comprende la estimación del riesgo y su descripción. El proceso general consiste en una correlación del efecto ambiental identificado, con la concentración ambiental documentada, para determinar las probabilidades de que se produzcan efectos de afectación al ambiente. No necesariamente hay afectación siempre. Si no hay efecto significativo o la concentración es baja, la probabilidad de efecto se reduce.

Para realizar la comparación de los contaminantes de interés ambientales obtenidos con los límites genéricos basados en riesgos (LGBR), existen varias fuentes de referencia que pueden consultarse a nivel nacional e internacional, dentro de las que se recomiendan algunas referidas en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Fuentes de consulta de información toxicológica de contaminantes para la evaluación de riesgos ambientales

FUENTES DE CONSULTA DE INFORMACIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Guía de selección de alternativas químicas Consejo nacional de investigación la academia nacional prensa Washington DC. Pág. 84. https://www.nap.edu/read/18872/chapter/9• Lista de chequeo para clasificar receptores sensibles ecológicos y guía para la ejecución de un análisis de riesgos ecológico. Diciembre 2007. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. Bogotá-Colombia.

6.4.4.7 Evaluación del riesgo por niveles

Actualmente, la mayoría de los análisis detallados (cuantitativos) de riesgos por contaminación química de sitios, bien sea que haya una contaminación probada, o pueda existir un potencial de contaminación, se hace por niveles (escalones o etapas). La razón para hacer un análisis por etapas es no invertir en recursos técnicos y financieros si no hay sospecha de contaminación, e ir aumentando en detalle e información y recursos si un sitio específico bajo una contaminación determinada así lo justifica, teniendo en cuenta siempre la protección a la salud humana y/o el medio ambiente.

Después de caracterizar el riesgo se debe establecer un plan de muestreo diseñado con la finalidad de confirmar las hipótesis relacionadas en el análisis de riesgos y comenzar una evaluación detallada del sitio. Esta evaluación se basa en niveles de riesgos, donde se establecen las concentraciones de contaminantes por debajo de las cuales, se considera que existe un riesgo aceptable, para un

receptor expuesto a la contaminación. En el presente documento se denominan Límites Genéricos Basados en Riesgos (LGBRs).

En caso de que el contaminante presente concentraciones por encima de los Límites Genéricos Basados en Riesgo, se considera que el nivel de riesgo es inaceptable para este sitio. Por lo tanto, se deberá llevar a cabo una intervención del lugar o un estudio a nivel detallado, para pasar de un nivel genérico de evaluación a uno específico.

Para los componentes de aire y agua superficial existe normatividad nacional que cuenta con niveles máximos permisibles. En caso de requerir un muestreo y realizar la comparación de los resultados de las muestras analizadas en el laboratorio, se debe utilizar la normatividad vigente aplicable para el país.

NIVEL 1: LÍMITES GENÉRICOS BASADOS EN RIESGO (LGBR)

El nivel 1 de evaluación, tiene en cuenta los planteamientos en donde se aplican modelos genéricos y conservativos, bajo condiciones muy generales del sitio, sin tener las condiciones específicas. También aplican tablas genéricas desarrolladas por diferentes organismos (WHO, Dutch VROM, US EPA, UK DETR, Australian IP, etc.). Los criterios genéricos derivados para el Nivel 1 son muy conservativos, se usan para minimizar el nivel de análisis técnico e investigaciones intrusivas y no intrusivas. Finalmente, si el sitio satisface con los valores LGBR de los contaminantes de Interés CDI, se debe efectuar un monitoreo de cumplimiento y/o no efectuar ninguna intervención.

Si existen áreas que superan los LGBRs, se debe realizar un estudio de medidas de intervención en estas áreas, o seguir con un Nivel 2 de investigación.

El estudio de estas medidas debe responder las siguientes preguntas:

- ¿Es técnicamente medible, bajo estudios similares o experiencias similares, reducir los niveles de contaminación del área por debajo de los LGBRs?
- ¿Qué posibilidad existe que la intervención genere problemas secundarios a la salud o el ambiente?
- Se debe asegurar que si se utiliza una técnica de degradación, no se formaran productos secundarios que pueden ser más tóxicos que los originales.
- ¿Cuál es el costo aproximado de la estrategia de intervención?
- ¿Existe la posibilidad de implementar controles de ingeniería y/o monitoreo de atenuación natural?



Ambiente

Si no se encuentra una respuesta satisfactoria a estas preguntas, o no es posible efectuar una estrategia de intervención que tenga en cuenta los grupos de interés, en ese caso se recomienda realizar un análisis más específico, es decir llevar acabo el Nivel 2 de investigación.

NIVEL 2: CONCENTRACIONES CALCULADAS ESPECÍFICAS PARA EL SITIO (CCES Nivel 2)

Este nivel tiene como objetivo modificar los Límites Genéricos Basados en Riesgos (LGBRs o los límites máximos permisibles establecidos por normatividad, que hacen parte del Nivel 1. La modificación de los Límites Genéricos Basados en Riesgos, es posible debido a que las concentraciones de contaminantes calculadas en el Nivel 1, se realizan bajo un escenario genérico de análisis de riesgos para los casos con los impactos más graves posibles y que afectan a un receptor de interés. Al Nivel 1 se le denomina un desarrollo de límites conservador y como tal es posible que los límites de referencia en este nivel sean muy bajos, para el escenario real de riesgo que un sitio específico puede representar.

Es debido a lo anterior, que en este documento se presenta la posibilidad de llevar a cabo un estudio de mayor profundidad donde se calculan Concentraciones Específicas de Sitio (CCESs) utilizando información específica del área de estudio, y no información genérica lo suficientemente conservadora para todos los casos de contaminación posible.

Para el nivel 2 de evaluación de riesgos se requieren datos específicos del sitio, y o puntos adicionales de exposición y de cumplimiento de un receptor (por ejemplo, en un pozo de abastecimiento, o en el límite con una vecindad). Esta información se utiliza para generar las concentraciones calculadas específicas para el sitio (CCES), y así comparar con los contaminantes de interés (CDI) en el mismo sitio. Generalmente se requiere mayor investigación en el sitio, para soportar el análisis específico en el sitio, es decir, mejorar el Modelo Conceptual, sin embargo, el esfuerzo incremental para pasar de un nivel 1 a un nivel 2, no debe ser muy alto. El análisis se debe enfocar en la fuente, las rutas de exposición, y los receptores que no se tuvieron en cuenta en el nivel 1 (por ejemplo, si el medio de transporte es el agua subterránea conocer el tipo de suelo, porosidad, direcciones de flujo, etc.).

Los objetivos principales de utilizar un nivel de investigación intermedio, en este caso denominado Nivel 2, para la investigación detallada de riesgos a la salud humana y el ambiente son los siguientes:



Ambiente

- Disminuir el total de número de áreas de exposición que sobrepasan los límites de referencia utilizados, y por lo tanto, disminuir los costos de intervención justificándolo mediante el uso de variables específicas e sitio, para calcular CCEs que reemplacen las LGBRs del análisis nivel 1.
- Disminuir el tamaño de una posible pluma de contaminación con la finalidad de reducir los volúmenes de suelo contaminado que requieren remediación.
- Identificar áreas o zonas puntuales de intervención prioritaria.

En los casos en que el primer nivel de investigación muestre áreas con un alto nivel de variabilidad en las muestras (p.e. > 15%), se recomienda reducir el tamaño de las áreas de investigación al ejecutar el Nivel 2. Es decir, se puede aumentar la resolución del muestreo, por ejemplo, pasando de asignar una concentración promedio a un área de 1000 metros cuadrados, a cuatro concentraciones promedio diferentes por cada área de 250 metros cuadrados.

De acuerdo a lo anterior se debe contar con lo siguiente:

- Plan de muestreo detallado para Nivel 2 de investigación.
- Plan de cálculo de las concentraciones resultantes del muestreo detallado.
- Verificación junto con la autoridad competente del uso de modelos y variables de entrada detalladas al modelo. Tanto los modelos a utilizar, como las variables medibles de cambio.

Hay varios modelos más específicos de transporte de contaminantes en medios porosos saturados y no saturados para un sitio específico, pero a su vez siendo genéricos y conservativos.

NIVEL 3: CONCENTRACIONES CALCULADAS ESPECÍFICAS PARA EL SITIO (CCEs Nivel 3)

Los primeros dos niveles del procedimiento escalonado para desarrollar concentraciones de referencia en suelos a nivel genérico y detallado, permiten llevar a cabo una toma de decisiones eficiente en costo, respecto al estado ambiental de un área y el nivel de las afectaciones tanto en suelos como en aguas subterráneas que esta tiene.

Los niveles de referencia acá denominados Límites Genéricos Basados en Riesgos (LGBRs), son niveles que se consideran conservadores, en el sentido que su uso en un escenario determinado hace que se utilice una conclusión basada en un nivel del riesgo.



Ambiente

En la estrategia escalonada de análisis de riesgos, tanto el Nivel 1 como el Nivel 2, mantienen cierto nivel conservador. El uso de estos niveles conservadores facilita llevar a cabo una evaluación del sitio de manera acelerada. En cambio en la evaluación de riesgos nivel 3 se requiere más información para un análisis muy detallado, utilizando modelos sofisticados de transporte de contaminantes, y en ocasiones evaluaciones probabilísticas y de incertidumbre.

Generalmente muy pocos sitios requieren de un análisis de riesgo Nivel 3, y solamente justifica efectuarlo cuando los costos de intervención son muy altos o el sitio tiene unas características muy complejas.

Para llevar a cabo un análisis de Nivel 3, se deben identificar las áreas de un predio que requieren de intervención mediante alguna medida correctiva o control de ingeniería diseñada a partir de las características específicas del riesgo del sitio.

Algunas de las actividades recomendadas para la ejecución del nivel 3 de análisis detallado de riesgo para el sitio son las siguientes:

- Ejecución de modelos detallados de transporte y destino de contaminantes, realizando calibraciones mediante datos medidos en el sitio.
- Verificación del nivel de exposición de los receptores, mediante un seguimiento de ensayos biológicos, o mediante la modificación de las variables de los receptores.

GLOSARIO

Riesgo: probabilidad o posibilidad de que el manejo, liberación al ambiente y la exposición a un material o residuo, ocasionen efectos adversos en la salud humana y/o al ambiente.

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos, en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños en los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como en sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo, que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Amenaza: es el peligro latente de que un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Riesgo significativo: riesgo grave y moderado, el cual requiere de una evaluación más detallada.

Contaminación: se entiende por contaminación la alteración del medio ambiente por sustancias o formas de energía puestas por la actividad humana o de la naturaleza, en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o particulares.

Contaminante de interés (CDI): contaminante elegido por su toxicidad y peligrosidad para realizar la caracterización del riesgo.

Evaluación de riesgos a la salud y el ambiente: es el estudio que tiene por objeto definir si la contaminación existente en un sitio representa un riesgo tanto para la salud humana como para el ambiente, así como los niveles de remediación específicos del sitio en función del riesgo aceptable y las acciones de remediación que resulten necesarias.

Valor de referencia: concentración o dosis de un químico que está en el umbral de toxicidad o de contaminación significativa.



Ambiente

Peligro: capacidad inherente de uno o varios agentes de estrés de causar efectos adversos cuando el hombre, sistemas o poblaciones están expuestos a él.

Receptor: organismo, población o comunidad que está expuesta a contaminantes.

Exposición: acceso o contacto potencial con un agente o situación peligrosa; contacto del límite extremo de un organismo con agentes químicos, biológicos o físicos.

Rutas de exposición: es el camino que sigue un agente químico en el ambiente, desde el lugar donde se emite hasta que llega a establecer contacto con la población o individuo expuesto.

Toxicidad: la propiedad de una sustancia o mezcla de sustancias de provocar efectos adversos en la salud o en los ecosistemas.

Vía de exposición: proceso por el cual el contaminante entra en contacto directo con el cuerpo, tejidos o barreras de intercambio del organismo receptor, por ejemplo, ingestión, inhalación y absorción dérmica.

Límites Genéricos Basados en Riesgo (LGBR): son concentraciones basadas en riesgo, obtenidas de la aplicación de ecuaciones que relacionan supuestos de información de exposición con datos de toxicidad de los contaminantes o compuestos de interés.

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

Pasivo Ambiental: afectaciones ambientales originadas por actividades antrópicas directa o indirectamente por la mano del hombre, autorizadas o no, acumulativas o no, susceptibles de ser medibles, ubicables y delimitables geográficamente, que generan un nivel de riesgo no aceptable a la vida, la salud humana o el ambiente, de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Salud, y para cuyo control no hay un instrumento ambiental o sectorial.



Ambiente

Zona no saturada: zona del subsuelo situada por encima del nivel freático en la que los huecos están llenos de aire y agua, y la presión del agua es menor que la presión atmosférica (**IDEAM, 2015**).

Zona saturada: Parte de una formación acuífera en la que todos sus huecos están llenos de agua (**IDEAM, 2015**).

Pozo: Agujero o perforación que se excava o perfora en la tierra para extraer agua subterránea (IDEAM, 2015).

Pozo de inyección: Pozo de recarga que penetra en un acuífero y es utilizado para la inyección directa de agua; se distingue de un pozo de infiltración (IDEAM, 2015).

Pozo de observación: Pozo cuya rejilla está situada a una determinada profundidad del acuífero, que sirve para medir variables hidrogeológicas y químicas (IDEAM, 2015).

Pozo de producción: Pozo perforado con el fin de abastecerse de agua subterránea (Banco Mundial, 2002 - 2006).

Recarga de un acuífero: Entrada natural o artificial de agua en la zona saturada de un acuífero (IDEAM, 2015).

Red de monitoreo de agua subterránea: Serie de pozos para toma de muestras utilizados para conocer el estado de las aguas subterráneas y evaluar las variaciones cuantitativas y cualitativas del recurso.

SIGLAS

CDI: Compuesto de interés

PA: Pasivo Ambiental

LGBR: Límites Genéricos Basados en Riesgo

XRF: Fluorescencia de rayos X

SIG: Sistema de Información Geográfica

En construcción - V.nov2024

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Decreto 4741 de 2005 "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral".

<https://www.epa.gov/nps/basic-information-about-nonpoint-source-nps-pollution>

MINAM. (2019). Guía para la evaluación de sitios contaminados y la elaboración de planes dirigidos a la remediación. Ministerio del Ambiente. Perú. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2017046-118-2021-minam>

Álgebra de mapas para determinar las zonas con potencial turístico del cantón Tulcán – Ecuador. https://www.researchgate.net/profile/Michel-Bregolin/publication/365747869_GEOPARQUES_E_TURISMO_CIENTIFICO_SIN_ERGIAS_E_DESAFIOS_NO_GEOPARQUE_CAMINHOS_DOS_CANIONS_DO_SUL_BRASIL/links/6381252bc2cb154d292763b8/GEOPARQUES-E-TURISMO-CIENTIFICO-SINERGIAS-E-DESAFIOS-NO-GEOPARQUE-CAMINHOS-DOS-CANIONS-DO-SUL-BRASIL.pdf#page=64

Vila, J.; Varga, D. Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centro América. Capítulo 15 Sistemas de Información Geográfica. ISBN 978-84-96742-37-6.2008

http://www.creaf.uab.es/profes/pilar/LibroRiesgos/16_Cap%C3%ADtulo15.pdf

Es/ER/TM-186 Guide for Developing Conceptual Models for Ecological Risk Assessments. Environmental Restoration Risk Assessment Program. 1996 <https://rais.ornl.gov/documents/tm186.pdf>

Guidance manual for environmental site characterization in support of environmental and human health risk assessment. Volume 1 guidance manual. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2016. ISBN 978-1-77202-026-7. https://ccme.ca/en/res/guidancemanual-environmentalsitecharacterization_vol_1e.pdf

EPA-US. Using the triad Approach to Streamline Brownfields Site Assessment and Cleanup. 2003 <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/triadprimer.pdf>



Ambiente

EPA-US. Soil Screening Guidance User's Guide. Attachment A Conceptual Site Model Summary. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175226.pdf>

EPA-US. Soil Screening Guidance User's Guide. Second Edition. 1996. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175238.pdf>

Ley 2327 de 2023. Por medio de la cual se establece la definición de pasivo ambiental, se fijan lineamientos para su gestión y se dictan otras disposiciones. Guidance manual for environmental site characterization in support of environmental and human health risk assessment. Volume 2 checklists. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2016. ISBN 978-1-77202-028-1. https://publications.gc.ca/collections/collection_2024/ccme/En108-4-93-2016-2-eng.pdf

ASTM E1689-20 Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites

ASTM E1527-21 Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process

ASTM E1903-19 Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process

EPA-US. Sample Collection Information Document for Chemicals, Radiochemicals, Pathogens and Biotoxins. EPA/600/R-22/255. 2023 https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=357683&Lab=CESER

Darbra, R.M.; Eljarrat, E.; Barceló, D. How to measure uncertainties in environmental risk assessment. Trends in Analytical Chemistry. Volume 27, Issue 4. 2008

Abdo, H.; Flaus, J-M.; Masse, F. Uncertainty quantification in risk assessment – Representation, propagation and treatment approaches: application to atmospheric dispersion modeling. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volumen 49, Part B. 201

En construcción - V.nov2024