

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

EVALUACION DE LA CONTAMINACION, CRITERIOS
Y ALTERNATIVAS DE REHABILITACION EN LOS
"TALLERES DE FERROCARRILES NACIONALES DE
MEXICO (FNM) EN AGUASCALIENTES, AGS.,
MEXICO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERIA
(A M B I E N T A L)
P R E S E N T A :
ING. CIVIL MARIA / ROCHA JIMENEZ



DIRIGIDA POR: DR. TOMAS GONZALEZ MORAN

CIUDAD UNIVERSITARIA

JULIO 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis papás

Miguel Angel Rocha Rivera

María del Carmen Jiménez Ramos

Por su amor, su tiempo, sus ejemplos y su alegría



A mis hermanos

Carlos

Por su cariño y paciencia

Alejandro

Por su alegría y cariño

Miguel

Por los esfuerzos que está realizando a pesar de todo

David

Por el orgullo que me ha dado, al verlo seguir adelante

A Ernesto Fuerte Dominguez

Por su gran amor

AGRADECIMIENTOS A:

Dr. Tomás González Moran,

Por su paciencia para conmigo durante la dirección de este trabajo

Dra. Rosario Iturbe Argüelles

Por permitirme pertenecer al grupo de investigación que dirige y por las enseñanzas transmitidas en todos los aspectos

M. en I. Ana Elisa Silva Martínez

Por su tiempo durante mis estudios de maestría y sus observaciones para el mejoramiento del presente trabajo

Dra. Georgina Fernández Villagómez

Por sus valiosos consejos para la elaboración del presente trabajo

M. en I. Francisca Soler Anguiano

Por sus provechosos comentarios sobre este trabajo

A Todos los compañeros del Grupo de Investigación: Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Por su amistad, consejos y apoyo

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Al Pueblo de México

Porque gracias a sus impuestos he realizado todos mis estudios

Al Ing. Monroy, y al personal de Ferrocarriles Nacionales de México

Por la información proporcionada para la elaboración de esta tesis

ÍNDICE

Contenido	Página
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
Capítulo 1	
<u>INTRODUCCIÓN</u>	
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Alcances y limitaciones	4
Capítulo 2	
<u>PROPIEDADES Y PROCESOS DEL SUELO Y LOS CONTAMINANTES DE INTERÉS EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE UN SITIO</u>	
2.1. Suelo y subsuelo, definiciones y fases	5
2.2. Propiedades del suelo y subsuelo que influyen en el transporte y destino de contaminantes	6
2.3. Propiedades fisicoquímicas de los contaminantes	8
2.4. Composición y propiedades fisicoquímicas de productos de petróleo	9
2.5. Propiedades fisicoquímicas de metales pesados	12
2.6. Toxicidad de algunos hidrocarburos y metales pesados	13
2.7. Procesos de transporte y destino de contaminantes en el suelo y subsuelo	16
Capítulo 3	
<u>METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL EN UN SITIO POTENCIALMENTE CONTAMINADO</u>	
3.1. Evaluación preliminar	20
3.2. Diseño del muestreo y análisis en laboratorio	22
3.3. Ejecución del muestreo y análisis	29
3.4. Interpretación de los resultados	29

Contenido	Página
Capítulo 4	
<u>REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS; CRITERIOS BASADOS EN RIESGO A LA SALUD</u>	31
4.1. Criterios y niveles de limpieza	31
4.2. Evaluación del riesgo	33
4.3. Criterios de limpieza basados en riesgo a la salud	44
4.4. Tecnologías de rehabilitación	47
4.5. Análisis de las alternativas de rehabilitación	52
Capítulo 5	
<u>EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS “TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS.”</u>	55
5.1. Uso histórico de la propiedad y del área aledaña	56
5.2. Marco físico regional del sitio	57
5.3. Reconocimiento del sitio	62
5.4. Actividades industriales y comerciales	63
5.5. Marco físico a detalle del sitio	70
5.6. Materiales de construcción	82
5.7. Datos geotécnicos y analíticos previos	82
Capítulo 6	
<u>ANÁLISIS DE RIESGO A LA SALUD Y CRITERIOS DE LIMPIEZA ESTABLECIDOS EN LOS “TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS.”</u>	91
6.1. Sustancias químicas de interés	91
6.2. Evaluación de la exposición	98
6.3. Evaluación de la toxicidad	104
6.4. Caracterización del riesgo	105
6.5. Determinación de los niveles de limpieza específicos del sitio	109
Capítulo 7	
<u>ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN EN LOS “TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS.”</u>	113
7.1. Objetivos de la rehabilitación	113
7.2. Desarrollo de alternativas	114

Contenido	Página
Capítulo 8	
<u>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</u>	123
8.1. Discusión de resultados acerca de la evaluación de riesgo a la salud y criterios de limpieza	123
8.2. Discusión de resultados de las alternativas de rehabilitación	130
Capítulo 9	
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	133
9.1. Conclusiones	133
9.2. Recomendaciones	137
<u>REFERENCIAS</u>	139
Apéndice 1	
<u>CONSIDERACIONES PARA LOS FACTORES DE: VOLATILIZACIÓN, EMISIÓN DE PARTÍCULAS Y LIXIVIACIÓN</u>	A1
A1.1. Factor de volatilización	A2
A1.2. Factor de emisión de partículas	A2
A1.3. Factor de lixiviación	A3
Apéndice 2	
<u>MEMORIA DE CÁLCULO DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD</u>	A5
A2.1. Cálculos de factor de volatilización (FV), factor de emisión de partículas (FEP) y factor de lixiviación (FL)	A6
A2.2. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de abasto	A8
A2.3. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de la laguna de “chapopote”	A24
A2.4. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de ejes y ruedas	A40
A2.5. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de pailería	A47
A2.6. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de pintura, báscula y estensilado	A54
Apéndice 3	
<u>CRITERIOS DE LIMPIEZA OBTENIDOS COMPARADOS CON CRITERIOS NACIONALES E INTERNACIONALES</u>	A61

ÍNDICE DE TABLAS

	Tabla	Página
 Capítulo 2		
2.1	Propiedades del suelo y subsuelo que influyen en el transporte y destino de contaminantes	6
2.2	Propiedades fisicoquímicas de las sustancias químicas	8
2.3	Caracterización fisicoquímica de productos del petróleo	9
2.4	Efectos tóxicos de algunos hidrocarburos	15
2.5	Efectos tóxicos de algunos elementos	16
2.6	Procesos físicos que afectan el transporte de contaminantes miscibles	17
2.7	Procesos químicos y biológicos que afectan el transporte de contaminantes	18
 Capítulo 3		
3.1	Observaciones a realizar en el reconocimiento del sitio	22
3.2	Problemas y limitaciones en el muestreo y análisis	25
3.3	Elementos para garantizar la calidad de los datos	26
3.4	Información proporcionada por el plan de muestreo en campo	27
 Capítulo 4		
4.1	Descripción de las variables empleadas en las fórmulas para la determinación de la dosis de exposición	39
4.2	Parámetros de exposición recomendados por la USEPA (1989)	41
4.3	Clasificación de contaminantes por su potencial cancerígeno	42
4.4	Descripción de las variables empleadas en las expresiones para la determinación de las concentraciones límite con base en riesgo a la salud	47
 Capítulo 5		
5.1	Materiales y procesos involucrados en el mantenimiento de carros y coches	64
5.2	Materiales utilizados y residuos generados en el proceso de fundición	68
5.3	Área de las zonas en el sitio de estudio	71
5.4	Métodos y análisis realizados	83

	Tabla	Página
5.5	Clasificación de los suelos encontrados (textura)	84
5.6	Concentraciones de metales en el sitio	85
5.7	Concentraciones de BPC (bifenilos policlorados) en el sitio	85
5.8	Concentraciones de compuestos orgánicos volátiles	86
5.9	Concentraciones de compuestos semivolátiles	87
5.10	Concentraciones de HPA en el sitio	88
5.11	Concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo	88
5.12	Concentraciones de BTEX	89
5.13	Concentraciones de productos de petróleo	89

Capítulo 6

6.1	Concentraciones en la zona de herrería	92
6.2	Concentraciones en la zona de ejes y ruedas	93
6.3	Concentraciones en la zona de pintura, báscula y estensilado	94
6.4	Concentraciones en la zona de abasto	95
6.5	Concentraciones en la zona de tapicería	96
6.6	Concentraciones en la zona de pailería	97
6.7	Concentraciones en la zona de "chapopote"	97
6.8	Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de abasto	101
6.9	Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de "chapopote"	102
6.10	Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de ejes y ruedas	103
6.11	Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de pailería	103
6.12	Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de pintura, báscula y estensilado	103
6.13	Datos toxicológicos de los contaminantes de interés	104
6.14	Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de abasto	106
6.15	Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de "chapopote"	107
6.16	Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de ejes y ruedas	108
6.17	Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de pailería	108
6.18	Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de pintura, báscula y estensilado	108
6.19	Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de abasto	110

	Tabla	Página
6.20	Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de "chapopote"	111
6.21	Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de ejes y ruedas	112
6.22	Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de pailería	112
6.23	Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de pintura, báscula y estensilado	112

Capítulo 7

7.1	Área y volumen del suelo contaminado, por zonas	115
7.2	Tecnologías de rehabilitación que pudieran emplearse para el suelo contaminado en el sitio de estudio (Talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.)	115
7.3	Selección de tecnologías potenciales en los talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.	117
7.4	Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de abasto	119
7.5	Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de laguna de chapopote	120
7.6	Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de ejes y ruedas	120
7.7	Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de pintura, báscula y estensilado	121

Capítulo 8

8.1	Resumen de las tablas 6.14-6.18 para hacer un análisis cualitativo	124
8.2	Criterios y niveles de limpieza a alcanzar (específicos del sitio de estudio)	125
8.3	Costo de las alternativas de rehabilitación	131

Apéndice 1

A1.1	Descripción de las variables para el cálculo de FV, FEP y FL	A4
------	--	----

	Tabla	Página
Apéndice 2		
A2.1	Valores de los parámetros empleados en las fórmulas para la evaluación de riesgo a la salud	A5
•	Cálculos de factor de volatilización (FV), factor de emisión de partículas (FEP) y factor de lixiviación (FL)	A7
•	Cálculos de la dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de abasto	A9
•	Cálculos de la dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de laguna de “chapopote”	A25
•	Cálculos de la dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de ejes y ruedas	A41
•	Cálculos de la dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de pailería	A48
•	Cálculos de la dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de pintura, báscula y estensilado	A55
 Apéndice 3		
A3.1	Criterios de limpieza obtenidos e interinos	A61
A3.2	Criterios de limpieza de referencias bibliográficas	A63
A3.3	Niveles de limpieza elegidos para los Talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.	A67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Capítulo 4	
4.1 Metodología de solución de un problema	52
4.2 Resolución del problema de selección de la alternativa de rehabilitación	53
Capítulo 5	
5.1 Localización del sitio de estudio	57
5.2 Zonas y acuíferos del estado de Aguascalientes	59
5.3 Diagrama de proceso de una fundidora	69
5.4 Zonas del sitio	70
5.5 Zona norte	71
5.6 Zona de herrería	72
5.7 Suelo manchado en la zona de herrería	72
5.8 Zona de ejes y ruedas	73
5.9 Zona de carros y coches	73
5.10 Zona de pintura, báscula y estensilado	74
5.11 Zona de abasto	75
5.12 Zona de tapicería	76
5.13 Zona de fundición	77
5.14 Escorias provenientes de la fundición	77
5.15 Zona de pailería	78
5.16 Suelo removido de la zona de abasto	78
5.17 Basura dispuesta en la enfriadora	79
5.18 Zona de laguna de “chapopote”	79
5.19 Laguna de “chapopote”	80
5.20 Laguna de “chapopote”	80
5.21 Furgones con residuos de hidrocarburos	81
5.22 Zona de vías	81

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El ser humano ha manejado y producido materiales y residuos desde la antigüedad. En aquellos tiempos, la mayor parte de estos materiales era degradada por el ambiente e integrada al equilibrio dinámico de la naturaleza. Sin embargo, esa capacidad de asimilación de la naturaleza ya no es suficiente, por la gran cantidad de residuos generados y por sus características.

La acumulación e interacción adversa de sustancias con el ambiente son provocadas por el incremento en la población humana, que demanda más recursos y produce más residuos, aunada al desarrollo tecnológico e industrialización.

Los medios, agua, suelo y aire podrían contaminarse, y causar daños a la salud de seres humanos, animales y plantas en contacto con ellos. El problema de contaminación de éstos se puede atacar de dos formas: (a) previniendo la contaminación, al cambiar las prácticas en el manejo de materiales y utilizando tecnologías más limpias, y (b) rehabilitando los lugares ya contaminados.

En la primera solución, es importante considerar que el manejo de materiales y sustancias involucra las actividades de almacenamiento, transporte, tratamiento, descarga, y disposición. Todas ellas se realizan en operaciones agrícolas, industriales, municipales, y domésticas, posibles fuentes contaminantes. Y es ahí donde se deben controlar los procesos contaminantes.

En cuanto a la segunda, cabe señalar que existen en todo el planeta muchos lugares por limpiarse, y en México también. Izcapa (1998), presenta un inventario de los sitios potencialmente contaminados con sustancias tóxicas. Menciona que en el país existen por lo menos 955 sitios que se pueden considerar potencialmente contaminados. Señala, además, que:

- a) Los estados de la República que presentan mayor número de sitios contaminados son Tabasco, Veracruz, Estado de México, Coahuila, Hidalgo, San Luis Potosí, Baja California y Guerrero
- b) Las sustancias que más se han derramado por accidente durante su transporte son petróleo, gasolina, diesel, combustóleo, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y asfalto
- c) Los principales residuos peligrosos depositados de manera inadecuada y clandestina son jales mineros, escorias de fundición, aceites gastados, combustibles, y metales.

Para afrontar la contaminación en un sitio que requiere rehabilitación es indispensable conocer y comprender:

- a) las características del medio físico, que influyen en el transporte y destino de los contaminantes,

- b) las fuentes de la contaminación,
- c) las propiedades fisicoquímicas y toxicidad de las sustancias contaminantes, y
- d) la interacción de las sustancias contaminantes con los medios (agua, atmósfera y suelo)

La metodología a emplearse para comprender los puntos antes mencionados y obtener la propuesta del grado de limpieza al que debe llegarse integra los siguientes aspectos: (ASTM, 1998)

- a) Caracterización del sitio,
- b) Evaluación del riesgo a la salud,
- c) Determinación de estándares de limpieza específicos del sitio, y
- d) Estudio de las medidas correctoras, y su ejecución

El fundamento de muchos de los estándares o criterios universales de limpieza para un sitio contaminado no es claro, lo cual complica mucho la elección del más adecuado; es por ello que la determinación de criterios o niveles de limpieza con base en el riesgo a la salud es más conveniente en la evaluación de la contaminación en un lugar.

Esta investigación pretende realizar la evaluación ambiental considerando el análisis de riesgo a la salud en un sitio contaminado por hidrocarburos y metales pesados, y además, establecer las mejores alternativas para su rehabilitación dependiendo del uso al que se destine el predio.

1.1 Antecedentes

En la investigación presente se realiza un estudio de evaluación ambiental en uno de los muchos sitios contaminados que existen en el país. Este sitio está ubicado en la ciudad de Aguascalientes, en la parte central de México, y fue muy importante en las actividades del país durante el siglo XX, era ocupado por los: "*Talleres de FNM* en Aguascalientes, Ags*". Las actividades llevadas a cabo en el sitio lo contaminaron, al no considerar el manejo de sus residuos y la protección ambiental, y esto podría provocar riesgos a la salud de la población vecina.

El sitio de estudio está abandonado. Por ello se presupone que, actualmente el riesgo a la salud sólo podría presentarse a la población aledaña. Sin embargo, el uso del sitio podría cambiar, al actual propietario (FNM) ya no le son útiles algunas zonas del lugar y por la necesidad de espacio en la ciudad de Aguascalientes, las autoridades de FNM han pensado dar, mediante los medios jurídicos adecuados, tales zonas al municipio.

*FNM. Ferrocarriles Nacionales de México

Las autoridades de la empresa y municipales han pensado que estas instalaciones podrían tener uso de suelo comercial, industrial y residencial. Esto provocó el interés en determinar la factibilidad de cambio en el uso de suelo; considerando entre otras cosas, que sea seguro a la salud de la población potencialmente expuesta.

El sitio está abandonado. Por ello se presupone que, actualmente el riesgo a la salud sólo podría presentarse a la población aledaña. Sin embargo, el uso del sitio podría cambiar, al actual propietario (FNM) ya no le son útiles algunas zonas del lugar y por la necesidad de espacio en la ciudad de Aguascalientes, las autoridades de FNM han pensado otorgar, mediante los medios jurídicos adecuados, tales zonas al municipio.

1.2 Justificación

Estas instalaciones operaron desde principios del siglo XX y sus actividades principales eran el mantenimiento y reparación de carros y coches de ferrocarril, abasto de combustible, y fundición de piezas metálicas dañadas del equipo de arrastre (carros y coches). Estas actividades contaminaron el sitio con hidrocarburos y metales pesados.

Esta contaminación podría causar daños a la salud de los vecinos o de las personas que utilicen el sitio en el futuro, por ello se debe realizar una evaluación de la contaminación y análisis de riesgo en los Talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.

Con el resultado de la investigación se podrán establecer criterios de limpieza y propuestas de rehabilitación, en el sitio, de manera que sea factible aprovechar estos terrenos, sin que haya efectos adversos a la salud de la población que haga uso de ellos.

1.3 Objetivos

General

Establecer las alternativas de rehabilitación, evaluando la contaminación, analizando el riesgo a la salud humana y proponiendo los criterios de limpieza, para el reuso del sitio: "Talleres de FNM en Aguascalientes, Ags."

Particulares

- Definir el transporte y destino de los contaminantes presentes en el sitio, conociendo las características del medio físico y de las sustancias involucradas
- Realizar una evaluación preliminar, identificando las fuentes de contaminación en el sitio de estudio
- Especificar los criterios y niveles de limpieza del lugar, empleando la evaluación de riesgo a la salud
- Determinar los sitios donde se requiere rehabilitación, comparando las concentraciones de los contaminantes presentes con los criterios de limpieza
- Realizar la toma de decisión de las acciones de respuesta más convenientes, y las alternativas factibles de reuso del suelo, conociendo las características del medio y los contaminantes

1.4 Alcances y limitaciones

La determinación de los criterios de limpieza se realizará utilizando factores de exposición usados por la USEPA (1989).

El costo de los estudios en este momento impide realizar nuevos muestreos sólo se utilizarán datos analíticos previos.

La elección de las medidas de rehabilitación no incluye una evaluación detallada de costos.

Para elegir las alternativas de rehabilitación no se realizará pruebas en laboratorio o piloto.

Capítulo 2

PROPIEDADES Y PROCESOS DE SUELO Y CONTAMINANTES DE INTERÉS EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE UN SITIO

La evaluación de la contaminación de un sitio requiere de manera indispensable el entendimiento y el conocimiento de tres elementos principales:

- a) Las propiedades del medio o medios en los que se encuentran las sustancias contaminantes,
- b) Las propiedades fisicoquímicas, de degradación, y de toxicidad de las sustancias contaminantes, y
- c) Los procesos de transporte y destino de los contaminantes en el medio o medios

En el sitio de estudio, el nivel piezométrico del agua se encuentra a más de 100 m y la contaminación se debe a hidrocarburos y metales pesados, por lo que en este capítulo se estudiarán únicamente las propiedades del medio en la zona no saturada y de los contaminantes mencionados.

2.1. Suelo y subsuelo, definiciones y fases

El término suelo tiene diferentes acepciones: (Juárez, 1992; Pepper, 1996; Tschebotarioff, 1972)

- a) Desde el punto de vista agrícola: es la delgada parte superior del manto de rocas en que penetran las raíces de las plantas, y de donde éstas toman agua y sustancias necesarias para su existencia.
- b) Para la geología es todo material intemperizado (producto de la acción en el tiempo, del clima y los organismos vivos en un material parental con cierta topografía) y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie. No considera los materiales transportados ni intemperizados posteriormente a su transporte.
- c) Desde el punto de vista de ingeniería civil: son los depósitos sueltos o moderadamente cohesivos, como gravas, arenas, limos, arcillas o cualquiera de sus mezclas.

Asimismo, los geólogos definen como subsuelo la parte de la corteza terrestre, debajo del suelo, en la que el material no está intemperizado (Blyth, 1989).

Desde el punto de vista ambiental se puede agrupar las acepciones dadas por los agrónomos (suelo) y los geólogos (subsuelo) como un solo medio. Esto, porque tanto las propiedades de este medio tratadas desde el punto de vista agrícola como del punto

de vista de geología son muy importantes en el transporte y destino de los contaminantes.

En el suelo y el subsuelo se distinguen tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está formada por partículas de suelo; la líquida por el agua en el suelo, (aunque en sitios contaminados puede haber también fluidos **no acuosos*** como los hidrocarburos); la fase gaseosa comprende aire, CO₂ o cualquier otros gas presente.

Además, es importante, desde el punto de vista de una evaluación ambiental, tener presente que hay actividad biológica en el suelo y en el subsuelo.

2.2. Propiedades del suelo y subsuelo que influyen en el transporte y destino de contaminantes

Las propiedades del medio en el que estén presentes los contaminantes son muy importantes pues influyen en su comportamiento. En la tabla 2.1 se presenta una descripción de ellas en suelo y subsuelo.

Tabla 2.1. Propiedades del suelo y subsuelo que influyen en el transporte y destino de contaminantes

Propiedad del suelo y subsuelo	Descripción	Referencias
Perfil	Los procesos de formación del suelo generan horizontes que son característicos de un suelo particular y lo hacen único. El medio puede tener algunos o todos los horizontes. En orden, desde la superficie del terreno hasta la roca o material parental se pueden presentar los siguientes: O (orgánico), A, E (eluviación), B (iluviación), C y R (lecho rocoso).	Pepper (1996)
Textura	El porcentaje de arena, limo y arcilla que forman el suelo determina la textura del suelo; lo cual afecta muchas de las propiedades físicas y químicas del suelo.	Pepper (1996)
Estructura	La estructura está dada por la disposición que adoptan las partículas del suelo (o del subsuelo) para formarlo. Las partículas primarias se unen para formar estructuras secundarias, los aglutinantes son coloides, que pueden ser compuestos producidos por microorganismos.	Juárez (1974) Pepper (1996)
Porosidad y porosidad efectiva	La porosidad total es definida como el espacio poroso de un suelo o subsuelo, expresado como porcentaje. Si V_T es el volumen total y V_V es el volumen de vacíos o poros, la porosidad (n) es V_V/V_T . La porosidad efectiva es el porcentaje de espacio poroso interconectado.	Domenico (1990)
Contenido de agua	Si el volumen total V_T del suelo se divide en el volumen de la porción sólida V_S , el volumen de agua V_w , y el volumen de aire V_a , el contenido volumétrico de agua está definido como: V_w/V_T .	Freeze y Cherry (1979)
Descarga específica	La descarga específica o velocidad de Darcy es el caudal de agua (Q) que fluye a través de una sección transversal (A) en un medio poroso $V = Q/A = Ki$.	Freeze y Cherry (1979)

*No acuosos. No solubles en agua

Tabla 2.1. (Continuación)

Propiedad del suelo y subsuelo	Descripción	Referencias
Carga hidráulica y potencial del fluido	La carga hidráulica (h) en un punto (P) en un medio poroso es la suma de dos componentes: la elevación en el punto de medición o carga de posición (z) y la carga de presión (ψ) (ejercida por el agua arriba del punto de medición o, en suelos no saturados, a la succión de agua en tal punto).	Freeze y Cherry (1979)
Conductividad hidráulica y permeabilidad	La conductividad hidráulica (K) es la constante de proporcionalidad de la ley de Darcy, depende del medio poroso y del fluido. La permeabilidad (k) sólo es función del medio. El término es ampliamente utilizado en donde importa la existencia de un flujo en varias fases (gas, aceite y agua).	Freeze y Cherry (1979)
Heterogeneidad y anisotropía	Un suelo es homogéneo cuando sus propiedades son independientes de la posición y es heterogéneo en caso contrario. La isotropía y la anisotropía se refieren a la diferencia entre parámetros del suelo en el mismo punto pero medido en varias direcciones. En el suelo isótropo sus propiedades son independientes de la dirección en que se midan; el suelo anisótropo las propiedades varían con la dirección de medida del mismo punto.	Freeze y Cherry (1979)
Flujo estacionario y flujo transitorio	El flujo estacionario ocurre cuando, en cualquier punto en un campo de flujo, la magnitud y la dirección de la velocidad de flujo son constantes con el tiempo. El flujo transitorio (o inestable) es cuando en un punto dado, en un campo de flujo, la magnitud o dirección de la velocidad del flujo cambia con el tiempo. En un sistema de flujo estacionario la velocidad puede variar de un punto a otro, pero no variará con el tiempo en cualquier punto dado.	Freeze y Cherry (1979)
Potencial de iones hidrógeno (pH)	El pH de un suelo es el negativo del logaritmo de la concentración de iones H^+ en la solución presente en los poros del suelo, la cual está en equilibrio dinámico con las superficies negativamente cargadas de partículas de suelo.	Alloway (1995)
Potencial de óxido-reducción (pE o Eh)	La actividad de electrones libres en el suelo se puede medir como potencial de óxido - reducción. Esta propiedad controla el equilibrio de las reacciones oxidación - reducción (transferencia de electrones y cambios de especies de iones o elementos). Valores grandes positivos de pE (o Eh) favorecen la existencia de especies oxidadas, y valores bajos o negativos de pE (o Eh) son asociados con especies reducidas.	Alloway (1995)
Contenido de materia orgánica	La materia orgánica presente en la superficie del suelo es integrada por residuos de plantas degradados biológicamente por microorganismos del suelo.	Pepper (1996)
Capacidad de intercambio catiónico	El intercambio de iones se da entre los iones del contorno balanceado en la superficie de los coloides y los iones en solución en la fase líquida del suelo. Las características de éste son: reversible, estequiométrico, y en la mayoría de los casos, hay selectividad o preferencia de un ion a otro por el adsorbente.	Alloway (1995)

Tabla 2.1. (Continuación)

Propiedad del suelo y subsuelo	Descripción	Referencias
Constituyentes de la fase gaseosa	Los principales constituyentes gaseosos del suelo son oxígeno, dióxido de carbono, nitrógeno, y otras sustancias volátiles tales como sulfuro de hidrógeno o etileno.	Pepper (1996)
Disponibilidad de oxígeno para respiración	El contenido de oxígeno de suelos es vital para los microorganismos aerobios, que utilizan al oxígeno como aceptor final de electrones durante la degradación de compuestos orgánicos. Los microorganismos facultativos pueden utilizar oxígeno o formas combinadas de oxígeno como aceptores finales de electrones. Los microorganismos anaerobios no pueden utilizar oxígeno como un aceptor.	Pepper (1996)

2.3. Propiedades fisicoquímicas de los contaminantes

Las propiedades fisicoquímicas son las que determinan en qué modo influye y cómo se mueve en el ambiente una sustancia, y con qué eficacia es posible eliminarla según los métodos existentes (LaGrega, 1996). En la tabla 2.2 se presentan las principales propiedades y su descripción.

Tabla 2.2. Propiedades fisicoquímicas de las sustancias químicas

Propiedad	Descripción	Referencia
Solubilidad	Es el grado en que una sustancia, el soluto, se disuelve en otra, el solvente. La solubilidad de las sustancias químicas en agua es función de la temperatura y del tipo de contaminante. La solubilidad en agua se mide en unidades de miligramo por litro o en partes por millón.	LaGrega (1996)
Presión de vapor	La presión de vapor del contaminante, es la presión de su fase gas en equilibrio con su fase líquida o sólida, es un índice del grado en que el contaminante se puede evaporar. Se puede decir en otras palabras que la presión de vapor de una sustancia es su "solubilidad" en el aire.	Brusseau (1996)
Constante de Henry	La ley de Henry se emplea para describir el grado de solubilidad de un gas en un líquido. Esta ley afirma que en condiciones de equilibrio la presión parcial del gas inmediatamente superior a un líquido es proporcional a la concentración de esa sustancia química en el líquido.	Brusseau (1996) LaGrega (1996)
Coefficiente de difusión	Las sustancias químicas presentes en la atmósfera y en el agua tienden a trasladarse desde áreas de mayor a menor concentración. La difusión puede definirse como el movimiento de una sustancia bajo la influencia de un gradiente de concentración.	LaGrega (1996)
Coefficiente de distribución octanol-agua	Es una constante adimensional con el que se mide el grado de distribución de una sustancia orgánica entre la fase orgánica y el agua.	LaGrega (1996)
Coefficiente de distribución de agua a suelo	Conocido como K_d , sirve para medir la capacidad de una sustancia química de ser adsorbido por el suelo o por los sedimentos, y es la relación entre la concentración en el suelo y la concentración en el agua.	LaGrega (1996)
Factor de bioacumulación	Muestra la cantidad de sustancia química susceptible de acumularse en los organismos acuáticos. Y depende del metabolismo y de los sistemas de eliminación del organismo.	LaGrega (1996)

2.4. Composición y propiedades fisicoquímicas de productos de petróleo

En el sitio de estudio la contaminación se debe en parte a hidrocarburos, por lo que en este apartado se estudiarán únicamente las propiedades de los contaminantes mencionados.

Los productos de petróleo provenientes del aceite crudo son mezclas complejas de muchos compuestos químicos que presentan una gran variación en su composición y, también, variaciones significativas entre diferentes muestras del mismo producto. Estas variaciones resultan de la variación natural de las fuentes del aceite crudo, procesos y condiciones de refinación, así como de los tipos y cantidades de aditivos empleados. La mayoría de los productos de petróleo se obtienen del aceite crudo por destilación, que es un proceso que separa los compuestos por volatilidad.

Cuando se evalúa el impacto de derrames o fugas de combustibles de petróleo al ambiente, sólo algunos de los componentes son importantes debido a su toxicidad y/o movilidad en el ambiente (ASTM, 1995).

A continuación se presenta información básica de las propiedades fisicoquímicas de los productos del petróleo (gasolina, combustible diesel, combustible de avión, etc.) y algunos otros productos con la finalidad de evaluar los impactos potenciales al ambiente debidos al derrame o fuga de estos productos en el subsuelo.

2.4.1. Composición química de los productos del petróleo

Los productos del petróleo están compuestos principalmente de hidrocarburos (compuestos orgánicos integrados por solo hidrógeno y carbono). Para describir y comparar los productos del petróleo se usan los puntos de ebullición y el número de carbonos. En la tabla 2.3 se resumen estas características y sus usos.

Tabla 2.3. Caracterización fisicoquímica de productos del petróleo

Producto	Intervalo del número de carbonos	Intervalo del punto de ebullición (°C)	Uso
Gases	C ₁ a C ₅	Hasta 30	combustible
Gasolina	C ₄ a C ₁₂	25 a 215	combustible
Keroseno y combustibles de avión	C ₁₁ a C ₁₃	150 a 250	combustible
Diesel y aceites	C ₁₀ a C ₂₀	160 a 400	combustible
Aceites pesados	C ₁₉ a C ₂₅	315 a 540	combustible
Aceites de motor y otros aceites lubricantes	C ₂₀ a C ₄₅	425 a 540	aceites lubricantes y grasas
Residuos	>40	>560	asfaltos

(ASTM, 1995)

2.4.1.1. Gasolina

La gasolina está compuesta de hidrocarburos y aditivos que se mezclan con el combustible para mejorar su capacidad y la vida del motor. El intervalo de sus hidrocarburos es de C_4 a C_{12} .

Los principales hidrocarburos aromáticos que se presentan en gasolina son: benceno (C_6H_6), tolueno (C_7H_8), etilbenceno (C_8H_{10}), y xilenos (C_8H_{10}); conocidos colectivamente como BTEX. También, están presentes algunos aromáticos más pesados y aun pequeñas cantidades de hidrocarburos poliaromáticos (HPA). Los compuestos aromáticos comprenden aproximadamente del 10 al 40 por ciento de la gasolina (ASTM, 1995).

En la gasolina también están presentes compuestos oxigenados como los alcoholes (metanol y etanol) y algunas veces se añaden éteres (metil ter butil éter, MTBE) como propulsores del octano y para reducir las emisiones del monóxido de carbono. El MTBE se ha usado como un aditivo común solo desde hace algunos años (ASTM, 1995).

La gasolina con plomo, que fue más común en el pasado, contiene compuestos del plomo añadida como propulsores del octano. El tetraetilo de plomo (TEL) es uno de los compuestos de plomo que fue usado comúnmente como aditivo de la gasolina. Otros compuestos similares también se usaron. Algunas veces se añadieron mezclas de varios de estos compuestos. Debido a las emisiones de plomo por los vehículos, se han cambiado a gasolina sin plomo.

Para reducir las emisiones atmosféricas de plomo, se añadieron algunas veces a las gasolinas, dibromuro de etileno (EDB ethylene dibromide) y dicloruro de etileno (EDC ethylene dichloride) (ASTM, 1995).

2.4.1.2. Queroseno y combustible de avión.

Los hidrocarburos presentes en el queroseno tienen en sus moléculas de 11 a 13 de carbonos. Este compuesto se destila entre 150 y 250°C aproximadamente. Algunos combustibles de avión contienen destilados más ligeros y tienen características tanto de gasolina como de queroseno. El queroseno y los combustibles de avión tienen cerca del 10 al 20 por ciento de compuestos aromáticos.

2.4.1.3. Diesel y aceites ligeros de diesel

Los hidrocarburos en aceites combustibles ligeros y combustible diesel tienen moléculas con 10 a 20 átomos de carbono. El aceite combustible está compuesto aproximadamente de 25 a 35 por ciento de hidrocarburos aromáticos, principalmente bencenos y naftalenos. Las concentraciones de BTEX generalmente son bajas (ASTM, 1995).

2.4.1.4. Aceites combustibles pesados

También se les conoce como aceites combustibles residuales, están compuestos de hidrocarburos con moléculas de C_{19} a C_{25} número de carbonos. Son de color oscuro y más viscosos que el agua. Contienen del 15 a 40% de hidrocarburos aromáticos, dominados por fenantrenos y naftalenos. Estos aceites pueden tener del 15 al 30 por ciento de compuestos polares con nitrógeno, azufre, u oxígeno (ASTM, 1995).

2.4.1.5. Aceites de motor y otros aceites lubricantes

Los aceites lubricantes y los aceites de motor están constituidos principalmente de moléculas con número de carbonos de C_{20} a C_{45} . Están enriquecidos con fracciones más complejas que las presentes en el aceite crudo, como cicloparafinas y HPA del grupo de tres anillos o más. Del 10 al 30 por ciento del aceite está comprendido por compuestos aromáticos. Las moléculas que contienen nitrógeno, azufre, u oxígeno también son comunes. Además, aceites de cárter del cigüeñal de automóvil se enriquecen con HPA y algunos metales.

2.4.1.6. Residuos aceitosos

Las composiciones de los residuos aceitosos son más difíciles de identificar. Dependiendo de cómo se manejaron, pueden contener diferentes porciones de productos ligeros junto con aceites pesados.

2.4.2. Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos

Para entender mejor el comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo es importante reconocer las diferencias en las propiedades fisicoquímicas, que se observan en las moléculas al aumentar el número de carbonos presentes. El comportamiento es similar en compuestos de estructura molecular semejante.

En general, al aumentar el número de carbonos (o tamaño molecular) se observa lo siguiente: mayor punto de ebullición, menor presión de vapor, mayor densidad, menor solubilidad en el agua, mayor adhesión a los suelos y menos movilidad en el subsuelo.

Se espera que los hidrocarburos de petróleo con más de diez átomos de carbono, sean inmóviles en el subsuelo (debido a bajas solubilidades, bajas presiones de vapor, y fuerte tendencia a absorberse a la superficie del suelo), excepto cuando se encuentran en fase no acuosa (NAPLs, non aqueous phase liquids) (ASTM, 1995).

Los hidrocarburos aromáticos son más solubles y móviles en el agua que los hidrocarburos alifáticos de similar peso molecular. Los hidrocarburos oxigenados tienen, generalmente, solubilidades mucho mayores que los hidrocarburos de similar peso molecular, por lo que son los constituyentes de los combustibles de petróleo más

móviles. Los alcoholes ligeros, incluyendo el metanol y el etanol, son completamente miscibles en agua en todas las proporciones (ASTM, 1995).

Es importante notar que el comportamiento de distribución de compuestos individuales es afectado por la presencia de otros hidrocarburos en el subsuelo. Las concentraciones máximas, disueltas y en vapor, alcanzadas en el subsuelo son siempre menores que en cualquier combustible del petróleo puro.

2.5. Propiedades fisicoquímicas de metales pesados

En el sitio de estudio la contaminación se debe en parte a metales pesados, por lo que en este apartado se estudiarán únicamente las propiedades de tales contaminantes.

Los metales pesados son definidos como elementos que tienen una densidad mayor de 6 gr/cm^3 . Estos elementos son de interés (desde los puntos de vista biológico e industrial y, por supuesto, ambiental) por los daños que pueden causar a la salud humana (Alloway, 1995).

En general, los cationes de metales pesados son más móviles bajo condiciones ácidas, y menos móviles (reduciendo su biodisponibilidad) con los incrementos de pH; sin embargo, aniones de molibdato se hacen más disponibles con el aumento de pH (Alloway, 1995).

Los óxidos de Fe y Mn presentes en el suelo son importantes en la dinámica de los metales pesados en el suelo, debido a que estos óxidos co-precipitan y adsorben cationes como Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, V y Zn; y aniones como HPO_4^{2-} y AsO_4^{3-} de la solución del suelo (Alloway, 1995).

Las variaciones en el estado de oxido-reducción de un suelo afectan a elementos como Ag, As, Cr, Cu, Hg y Pb. Muchos metales pesados pueden afectarse por los efectos indirectos de las condiciones reducidas. Los iones sulfato son reducidos a sulfuro a pE -2.0 , y esto puede provocar la precipitación de sulfuros metálicos, como FeS_2 , HgS , CdS , CuS , MnS y ZnS . Cuando las condiciones reducidas causan la disolución de hidróxidos de Mn, Al y Fe, sus metales co-precipitados se liberan a la solución en el suelo (Alloway, 1995).

Los procesos de adsorción de iones metálicos, por los suelos, controlan las concentraciones de iones metálicos y complejos en la solución en el suelo. La mayoría de los metales pesados (con ciertas excepciones, incluyendo los metaloides As, Sb y Se, y los metales Mo y V) están presentes principalmente como cationes en la solución en el suelo, y entonces su adsorción depende de la densidad de cargas negativas en las superficies de los coloides del suelo.

2.6. Toxicidad de algunos hidrocarburos y metales pesados

Una sustancia o contaminante puede causar daños a la salud, dependiendo del medio donde esté presente (aire, agua, suelo) y la vía de exposición del organismo (ingestión, inhalación o contacto dérmico). Así pues, el equilibrio de tres elementos: sustancia química, receptor y ambiente está involucrado en la salud humana y ecológica (plantas y animales). Por ello la evaluación de riesgo a la salud se fundamenta en examinarlos (SSA, 1993).

Respecto al agente deben analizarse: sus propiedades fisicoquímicas, concentración, dosis y la presencia de otros contaminantes. En cuanto a los receptores, es importante: la herencia genética, la capacidad de respuesta, estado de nutrición (peso), edad, estado hormonal y la presencia de un estado patológico previo. Tocante al ambiente, afecta principalmente: la exposición, sitio, duración y frecuencia; la intensidad de la exposición es función de la concentración de la sustancia y la duración del contacto (SSA, 1993).

En los estudios de daños a la salud se distinguen tres tipos de intoxicación, considerando: el tiempo transcurrido entre la exposición y la aparición de los efectos, intensidad y duración de los mismos: (SSA, 1993)

- a) **Aguda.** Se produce cuando hay una exposición de corta duración y la sustancia química es absorbida rápidamente, en una o varias dosis, en un periodo no mayor de 24 horas, apareciendo los efectos de inmediato (desde pérdida de peso hasta la muerte).
- b) **Sub aguda.** Se refiere a la que se presenta cuando hay exposiciones frecuentes o repetidas durante tiempo variable, en un periodo de varios días o semanas, antes de que aparezcan los síntomas, pudiendo presentarse en forma progresiva y con una severidad variable.
- c) **Crónica.** Implica exposiciones repetidas a muy bajas dosis durante un periodo prolongado (comúnmente dos años), los síntomas y signos pueden presentarse por acumulación de la sustancia tóxica o bien por acumulación de efectos, es decir, la cantidad eliminada del agente es menor que la absorbida o que los efectos producidos por las exposiciones repetidas se suman. Los efectos de mayor interés son cancerígenos, mutágenos, y teratógenos. Otros efectos crónicos a la salud, con daño al hígado y el riñón también son importantes.

Los datos de dosis-respuesta son usados para identificar la dosis "segura" o el nivel tóxico con un efecto adverso particular observado. Los efectos adversos pueden incluir: (SSA, 1993)

- a) Efectos en todo el cuerpo (por ejemplo, pérdida de peso, observaciones neurológicas), y efectos en órganos específicos del cuerpo (incluyendo el sistema nervioso central)
- b) Efectos teratogénicos (habilidad de producir defectos de nacimiento)
- c) Efectos mutagénicos (habilidad de alterar los genes de la célula)
- d) Efectos cancerígenos (capacidad para producir tumores malignos en tejido vivo)

La mayoría de las dosis “seguras” o niveles tóxicos se basan en estudios con animales. En raros casos, está disponible información epidemiológica humana sobre una sustancia química. Idealmente, las dosis “seguras” o aceptables son calculadas de estudios crónicos, aunque, debido a la frecuente escasez de datos, se usan estudios subcrónicos. Lo anterior, provoca cierta incertidumbre en las conclusiones que se puedan obtener empleando estos resultados.

Para no cancerígenos, las dosis “seguras” se basan en estudios de niveles de efectos adversos no observados (NOAELs, no observed adverse effect levels) o niveles de efectos adversos más bajos observados (LOAELs, lowest observed adverse effect levels) (ASTM, 1995).

Las dosis aceptables para sustancias cancerígenas son determinadas, con base en modelos matemáticos usados para generar curvas de dosis – respuesta.

Los datos de los estudios anteriores se usan para generar las dosis de referencia (RfDs, reference doses), concentraciones de referencia (RfCs, reference concentrations), y los factores de pendiente (SFs, slope factors).

2.6.1. Toxicidad de algunos hidrocarburos

El impacto en la salud humana y el ambiente, en casos de contaminación de suelos y agua subterránea por gasolina y destilados medios, puede basarse en el receptor potencial (organismos acuáticos y seres humanos), expuesto a tres grupos de materiales: hidrocarburos aromáticos ligeros, hidrocarburos poliaromáticos y plomo.

En la tabla 2.4 se presentan los efectos tóxicos, cancerígenos y no cancerígenos, de algunos hidrocarburos.

Tabla 2.4. Efectos tóxicos de algunos hidrocarburos

Sustancia tóxica	Efectos cancerígenos	Efectos no cancerígenos
Antraceno		Irritación del tracto gastrointestinal, tracto respiratorio y piel. Cambios en la pigmentación de la piel.
Benceno	Leucemia, es un conocido cancerígeno humano	Intoxicación aguda: afecta el Sistema Nervioso Central (SNC) Intoxicación crónica: afecta el sistema hematopoyético, a la médula ósea, provoca anemia y daño orgánico cerebral
Benzo(a)antraceno	Probable cancerígeno humano	
Benzo(a)pireno	Clasificado como probable cancerígeno humano, provoca tumores en la boca del estómago y carcinomas.	
Cresoles y fenoles		Irritación de piel, ojos y membrana mucosa
Disolventes orgánicos		Afectan el SNC, también pueden dañar los riñones y el hígado
EDB (dibromuro de etileno) y EDC (dicloruro de etileno)	Cancerígenos	
Etilbenceno		Daños al hígado y riñones
Naftaleno		Intoxicación aguda: anemia hemolítica asociada a descenso de los niveles de hemoglobina en sangre. Produce irritación en la piel y ojos. Intoxicación subaguda: efectos neurotóxicos (confusión, letargia, vértigo), efectos hepáticos (hematomegalia), efectos renales y efectos oculares (cataratas, atrofia óptica).
N - Hexano		Nausea, mareo, vómito, parálisis severa pero reversible
Otros isómeros del hexano		Irritación de la piel y de las membranas mucosas
Tolueno		Depresivo del SNC, fatiga, debilidad e irritación de ojos
Xilenos		Depresivo del SNC, nausea, vómito, daños al hígado/riñón

(LaGrega, 1996; Madrigal, 1998; Mallinckrodt Baker Inc, 1997; SSA, 1993)

2.6.2. Toxicidad de algunos inorgánicos tóxicos

Los metales pesados (como el plomo, mercurio, cadmio, cromo y otros) y algunos metaloides (como el arsénico y selenio) comprenden una categoría principal de contaminantes inorgánicos. Los metales pesados, muchos de los cuales son también tóxicos a plantas y animales, tienden a ser móviles en la cadena alimenticia, es decir, pueden bioacumularse en animales. La toxicidad de algunos metales pesados, especialmente plomo y mercurio, ha sido conocida por siglos, pero no completamente entendido hasta tiempos recientes. Debido a su amplio uso y existencia en la naturaleza, algunos metales pesados son de interés particular (Gerba, 1996). Un resumen del efecto de algunos metales pesados se presenta en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Efectos tóxicos de algunos elementos

Sustancia tóxica	Efectos cancerígenos	Efectos no cancerígenos
Azufre*		Por inhalación causa irritación de los conductos respiratorios, tos, enfisema y asma, por ingestión: acidosis metabólica, en contacto con la piel: irritación, dermatitis, ulceraciones y foliculitis.
Arsénico* (As ⁺⁵ , As ⁺³)	Cáncer de pulmón y piel	Diarrea severa, daños al riñón, daños al Sistema Nervioso Central (SNC), daños al hígado, fibrosis pulmonar, daños neurológicos.
Bario		Estimulación muscular, trastornos del SNC y del sistema hematopoyético.
Cadmio	Cáncer de pulmón y puede incrementar la incidencia de cáncer en la próstata en hombres mayores	Daño en riñones e hígado, osteoporosis, anemia, perturbaciones en el sistema gastrointestinal
Cromo (Cr ⁺³ , Cr ⁺⁶)	Cáncer de pulmón	Es teratogénico, irritación e inflamación de la mucosa nasal, ulceración y perforación del tabique nasal, bronquitis, daño en hígado y riñones
Plomo	Tumores en los riñones	Cólicos dolorosos, afecta el sistema neuromuscular, afecta al sistema formador de la sangre, anemia, daños a la sangre, degeneración del cerebro y riñones, deterioro del coeficiente intelectual, disminución de la capacidad de aprendizaje

(Gerba, 1996; Izcapa, Fernández y González, 1998; LaGrega, 1996; SSA, 1993)

*El azufre es un no metal. El arsénico es un metaloide

2.7. Procesos de transporte y destino de contaminantes en el suelo y subsuelo

El transporte de contaminantes en un medio poroso está controlado por varios procesos físicos, químicos y biológicos. Los principales procesos físicos que influyen en el transporte de contaminantes miscibles son: advección, difusión, y dispersión (tabla 2.6). En los suelos que tienen conductividad hidráulica muy baja, como los suelos arcillosos, la difusión es el proceso de transporte dominante; sin embargo, la advección, transporte hidráulico, y la dispersión dominan en suelos con tasas de flujo relativamente altas, como en materiales de grano grueso (ISSMFE, 1997).

Tabla 2.6. Procesos físicos que afectan el transporte de contaminantes miscibles

Proceso	Definición	Observaciones
Advección	Transporte de masa debido al flujo del agua	Dominante en medios con conductividad hidráulica alta
Difusión	Movimiento de la masa debida a gradientes de concentración	Dominante en medios con conductividad hidráulica baja
Dispersión	Separación y diseminación de masa debido a las heterogeneidades en el campo de flujo	Provoca más dispersión de masa que la predicha sólo por advección
Flujo de fluidos en fase no acuosa	Transporte de sustancias inmiscibles en un medio poroso	Es importante en el movimiento de líquidos de fase no acuosa
Volatilización	Proceso mediante el cual una sustancia química volátil pasa de fase líquida a fase gaseosa	Es importante en la emisión de contaminantes a la atmósfera

(ISSMFE, 1997; LaGrega, 1996)

Los procesos químicos y biológicos que se consideran por su efecto en el transporte de sustancias contaminantes a través del suelo se definen en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. *Procesos químicos y biológicos que afectan el transporte de contaminantes*

Proceso	Definición	Observaciones
Sorción (adsorción y desorción)	Distribución del contaminante entre el agua en los poros (desorción) y el medio poroso (adsorción)	La adsorción reduce la tasa de migración del contaminante y hace difícil su remoción de la fase sólida
Decaimiento radiactivo	La caída en la actividad de una sustancia radiactiva	Mecanismo de atenuación importante cuando la vida media por decaimiento es igual o menor que el tiempo de residencia. Genera subproductos
Disolución/precipitación	Separación de las partículas de un contaminante por medio de un líquido (disolución); o formación de un sólido insoluble, mediante la reacción que tiene lugar en una solución (precipitación) y resulta en la remoción de contaminantes como sólidos	La disolución es importante en la fuente o en el frente de migración; la precipitación es un mecanismo importante de atenuación, particularmente en un sistema de pH alto (pH>7)
Acido/base	Reacciones que involucran la transferencia de protones	Controla otras reacciones (como disolución/precipitación y biodegradación)
Complejación	Combinación de aniones y cationes en una sustancia compleja	Afecta la especiación que puede afectar la sorción, la solubilidad, etc.
Hidrólisis/sustitución	Reacción de un compuesto con el agua o con un ion componente del agua (hidrólisis) o con otro ion (sustitución)	Hace que un compuesto orgánico sea más susceptible a biodegradación y más soluble
Oxidación/reducción (redox)	Reacciones que involucran la transferencia de electrones	Mecanismos de atenuación importantes para controlar la precipitación de metales
Cosolvación	Es el efecto de la mezcla de compuestos orgánicos y solventes orgánicos que pudieran aumentar la solubilidad de los contaminantes	Aumenta la movilidad de sustancias orgánicas, al hacerlas más solubles
Biodegradación	Reacciones controladas por microorganismos	Mecanismo de atenuación importante para compuestos orgánicos; sin embargo, pueden producirse subproductos indeseables (más dañinos). Influye en procesos como hidrólisis y sustitución, oxidación/reducción y ácido/base

(ISSMFE, 1997)

Los procesos de adsorción, decaimiento radiactivo, precipitación, hidrólisis, y biodegradación generalmente son considerados como procesos de atenuación, en los que la masa del contaminante es removida de la fase acuosa. Sin embargo, en algunos casos, algunos de estos mecanismos pueden no ser efectivos para reducir el posible impacto negativo que pudieran provocar los contaminantes. Por ejemplo, la biodegradación de un compuesto orgánico puede tener como subproductos compuestos orgánicos que pueden representar un impacto ambiental más adverso. La desorción o disolución de un contaminante, previamente adsorbido o previamente precipitado, puede resultar en peores impactos ambientales negativos.

Capítulo 3

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL EN UN SITIO POTENCIALMENTE CONTAMINADO

La evaluación ambiental de un sitio potencialmente contaminado puede llevarse a cabo como una secuencia planeada y organizada de actividades, que permitan determinar la naturaleza y distribución de contaminantes en la superficie y en el subsuelo del sitio, que ha sido identificado como potencialmente contaminado (Hobson, 1993).

Al principio de la evaluación ambiental deben establecerse sus objetivos, que pueden ser: (ASTM, 1995)

- a) Dar una propuesta inicial de solución al problema de contaminación
- b) Comparar los resultados con criterios y niveles de limpieza generales o específicos del sitio
- c) Determinar los niveles de limpieza y compararlos con los resultados de la evaluación

Alcanzar los objetivos planteados implicará un costo económico, el cual depende del grado de detalle con el que se realizará la investigación. Para aprovechar de la mejor manera los recursos con los que se cuenta es conveniente realizar el estudio en niveles, que orienten la decisión (realizar una investigación más detallada o proceder de acuerdo a los resultados obtenidos).

Es recomendable realizar la evaluación de la contaminación ambiental de un sitio en tres niveles; debido a que el costo de la evaluación aumenta con los niveles, pero se espera que a mayor nivel de investigación el costo de la rehabilitación disminuya. Los tres niveles son: (ASTM, 1995; 1998)

- a) El *nivel 1* implica niveles de limpieza generales, muy estrictos y pocos datos
- b) El *nivel 2* comprende límites simples, específicos del sitio, es estricto basándose en modelos simples y en datos limitados
- c) El *nivel 3* es menos estricto, y para obtener los límites de limpieza específicos del sitio emplea más datos y modelos más complicados.

La diferencia de costos en la rehabilitación se debe a que los criterios de limpieza en el primer nivel son mucho más estrictos que en los niveles 2 ó 3.

Independientemente del nivel de la evaluación, ésta debe llevarse a cabo de manera que se incluyan las siguientes etapas: (Hobson, 1993)

- a) *Evaluación preliminar*, que establece un modelo teórico del sitio mediante todo lo que ya se conoce acerca de él
- b) *Diseño del muestreo y análisis de muestras*, donde se planean las actividades a realizar durante el muestreo y análisis
- c) *Ejecución del muestreo y del análisis*, donde se lleva a cabo, de acuerdo al plan diseñado, la exploración física del lugar y las pruebas de laboratorio posteriores
- d) *Interpretación de los resultados obtenidos*, producirá un modelo teórico nuevo , más refinado

3.1. Evaluación preliminar

Al iniciar la investigación se debe: (Hess, 1993)

- a) Desarrollar una lista del material reunido
- b) Implantar un sistema para mantener ordenada la información
- c) Iniciar las peticiones de información a oficinas gubernamentales, y otros documentos que tardarán algún tiempo en obtenerse
- d) Realizar un croquis de la propiedad y las áreas que le rodean.

En la evaluación preliminar se recaba información de: los registros históricos de actividades y sucesos en el sitio y el área aledaña, el marco físico regional y detallado del sitio, los usos actuales y futuros del lugar, y los datos analíticos de estudios previos (ASTM, 1995; Hess, 1993; Hobson, 1993). Estos aspectos se tratan a detalle en las siguientes secciones.

3.1.1. Revisión de los registros históricos de actividades y sucesos en el sitio y el área aledaña

La identificación del uso histórico de la propiedad y del área aledaña permitirá reconocer las principales fuentes contaminantes y las sustancias químicas que sean de interés (por ser dañinos a la salud). La mayor parte de la información se obtiene de la revisión de registros de título, de registros de derrames y fugas, fotografías aéreas, documentos, planos históricos y la realización de entrevistas a propietarios, usuarios, residentes, personal, vecinos y sociedades (presentes y pasadas).

3.1.2. Marco físico regional del sitio

El conocimiento de la localización geográfica, información geológica, hidrogeológica, hidrológica, meteorológica y topográfica del sitio (que son el marco físico regional), es fundamental para inferir la potencial migración de contaminantes y las posibles rutas de exposición (suelo, agua superficial, agua subterránea y aire).

3.1.3. Marco físico a detalle del sitio

El conocimiento a mayor detalle permite afinar los datos reunidos antes, principalmente en la ubicación de las fuentes contaminantes y en la localización de las rutas de exposición. En esta etapa es importante la ubicación de estructuras, sistema de drenaje (canales, cursos de agua entubados, drenaje pasado y actual), de construcciones, tuberías y tanques de almacenamiento, y la observación de los materiales presentes de interés por su toxicidad y movilidad en el ambiente, por ejemplo: asbestos, pintura con plomo, plomo en el suministro de agua, radón, bifenilos policlorados en transformadores, plaguicidas, y campos electromagnéticos.

3.1.4. Usos actuales y futuros del lugar

El conocimiento acerca del uso del lugar permite identificar los receptores, humanos o ecológicos, actuales y futuros, de las sustancias contaminantes.

3.1.5. Reconocimiento del sitio y el área aledaña

Esta actividad es muy importante, se realiza para verificar la información obtenida de evidencia documental, detallarla y diseñar las etapas posteriores de investigación. Durante esta actividad se deben hacer las observaciones presentadas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Observaciones a realizar en el reconocimiento del sitio

Agua	Suelo	Aire	Construcciones y accesos	Disposición en el terreno de	Otros
Pozos de agua (clausurados)	Elevaciones del suelo		Tanques y tambos de almacenaje de sustancias químicas		Animales muertos
Fuentes de agua (depósitos, sistema de la ciudad, etc.)	Depresiones del terreno		Signos de antiguas estructuras superficiales	Residuos (por ejemplo de construcción)	Actividades de minería o extracción
Agua superficial (capas aceitosas superficiales)	Irregularidades en el terreno (signos de calentamiento, coloración o combustión)	Emisiones de gases y partículas	Sistema de suministro eléctrico		Materiales
Efluentes de edificios	Suelo deformado, manchas		Estructuras superficiales y otros edificios		Olores
	Vegetación pobre o sin ella		Vías de acceso y maniobra		Obtención de información útil para propósitos de planeación de los trabajos de campo
			Zonas de mantenimiento		

3.1.6. Datos analíticos obtenidos de estudios previos

Los datos analíticos obtenidos de estudios previos pueden ser muy útiles. Pero hay que realizar una evaluación de ellos que incluye un análisis de validez, suficiencia y sensibilidad de los datos. La validez analiza la calidad de los datos (el principio básico de “es mejor no tener datos que tenerlos erróneos” es aplicable a estas investigaciones). La suficiencia indica si la cantidad de los datos permiten alcanzar los objetivos de la investigación. La sensibilidad permite observar cuánto puede mejorar el resultado final al obtener más datos (LaGrega, 19996).

3.2. Diseño de muestreo y análisis en laboratorio

En el diseño del muestreo y análisis en laboratorio se realiza el plan de actividades para obtener datos de muestreo y analíticos, mediante la identificación de la información requerida, los problemas y limitaciones (por ejemplo: acceso, servicios, recursos, etc.) y la estrategia de exploración, muestreo, análisis e interpretación (Hobson, 1993).

Para determinar cuántos y qué datos de muestreo y analíticos son más adecuados en la refinación del modelo teórico del sitio, es fundamental identificar los contaminantes de interés, evaluar los datos disponibles, observar el modelo conceptual del sitio y los objetivos de la investigación (Byrnes, 1994; Hobson, 1993; LaGrega, 1996).

3.2.1. Información requerida en la investigación

El nivel de la evaluación ambiental del sitio contaminado establecerá el tipo de información que se requiere (ASTM, 1995):

- a) *Nivel 1*, ubicación de las concentraciones máximas de los contaminantes de interés
- b) *Nivel 2*, características geológicas e hidrogeológicas específicas del sitio, distribución espacial de las sustancias químicas de interés, variaciones de las concentraciones en el tiempo (se mantienen estables, aumentan, o disminuyen), y, concentraciones de contaminantes de interés en los puntos de exposición
- c) *Nivel 3*, información adicional para el uso de modelos matemáticos que describan las características de los medios (agua subterránea, aire, agua superficial y suelo), y el comportamiento de los contaminantes en ellos

Además, de establecer el tipo de información requerida por cada nivel de evaluación, es necesario, sin tener en cuenta el nivel, definir: tipo de muestreo, calidad y cantidad de datos.

3.2.1.1. Tipos de muestras

En el muestreo se pueden distinguir diferentes tipos de muestras, dependiendo del medio y los tipos de ensayos, por ejemplo: las muestras de aire, agua (superficial y subterránea), suelo (las destinadas a ensayos químicos, físicos o geotécnicos), sedimentos, lodos, materiales, flora y fauna, residuos y, en algunos casos, muestreo de la población humana (LaGrega, 1996).

Los tipos de muestras pueden clasificarse también dependiendo de si son de una fuente o de las rutas de migración de los contaminantes.

El muestreo implica más información que la que proporciona la recolección de muestras físicas, incluye también otros datos, por ejemplo: condiciones meteorológicas, como la temperatura, presión, precipitación, velocidad del viento y humedad.

3.2.1.2. Calidad de los datos de campo y laboratorio

Se refiere principalmente a la exactitud y precisión que tienen los datos en su recolección. La USEPA ha definido cinco niveles de calidad: (Byrnes, 1994)

En el *nivel I*, los datos son recogidos con instrumentos para investigación preliminar en campo, tales como analizador de vapor orgánico, medidor de explosividad, etc. Los resultados analíticos obtenidos de esta manera son útiles porque proporcionan resultados rápidamente.

En el *nivel II*, los datos son colectados en el campo usando instrumentos analíticos más específicos, tales como cromatógrafo de gases instalado en un laboratorio móvil. La calidad de los datos generados en este nivel depende del uso de los estándares de calibración convenientes, materiales de referencia, y preparación del equipo de muestreo. Los resultados analíticos en este nivel están disponibles generalmente, en tiempo real, o en pocas horas.

En el *nivel III*, todos los análisis son realizados en un laboratorio analítico fuera del sitio. En este nivel, por definición, no es necesario utilizar la validación de documentación de procedimientos requeridos para análisis del nivel IV.

En el *nivel IV*, todos los análisis son ejecutados en un laboratorio fuera del sitio y con protocolos adecuados. Este nivel es caracterizado por procedimientos rigurosos y documentos de Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad (QA/QC Quality Assurance/Quality Control).

En el *nivel V*, los análisis son elaborados por métodos no estandarizados en un laboratorio fuera del sitio, incluso puede requerirse el desarrollo de métodos o modificaciones para alcanzar límites de detección requeridos en el estudio.

De acuerdo a los objetivos de la investigación y la incertidumbre, la probabilidad aceptable de tomar una decisión errónea establecerá el nivel de calidad de datos requerido.

Algunas de las formas más comunes de contaminación de una muestra, durante el muestreo son el uso de herramientas de muestreo inapropiadas o contaminadas, empleo de una botella de muestreo contaminada, e incorrecta preservación de la muestra.

Para asegurar que los datos colectados en el campo sean representativos y validos, deben verificarse varios controles de calidad. Ejemplos de estas verificaciones son: uso de estándares de muestreo en campo; verificación de datos de muestreo por una persona independiente; estricto apego a los procedimientos de custodia; documentación de calibración de instrumentos; recolección de replicas, blancos de campo, y muestras de enjuague de equipos; y, uso de blancos de transporte.

Además, es muy importante establecer los límites de detección del método analítico seleccionado, para estimar la calidad de los datos.

3.2.1.3. Cantidad de datos

La USEPA reconoce tres metodologías generales en la realización del muestreo: (Byrnes, 1994)

- a) **Muestreo parcial (juzgado)**, involucra elección de ubicaciones de muestreo con base en el conocimiento incuestionable de liberación de contaminantes. Este procedimiento tiende a sesgar los datos obtenidos hacia las concentraciones más altas de contaminantes. En general, se realiza alrededor de áreas conocidas o que se sospecha están contaminadas, para definir su extensión
- b) **Muestreo sistemático**, involucra la recolección de muestras ubicadas de acuerdo con un esquema predeterminado de muestreo (líneas o una malla). Las muestras colectadas de esta manera son imparciales, y pueden usarse para modelar o calcular el promedio de la concentración de los contaminantes en el sitio. En el muestreo sistemático las muestras son tomadas en las intersecciones de la malla. Este método es muy recomendable en áreas donde se tiene poca información
- c) **Muestreo al azar**, se usa un esquema al azar, como una tabla de números aleatorios, para elegir la ubicación del muestreo en cada celda de una malla. El muestreo al azar es más usado en sitios donde se espera que la distribución espacial de contaminantes sea muy variable. Como el muestreo sistemático, este tipo de muestreo es ejecutado en áreas donde se cuenta con poca información.

Una vez identificada la contaminación en un punto (con un esquema al azar o sistemático), deben realizarse más puntos de muestreo, para definir su extensión. Esto puede realizarse con muestreo parcial, al azar o sistemático, empleando un espacio más pequeño entre mallas.

Para determinar el espaciamiento apropiado de la malla, se debe considerar que:

- a) Es necesario conocer el tamaño aproximado y la forma de la zona contaminada
 b) Cualquier muestra colectada en la zona de contaminación sea representativa

3.2.2. Problemas y limitaciones en el muestreo y análisis

Es necesario reconocer los problemas y limitaciones presentes en el lugar, además de los recursos con los que se cuenta, para establecer una estrategia de muestreo y análisis. En la tabla 3.2 se presenta una recopilación de estos factores.

Tabla 3.2. Problemas y limitaciones en el muestreo y análisis

Muestreo	Análisis en el laboratorio
<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad en el acceso de equipo • Falta de energía • Falta de espacio • Costo • Tipo de sustancias presentes • Temporada del año 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de los reactivos • Disponibilidad de equipo para las determinaciones • Costo • Tipo de sustancias presentes

3.2.3. Estrategia de exploración, muestreo y análisis

La estrategia de muestreo y análisis se puede definir en diversos planes:

- a) El de muestreo y análisis,
- b) De seguridad e higiene, y
- c) De manejo de los residuos generados durante la investigación.

3.2.3.1. Plan de muestreo y análisis

Su propósito es programar los recursos (personal, equipo y servicios de laboratorio), y para su preparación se requiere un conocimiento global del sitio, sus alrededores, además de la naturaleza de la posible contaminación y los peligros que puede implicar (EPA/540, 1992, citado por Izcapa 1998).

En la planificación se especifican los requerimientos administrativos y logísticos, los sitios, tipos y número de muestras a tomar y los procedimientos de análisis (en campo o laboratorio) y muestreo. Cuando sea posible, se especificaran éstos con referencia a procedimientos estandarizados.

El plan de muestreo y análisis tienen dos componentes:

- a) Plan de aseguramiento de calidad y
- b) Plan de muestreo en campo

El propósito del primero es describir las obligaciones políticas, la organización y las actividades funcionales de aseguramiento de calidad y control de calidad necesarios para alcanzar los objetivos de calidad de los datos (DQOs, por sus siglas en inglés), sus principales elementos se mencionan en la tabla 3.3 (Byrnes, 1993).

Tabla 3.3. Elementos para garantizar la calidad de los datos

Muestreo	Análisis en laboratorio	Interpretación de resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos • Procedimientos y documentos de custodia de muestras • Procedimientos y frecuencia de calibración de equipos • Mantenimiento preventivo de equipos • Acciones correctivas para el control de calidad, si se observaron errores en el muestreo al revisar los datos 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos y frecuencia de calibración de equipos • Procedimientos analíticos • Mantenimiento preventivo de equipos • Acciones correctivas para control de calidad, cuando se advirtieron errores en el laboratorio al examinar los datos 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de datos, validación, y reporte • Verificación de control de calidad interno • Interferencias de sistema y ejecución • Procedimientos de evaluación de los datos medidos • Reportes para manejo de aseguramiento de la calidad

(Byrnes, 1993)

El plan de muestreo en campo debe ser un documento corto y conciso, además de utilizar tablas de resumen. La información que debe proporcionar se indica en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Información proporcionada por el plan de muestreo en campo

Datos	Procedimientos	Otros
<ul style="list-style-type: none"> • Información de fondo del sitio • Resumen de contaminantes de interés 	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción de herramientas y metodología de muestreo • Resumen de los análisis a realizarse • Requerimientos de botellas y preservación • Tiempos para mantener las propiedades analíticas • Métodos analíticos y límites de detección requeridos • Procedimientos de muestreo en campo • Procedimientos de descontaminación • Detalles de cómo manejar los residuos generados durante la investigación 	<ul style="list-style-type: none"> • Resumen de DQOs (objetivos de calidad de los datos) • Planos de ubicación del muestreo • Explicación de los puntos de muestreo escogidos • Detalles de documentación requerida • Descripción del sistema de numeración de muestras

(modificado de Byrnes, 1993)

Es conveniente que el muestreo se realice por etapas, mejorando gradualmente el nivel en la calidad de los datos; la etapa inicial, mediante el uso de tecnologías de investigación preliminar (niveles I y II de calidad). Después, para disponer de más información acerca de la fuente y la extensión de la contaminación y con ayuda de los datos obtenidos en los muestreos previos, se colectan muestras para análisis en el laboratorio (calidades nivel III y IV). Colectar los datos de esta manera es mejor desde el punto de vista costo-beneficio.

3.2.3.2. Plan de higiene y seguridad

Su propósito es establecer los requerimientos y procedimientos para proteger la salud y la seguridad del personal de investigación y del público cercano al sitio. Debe especificar los niveles de protección necesarios para cada actividad en el campo, proporcionando instrucciones detalladas sobre operaciones de rutina y respuesta en situaciones de emergencia, listar el personal de seguridad clave y describir los requerimientos de monitoreo, de salud y seguridad (EPA/540,1992, Ob. Cit. por Izcapa 1998).

3.2.3.3. Plan de manejo de los residuos generados durante la evaluación

Presenta la descripción de las actividades y métodos de manejo de los residuos para cumplir con las leyes generales, proteger la salud humana o del ambiente y minimizar la generación de tales residuos.

3.2.4. Definición de estrategia de interpretación

En esta etapa se revisan los parámetros de precisión, exactitud, representatividad, veracidad y comparación de la información recabada.

Precisión, definida como la medida de la cercanía entre medidas individuales. Es afectada por factores de muestreo y analíticos, el efecto analítico sobre la precisión es más fácilmente controlado que el efecto de muestreo debido al ambiente.

Exactitud, definida como la medida de la cercanía de las medidas al valor verdadero. También es afectada por factores de muestreo y analíticos

La representatividad refleja el grado en que la muestra representa precisa y exactamente: características de una población, variaciones de parámetros en un punto de muestreo, o una condición ambiental. Representatividad es un parámetro cualitativo que está relacionado principalmente con el propio diseño del programa de muestreo. Este criterio se satisface mejor al coleccionar un número suficiente de muestras, y al asignar cuidadosamente las ubicaciones de muestreo en puntos representativos.

Veracidad es un término que se refiere al porcentaje de medidas determinadas como válidas.

La comparación es un parámetro cualitativo que expresa la confianza con la cual un dato puede ser comparado con otro. Este parámetro está limitado por los otros parámetros porque los datos son comparados confiablemente sólo cuando se conocen la precisión y la exactitud.

Todos los parámetros antes mencionados son indicadores de calidad de los datos. En una situación ideal, las metas de precisión numérica, exactitud, y comparación deben establecerse y éstas ayudarán a elegir la técnica analítica más apropiada. Sin embargo, debido a que los ambientes del sitio son tan diferentes, no es práctico establecer metas universales de los parámetros. Para ello, la USEPA recomienda que la precisión histórica y la exactitud alcanzada por diferentes técnicas analíticas debe revisarse para ayudar a seleccionar la técnica analítica más apropiada (Byrnes, 1993).

3.3. Ejecución del muestreo y análisis

En esta etapa se lleva a cabo la exploración física del sitio y las subsecuentes pruebas de laboratorio sometidas al plan diseñado; pero sin olvidar que en esta etapa se pueden presentar imprevistos, por lo que los planes mencionados anteriormente deben ser lo suficientemente flexibles para ajustarse a tales situaciones.

3.4. Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados ayudará a establecer un nuevo modelo teórico, más refinado, del lugar. En tal modelo se deben reunir y resumir todos los datos, para: evaluar las características del sitio y de la fuente, advertir la presencia de contaminación en diferentes medios (agua superficial, agua subterránea, aire, suelo); e identificar los receptores actuales o potencialmente expuestos a la contaminación.

Asimismo, se preparará un reporte de la naturaleza y la historia del manejo de los residuos en el sitio, las sustancias peligrosas detectadas, las rutas de migración de estas sustancias y el impacto sobre los seres humanos y el ambiente.

Al revisar la información presentada en el modelo teórico refinado y en el reporte, y al comparar las concentraciones de los contaminantes presentes con los niveles permisibles máximos establecidos se podrá saber qué contaminantes existen en la zona de estudio y cuáles exceden los límites permisibles. Siguiendo, a lo anterior, la toma de decisión de las acciones a realizar para resolver el problema de contaminación.

Capítulo 4

REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS; CRITERIOS BASADOS EN RIESGO A LA SALUD

La evaluación ambiental de un sitio potencialmente contaminado busca encontrar soluciones a la problemática que presentaría el lugar, para todos los seres vivos en él y al ambiente, por los contaminantes presentes, ya sea que estos receptores potenciales se encuentren en el mismo lugar o que el contaminante migre hasta donde se ubican.

La decisión de la acción en respuesta al problema de contaminación potencial en un sitio, debe tomar en cuenta, entre otras cosas:

- a) Los criterios y niveles de limpieza con base en riesgos a la salud, que indican “que tan limpio es limpio”
- b) Las alternativas de rehabilitación adecuadas, de acuerdo a las características del sitio y los contaminantes presentes

En este capítulo se tratan a detalle estos puntos.

4.1. Criterios y niveles de limpieza

Los criterios y los niveles de limpieza para suelos contaminados que se presentan a continuación, tienen diferentes fundamentos: (Buonicore, 1996)

- a) Limpieza a niveles de fondo
- b) Limpieza a niveles establecidos por los límites de detección
- c) Limpieza a niveles de no detección
- d) Limpieza a niveles establecidos por la mejor capacidad demostrada por una tecnología de rehabilitación
- e) Limpieza a niveles establecidos por precedentes
- f) Limpieza a estándares existentes
- g) Limpieza a niveles protectores, a individuos potencialmente expuestos como los establecidos por una evaluación de riesgo, y
- h) Combinación de los anteriores

A continuación, se explica a detalle cada caso.

4.1.1. Limpieza a niveles de fondo

Se refiere a restablecer las condiciones existentes en el sitio antes de que ocurriera la contaminación, ésta es una meta lógica; sin embargo, determinar cuál es ese nivel previo tiene algunas limitaciones, (por ejemplo: al muestrear en el área inmediata a la zona contaminada se pueden presentar variaciones entre los valores encontrados) (Buonicore, 1996).

Caracterizar la calidad de fondo (basal) en agua subterránea y suelo es bastante complicado, debido a la cantidad de muestras y datos que se requieren. En suelo, no se ha identificado cuál es la mejor manera de caracterizar un área particular, para compararla con otra área. No obstante, pueden emplearse técnicas geoestadísticas para el mejor aprovechamiento de los datos.

4.1.2. Limpieza a límites de detección

Se pueden establecer los niveles de limpieza, para contaminantes en suelo, de acuerdo a la capacidad del equipo analítico empleado para detectar estos contaminantes; sin embargo, puede haber variabilidades considerables en diferentes laboratorios, dependiendo del equipo analítico usado y del protocolo de análisis (Buonicore, 1996).

4.1.3. Limpieza a niveles de no detección

La limpieza a estos niveles implica que los suelos contaminados deben limpiarse a niveles menores que los límites de detección de las sustancias peligrosas involucradas por los equipos analíticos (Buonicore, 1996).

4.1.4. Niveles de limpieza basados en la tecnología de rehabilitación

La capacidad de rehabilitación de la tecnología disponible puede ayudar a cuantificar un nivel aceptable de limpieza.

4.1.5. Niveles de limpieza establecidos por precedentes

Se refiere a considerar los niveles alcanzados por alguna tecnología ya aplicada, en determinado sitio, y que proporcione buenos resultados.

4.1.6. Limpieza establecida por estándares y reglamentos existentes

Muchas agencias federales y estatales en diversos países han desarrollado y promulgado regulaciones definiendo los niveles aceptables de contaminación en agua subterránea y suelo.

4.1.7. Limpieza con base en riesgo a la salud

Este criterio se expone más a detalle a continuación, al presentar primero como se realiza una evaluación de riesgo y posteriormente cómo se determinan los niveles de limpieza con base en riesgo a la salud.

4.2. Evaluación del riesgo

La evaluación de riesgo es el proceso para estimar la probabilidad de que un evento ocurra y la magnitud probable de sus efectos adversos (ya sean estos económicos, relacionados a la salud y seguridad o ecológicos), en un periodo de tiempo especificado. También, debe incluir la estimación de las incertidumbres inherentes en el proceso de determinar el riesgo (Gerba, 1996; LaGrega, 1996).

Cuando el resultado del daño se puede cuantificar, el riesgo se puede calcular como la probabilidad de que una acción ocurra, multiplicado por la severidad del daño, si la acción se produce. Cuando la consecuencia no es cuantificable, el riesgo se define como la probabilidad de que el daño ocurra.

Se pueden encontrar tres tipos de riesgo: (LaGrega, 1996)

- a) *De fondo*: al que están expuestas las personas en ausencia de una fuente particular
- b) *Incremental*: el causado por una fuente
- c) *Total*: la suma de los dos anteriores

El proceso de evaluación de riesgo consiste de cuatro etapas: (LaGrega, 1996)

- a) *Identificación del problema*, consiste en la definición del problema y la naturaleza del daño, en el caso de un sitio contaminado consistiría en la identificación de las sustancias peligrosas.
- b) *Evaluación de la exposición*, se trata acerca del transporte y destino de los contaminantes, los receptores potenciales y las vías de exposición.
- c) *Evaluación de la toxicidad*, se trata de cuantificar los efectos adversos originados por la exposición a un agente peligroso, con base en el grado de exposición y determinando las constantes numéricas de toxicidad para calcular el riesgo.
- d) *Caracterización del riesgo* consiste en estimar la magnitud del impacto potencial del peligro y la incertidumbre de la estimación, basándose en la severidad de sus efectos y la cantidad de exposición.

4.2.1. Propósitos de la evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo a la salud en un sitio contaminado permite obtener información para el proceso de toma de decisiones y la evaluación de las consecuencias de las posibles acciones para enfrentar el problema de contaminación.

Las principales decisiones que podrían tomarse con las estimaciones del riesgo son:

- a) Selección de opciones de tratamiento o disposición de residuos
- b) Rehabilitación de los lugares contaminados
- c) Reducción en la generación de residuos
- d) Establecimiento de nuevas instalaciones
- e) Desarrollo de nuevos productos

Además, en las decisiones sobre sitios contaminados, también deben considerarse factores políticos, económicos y sociales.

Otra aplicación, en la rehabilitación de sitios contaminados, es el establecimiento de niveles de limpieza. Las evaluaciones de riesgo se utilizan para determinar "qué tan limpio es limpio". En este caso, el procedimiento de cálculo se invierte. Comienza con la definición numérica del riesgo aceptable y se retrocede al nivel de contaminación que producirá este valor de riesgo.

La evaluación de riesgo proporciona información para decidir qué tan urgente es el problema, y dónde se ubican las fuentes del riesgo. Los resultados de la evaluación de riesgo se emplean para establecer los objetivos de las acciones a llevar a cabo (rehabilitación o control), y las reducciones en el riesgo, con los recursos disponibles, al determinar las fuentes o situaciones donde éste se presenta.

Las cuatro etapas del proceso de evaluación de riesgo se describirán con detalle en las siguientes secciones.

4.2.2. Identificación del problema

El primer paso en la evaluación de riesgo consiste en determinar la naturaleza del problema. En un sitio contaminado puede haber muchas sustancias presentes, por lo tanto es necesario examinar los datos de todos los contaminantes detectados, para observar cuáles sustancias químicas son de mayor interés (por su toxicidad y movilidad en el ambiente) (LaGrega, 1996).

El examen de los contaminantes se realiza para tener conocimiento de cuáles son las sustancias químicas presentes, sus propiedades, su concentración, su distribución espacial y su movilidad, desde el sitio hasta los puntos de exposición potencial (Gerba, 1996).

En la selección se consideran las sustancias químicas que representan el mayor riesgo en el sitio: las más tóxicas, persistentes y móviles, las más frecuentes en concentración y distribución espacial, y las involucradas en las exposiciones más representativas.

4.2.3. Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición es el proceso de medición o estimación de la intensidad, frecuencia, y duración de la exposición humana al agente ambiental, que representa riesgo. Esta etapa involucra: (LaGrega, 1996)

- a) Identificación de las fuentes de contaminación y la distribución espacial de los contaminantes en el sitio
- b) Análisis de las formas de liberación de las sustancias de interés
- c) Estimación de la forma de migración del contaminante, desde la fuente hasta un receptor potencial
- d) Identificación de los receptores potenciales
- e) Estimación de las exposiciones a corto y largo plazo
- f) Concentraciones en el punto de exposición
- g) Dosis de exposición

4.2.3.1. Identificación de las fuentes de contaminación y la distribución espacial de los contaminantes en el sitio

Las fuentes de contaminación son puntos donde se origina la contaminación; en ellos se liberan sustancias que, después, por las características locales del contaminante y el medio, pueden migrar hasta ponerse en contacto con receptores potenciales.

Además de identificar las fuentes de contaminación, se debe describir la distribución espacial de los contaminantes en el sitio; es decir, un modelo bidimensional o tridimensional de las concentraciones de los contaminantes presentes en el lugar en estudio.

4.2.3.2. Análisis de las formas de liberación de las sustancias de interés

Las formas en que se liberan los contaminantes (solubilización, volatilización, biodegradación, etc.) del medio en que se encuentran son parte de su transporte y destino.

4.2.3.3. Migración del contaminante de la fuente hasta un receptor potencial

Es el transporte del contaminante ya sea disuelto, sorbido, en forma gaseosa o de materia particulada, desde la fuente hasta un receptor potencial, por la acción del viento y el agua.

4.2.3.4. Identificación de las poblaciones receptoras

Las poblaciones que podrían estar expuestas son:

- a) La población que, actualmente o en el futuro, vive o trabaja en el sitio
- b) La población vecina al sitio o una población de interés especial, por ser sensible a determinados contaminantes
- c) Trabajadores futuros en el sitio durante cualquier rehabilitación

La información demográfica acerca del número de habitantes en el sitio y fuera de él, en zonas cercanas; así como, el uso de suelo que tenga el sitio y las áreas aledañas ayuda a identificar las poblaciones potencialmente expuestas.

4.2.3.5. Estimación de las exposiciones a corto y largo plazo

En la evaluación de riesgo a la salud es importante contar con información referente a las condiciones en las que se presenta la exposición, de los receptores a los contaminantes. Para ello, se realiza la evaluación de los usos actuales y futuros del sitio. Las hipótesis de exposición más comunes son: la del trabajador, la del infractor (quien entra al sitio sin autorización), la del uso residencial, la del uso recreativo, y de trabajadores de la construcción.

4.2.3.6. Concentraciones en los puntos de exposición

El punto de exposición es el lugar donde se ubica el receptor potencial, y puede estar fuera del sitio contaminado. Para determinar el riesgo a tal población se deben estimar las concentraciones de los contaminantes en tales puntos; lo cual se hace teniendo conocimiento de las concentraciones de los contaminantes en el lugar contaminado, las características de los medios en los que están presentes, los procesos de transporte y destino de las sustancias, además de la ubicación y características de los puntos de exposición.

4.2.3.7. Dosis del receptor

El último paso en la etapa de evaluación de la exposición es estimar las dosis de los diferentes sustancias químicas de interés a los que los receptores están potencialmente expuestos en los puntos de exposición (LaGrega, 1996).

Se consideran tres vías de exposición:

- a) Ingestión oral
- b) Inhalación de vapores y partículas
- c) Contacto dérmico

También hay tres tipos de dosis: la dosis de exposición (cantidad ingerida, inhalada o en contacto con la piel), la dosis de ingestión (cantidad adsorbida por el cuerpo), y la

dosis efectiva (la cantidad que alcanza el órgano objetivo). Para calcular los riesgos, las dosis deberían estar en la misma forma que la relación dosis – respuesta publicada, para la sustancia química y la vía de estudio.

Para determinar la dosis de exposición a los contaminantes se consideran factores como peso corporal del receptor, frecuencia y duración de la exposición (crónica, subcrónica o aguda).

En el apéndice 1 se presentan las consideraciones en las que se basan las expresiones para calcular la dosis de exposición, y en las secciones siguientes de este capítulo se muestran las fórmulas para el cálculo.

4.2.3.7.1. Dosis de receptor en zona con uso de suelo residencial

Debido a que la tasa de contacto con suelo es diferente para niños que para adultos, cuando se considera uso de suelo residencial, el riesgo debido a la ingestión directa de suelo es calculado usando un factor de ajuste por edad (F_{aj}), tomando en consideración las diferentes tasas de contacto diario, peso corporal, y duraciones de la exposición (USEPA, 1989).

En la tabla 4.1 se presenta la descripción de las variables empleadas en las fórmulas que a continuación se exponen.

$$F_{aj} = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}} \quad \dots \quad 4.1$$

El factor anterior se aplica sólo cuando el uso de suelo es residencial, en caso de un análisis con uso de suelo comercial o industrial y para trabajador de la construcción no se emplea este factor pues se considera que no hay niños expuestos.

El cálculo de la dosis administrada se resume en la siguiente ecuación general, que se puede emplear para determinar la dosis de exposición a suelo en una zona residencial:

$$DExp = \frac{C \times FE \times F_{ajsuelo}}{TM} \quad \dots \quad 4.2$$

La dosis de exposición por inhalación de sustancias volátiles y de partículas, en una zona residencial, se calcula de la siguiente manera:

$$DExp_{in} = \frac{C \times FE \times F_{ajinhalación} \times (FV + FEP)}{TM} \quad \dots \quad 4.3$$

El factor de volatilización se puede calcular con la relación siguiente: (ASTM, 1995)

$$FV = \frac{2 \times a \times \rho_s}{V_{\text{viento}} \times h \times \tau} \times \sqrt{\frac{D_{ei} \times H}{\pi(\theta_w + Koc \times foc \times \rho_s + H \times \theta_a)} \tau} \times 10^{-2} \quad \dots 4.4$$

El factor de emisión de partículas se calcula de la siguiente manera: (ASTM, 1995)

$$FEP = \frac{T_{ep} \times a}{V_{\text{viento}} \times h} \quad \dots 4.5$$

El cálculo de la dosis de exposición diaria por contacto dérmico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{\text{ajdérmico}}}{TM} \times 10^{-6} \quad \dots 4.6$$

Una vez que se han determinado las dosis de exposición en las vías de exposición oral y de contacto dérmico, se suman para obtener una sola y, posteriormente, poder calcular el riesgo.

Debido a que el agua subterránea del sitio es empleada como fuente de abastecimiento de agua potable, se debe analizar la exposición debida a lixiviación de contaminantes del suelo hacia el agua subterránea. El cálculo de la dosis de exposición debida al consumo de agua, proveniente del acuífero, se realiza mediante la siguiente expresión: (ASTM, 1995; GSI, 1998)

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times F_{\text{ajagua}}}{TM} \times FL \quad \dots 4.7$$

$$FL = \frac{\rho_s \times L_1}{(\theta_w + Kd \times \rho_s + H \theta_a) \times L_2} \quad \dots 4.8$$

Tabla 4.1. Descripción de las variables empleadas en las fórmulas para la determinación de la dosis de exposición

a = ancho del área contaminada paralelo a la dirección del viento, m;
A = área de piel expuesta, cm ² ;
ABP = tasa de absorción de la piel, fracción decimal;
AD = adherencia de polvo, mg/cm ² ;
C = concentración en el punto de exposición; mg/kg;
$D_{ei} = D_{aire} \times \frac{\theta_a^{3.33}}{n^2} + D_{agua} \times \frac{\theta_w^{3.33}}{Hn^2}$
D _{agua} = coeficiente de difusión en agua, cm ² /s;
D _{aire} = coeficiente de difusión en aire, cm ² /s;
DE _{adultos} = duración de la exposición adultos, años;
D _{ei} = difusividad efectiva, cm ² /s;
DE _{niños} = duración de la exposición niños, años;
DE _{exp} = dosis de exposición, mg/kg de peso/día;
DE _{exp,agua} = dosis de exposición debida al consumo de agua subterránea, mg/kg de peso/día;
DE _{exp,CD} = dosis de exposición por contacto dérmico, mg/kg de peso-día;
DE _{exp,in} = dosis de exposición por inhalación, mg/kg de peso-día;
F _{aj} = factor de ajuste por la edad (dependiente del medio), kg-año/kg-día, m ³ -año/kg-día, l-año/kg-día;
F _{aj,agua} = factor de ajuste por edad en consumo de agua, l-año/kg-día; (fórmula 4.1)
F _{aj,dérmico} = factor de ajuste dérmico por la edad, año/kg = DE _{niños} /PC _{niños} + DE _{adultos} /PC _{adultos}
F _{aj,inhalación} = factor de ajuste por la edad para inhalación, m ³ -año/kg-día (fórmula 4.1);
F _{aj,suelo} = factor de ajuste por la edad para dosis de exposición de suelo, kg-año/kg-día, (fórmula 4.1)
FE = frecuencia de la exposición, días/año;
FEP = factor de emisión de partículas, kg/m ³ (fórmula 4.5);
FL = factor de lixiviación, (mg/l)/(mg/kg) (fórmula 4.8)
foc = contenido de carbono orgánico en el suelo, fracción;
FV = factor de volatilización, kg/m ³ (fórmula 4.4);
h = altura de difusión, m;
H = constante de la ley de Henry, (cm ³ -agua)/(cm ³ -aire);
Kd = Koc x foc; (mg/kg)/(mg/l)
Koc = coeficiente de distribución carbono orgánico, cm ³ /g;
L ₁ = espesor del suelo contaminado, m;
L ₂ = distancia de la superficie superior del suelo afectado al nivel freático, m
MS = efecto de la matriz de suelo, fracción decimal;
n = porosidad del suelo, m ³ /m ³ ;
PC _{adultos} = peso corporal adultos, kg
PC _{niños} = peso corporal niños, kg;
R = nivel de riesgo considerado;
TC _{adultos} = tasa de contacto adultos, kg/día;
TC _{niños} = tasa de contacto niños, kg/día, m ³ /día, l/día;
T _{ep} = tasa de emisión de partículas, g/cm ² -s;
TM = tiempo medio, días = TP x 365 días/año;
TP = tiempo promedio de vida, años
V _{viento} = velocidad del viento en la zona de mezclado, m/s;
π = constante = 3.1416
θ _a = contenido volumétrico de aire en el suelo, m ³ /m ³ ;
θ _w = contenido volumétrico de agua en el suelo, m ³ /m ³ ;
ρ _s = peso volumétrico del suelo, kg/m ³ ;
τ = tiempo promedio de flujo de vapor, s;

4.2.3.7.2. Dosis del receptor en zona de uso de suelo comercial/industrial, y para trabajadores de la construcción

En el caso de realizar el análisis de riesgo a la salud, para una zona de uso de suelo comercial/industrial o para exposición de trabajadores de la construcción, las ecuaciones empleadas son semejantes a las anteriores, pero no se emplea el factor de ajuste por la edad. En las siguientes líneas se presentan las expresiones matemáticas para los cálculos. En cuanto a los factores de volatilización, de emisión de partículas y lixiviación se emplean las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.8, respectivamente.

En la tabla 4.1 se presenta la descripción de las variables empleadas en las fórmulas que a continuación se exponen.

El cálculo de la dosis administrada, para determinar la dosis de exposición a contaminantes en el suelo, es: (LaGrega, 1996)

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM} \quad \dots \quad 4.9$$

La dosis de exposición por inhalación de sustancias volátiles y de partículas se calcula de la siguiente manera: (ASTM, 1995)

$$D_{Exp_{in}} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM} \quad \dots \quad 4.10$$

El cálculo de la dosis de exposición diaria por contacto dérmico se calcula mediante la siguiente expresión: (LaGrega, 1996)

$$D_{Exp_{CD}} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6} \quad \dots \quad 4.11$$

El cálculo de la dosis de exposición por consumo de agua subterránea, que podría estar contaminada con la lixiviación del suelo hacia el acuífero es:

$$D_{Exp_{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL \quad \dots \quad 4.12$$

4.2.3.7.3. Parámetros de exposición a emplear

Con frecuencia, los parámetros de exposición se pueden encontrar en la bibliografía. En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones para definir muchos

de los parámetros básicos, como la superficie de piel, tasas de contacto a suelos y tasas de inhalación. Los parámetros recomendados por la USEPA son: (USEPA, 1989)

Tabla 4.2. Parámetros de exposición recomendados por la USEPA (1989)

Parámetro/unidades	Niños (1-6 años)	Adultos
TC = Tasa de contacto		
suelo, mg/día	200	100
aire, m ³ /día		20
agua, l/día		2
FE = Frecuencia de exposición, días/año	350	350/ uso residencial 250/ uso industrial o comercial 180/trabajador de la construcción
DE = Duración de la exposición, años	6	30/ usos residencial, industrial o comercial 1/trabajador de la construcción
PC = Peso corporal promedio, kg	15	70
TP = Tiempo promedio de vida, años		70 para efectos cancerígenos DE para efectos no cancerígenos
A = Superficie de piel expuesta, cm²		3160
AD = Adherencia de polvo, mg/cm²		0.5
ABP = Tasa de absorción de la piel,		0.5 compuestos orgánicos volátiles 0.05 hidrocarburos poliaromáticos 0.001 metales
MS = Efecto de la matriz de suelo,		1

4.2.4. Evaluación de la toxicidad

Esta etapa del proceso de evaluación del riesgo define la toxicidad (es decir, la relación dosis – respuesta) para cada sustancia química de interés. El resultado toma la forma de una constante matemática para insertarla en las ecuaciones de cálculo de riesgo. Además, la valoración de toxicidad debería analizar la incertidumbre inherente a estas constantes y describir cómo esta incertidumbre afecta a las estimaciones del riesgo (LaGrega, 1996).

Desde el punto de vista del análisis de riesgo se puede clasificar a los contaminantes como cancerígenos o no cancerígenos, pues la metodología de análisis es diferente entre estos dos tipos de sustancias contaminantes.

La USEPA ha clasificado a las sustancias químicas por ser cancerígenos de la manera siguiente: (Buonicore, 1996)

Tabla 4.3. Clasificación de los contaminantes por su potencial cancerígeno

Clase	Descripción	Comentarios
A	Cancerígeno humano	Evidencias suficientes en estudios epidemiológicos para soportar la asociación causal entre la exposición y el cáncer
B1	Probable cancerígeno humano	Evidencias limitadas en estudios epidemiológicos humanos pero evidencias suficientes de estudios en animales para soportar la asociación causal entre la exposición y el cáncer
B2	Probable cancerígeno humano	Evidencias inadecuadas o inexistentes en estudios epidemiológicos en humanos pero suficiente evidencia de estudios en animales
C	Posible cancerígeno humano	Evidencias limitadas en animales e inadecuados o sin datos en humanos para soportar la asociación causal entre la exposición y el cáncer
D	No clasificado como cancerígeno humano	Inadecuadas o sin evidencias en humanos o animales
E	No es cancerígeno	Evidencia de que no es cancerígeno humano

4.2.4.1. Factores de pendiente para sustancias cancerígenas

Convencionalmente, las relaciones dosis - respuesta se refieren a la ocurrencia de la ~~dosis contra producción de cáncer~~ (es decir, la probabilidad de cáncer en la vida). La pendiente, conocida como factor de pendiente, representa la potencia cancerígena de una sustancia química. Se calcula con el límite superior de confianza al 95% de la curva dosis - respuesta y se expresa como el inverso de la dosis. Por tanto, la probabilidad de cáncer para una exposición dada se calcula multiplicando el factor de pendiente por la dosis.

4.2.4.2. Dosis de referencia para las sustancias no cancerígenas

A diferencia de las sustancias cancerígenas, las no cancerígenas exhiben un efecto umbral. Es decir, por debajo de una dosis específica no son capaces de inducir algún efecto adverso sobre la salud de las poblaciones expuestas. Este umbral se define como la dosis de referencia, que es la ingestión diaria estimada que no causa efectos sobre la salud (LaGrega, 1996).

El cociente de peligrosidad es la unidad estándar para cuantificar el riesgo no cancerígeno de una sustancia química particular. Este es la relación entre la dosis de exposición diaria estimada de la sustancia tóxica y su dosis de referencia recomendada. Un cociente superior a 1.0 indicaría la posibilidad de un efecto adverso de la exposición sobre la salud.

4.2.5. Caracterización del riesgo

La última etapa, de la evaluación del riesgo sobre la salud humana, es la estimación de los riesgos. Consiste, en parte en calcular las estimaciones cuantitativas tanto de los riesgos no cancerígenos como de los cancerígenos para los receptores de todas las hipótesis de exposición consideradas. Generalmente, las estimaciones se calculan para

las tres vías de exposición y para el individuo con máxima exposición, así como para la población expuesta más probable.

4.2.5.1. Riesgo cancerígeno

El riesgo cancerígeno se puede definir como la dosis de exposición diaria crónica multiplicada por el factor de pendiente. El producto es el aumento de probabilidad de cáncer en vida por la exposición a esta sustancia química, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$Riesgo = D_{Exp} \times SF$ 4.13
------------------------------	------------

donde:

D_{Exp} = dosis de exposición diaria crónica, mg/kg/día;

SF = factor de pendiente cancerígena (slope factor), (mg/kg-día)⁻¹

4.2.5.2. Riesgo no cancerígeno

El riesgo no cancerígeno se caracteriza normalmente en términos de un cociente de peligrosidad. Este cociente es la relación entre la dosis de exposición estimada y la dosis de referencia (RfD). Las dosis de referencia dependen de la vía de exposición y se pueden utilizar únicamente con datos de exposición para la misma vía. El cociente de peligrosidad se calcula de la siguiente manera: (LaGrega, 1996)

$CP = \frac{D_{Exp}}{RfD}$ 4.14
----------------------------	------------

donde:

CP = cociente de peligrosidad, adimensional

D_{Exp} = dosis de exposición diaria crónica, mg/kg/día

RfD = dosis de referencia, mg/kg/día

La dosis de referencia es el nivel admisible de dosis de exposición, por ello es aceptable un cociente de peligrosidad menor que uno. Cualquier exposición implica varias sustancias, y se debe calcular este cociente para cada sustancia química de interés en cada ruta y vía de exposición.

Si se conocen bien los mecanismos de la acción tóxica de diferentes sustancias químicas no cancerígenas, es preferible sumar los cocientes de peligrosidad cuando las sustancias atacan a un mismo órgano.

4.2.6. Incertidumbre inherente en el cálculo de riesgos

En el cálculo de riesgo es muy importante examinar y explicar el grado de incertidumbre asociado a tales estimaciones.

Los métodos utilizados en cada una de las cuatro etapas de evaluación de riesgo tienen deficiencias que pueden provocar un alto grado de incertidumbre, y por tanto, afectar la validez de los resultados.

La identificación del problema se basa en datos de los límites de detección, la identificación y cuantificación pueden provocar errores.

La evaluación de exposiciones futuras depende, de manera importante, de los modelos de destino y transporte, las estimaciones de la capacidad de las alternativas de rehabilitación, los proyectos para el uso de suelo, así como de las suposiciones acerca de la frecuencia y duración de la exposición. Cada uno es un origen potencial de incertidumbre. La etapa de evaluación de la toxicidad tiene un elevado grado de incertidumbre asociada a los factores de pendiente y las dosis de referencia.

Por último, en el cálculo del riesgo no es posible enumerar cada resultado concebible y se utilizan hipótesis de exposición factibles de los peores casos.

Las técnicas matemáticas, como la simulación del modelo de Monte Carlo, se pueden utilizar para evaluar la incertidumbre y sensibilidad de las respuestas finales para un parámetro individual cuando se estima la exposición. Esto es particularmente importante en evaluaciones que estudian muchas vías.

4.3. Criterios y niveles de limpieza basados en riesgo a la salud

Los criterios de limpieza pueden basarse en la especificación de un riesgo a la salud aceptable o tolerable. Estos criterios se basan en el riesgo a la salud humana, aunque también puede ser útil la evaluación del riesgo ecológico. La especificación de riesgo aceptable es una decisión socio-política, y convertir este riesgo en un nivel específico de limpieza de un sitio particular es complicado (Buonicure, 1996).

Cuando se especifica el nivel de limpieza deseado se deben realizar consideraciones conservadoras, y tomar en cuenta las opiniones de los expertos. El valor obtenido es un nivel de concentración que, si ocurre la exposición, resultaría en un valor de riesgo aceptable.

Los cálculos de los niveles de limpieza se basan en los resultados de la evaluación de riesgo específica del sitio o dependen de los requerimientos de un sitio particular. En cualquier caso, la investigación elegida debe ser tan simple como sea posible. Una investigación simple protegerá la salud, y generalmente es más aceptada por las autoridades que una investigación complicada; sin embargo, puede ser demasiado exigente. Una investigación más detallada produce valores que son menos conservadores, pero pueden ser rechazados.

Para la concentración permisible o nivel de limpieza que considere el riesgo por tres vías de exposición (ingestión, inhalación de vapores y partículas, además de contacto

dérmico) con suelo, en el sitio de estudio, se tienen las siguientes ecuaciones que se aplican considerando el uso de suelo de la zona y la carcinogénesis del contaminante de interés (empleando los factores de pendiente y las dosis de referencia).

En el apéndice 1 se presentan las consideraciones en las que se basan las expresiones mostradas en las siguientes secciones, y en la tabla 4.4 se presenta una descripción de las variables empleadas.

4.3.1. Zona de uso de suelo residencial

La ecuación para riesgo no cancerígeno en zona de uso de suelo residencial, por ingestión, inhalación de vapores y partículas, y contacto dérmico, es:

$$C_m = \frac{CP_{ac} \times TM}{FE \times \left[\frac{F_{ajsuelo} + F_{ajdérmico} \times A \times AD \times ABP \times MS \times 10^{-6}}{RfD_0} + \frac{F_{ajaire} \times (FV + FEP)}{RfD_1} \right]} \dots 4.15$$

El factor de pendiente en (mg/kg/día)⁻¹ puede usarse en la siguiente fórmula, para determinar el nivel de acción para contaminantes cancerígenos, en una zona de uso residencial para las diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de vapores y partículas, y contacto dérmico):

$$C_m = \frac{R_{ac} \times TM}{FE \times \left[(SF_0 \times (F_{ajsuelo} + F_{ajdérmico} \times A \times AD \times ABP \times MS \times 10^{-6})) + (SF_1 \times F_{ajaire} \times (FV + FEP)) \right]} \dots 4.16$$

La concentración permisible, de contaminantes no cancerígenos, en el suelo de uso residencial debida a la lixiviación de contaminantes en el suelo hacia el agua subterránea, se calcula mediante la siguiente expresión: (ASTM, 1995)

$$C_m = \frac{CP_{ac} \times RfD_0 \times TM}{FE \times F_{ajagua} \times FL} \dots 4.17$$

El nivel de limpieza para sustancias cancerígenas en suelo de uso residencial, por lixiviación de contaminantes del suelo hacia el agua subterránea, se calcula de la siguiente manera: (ASTM, 1995)

$$C_m = \frac{R_{ac} \times TM}{SF_0 \times FE \times F_{ajagua} \times FL} \dots 4.18$$

4.3.2. Zona de uso de suelo comercial, industrial o con trabajadores de la construcción

Las concentraciones permisibles en el suelo contaminado (considerando el riesgo a la salud por ingestión de suelo, inhalación de vapores y partículas, y contacto dérmico, para sustancias no cancerígenas) es:

$$C_m = \frac{CP_{ac} \times PC \times TM}{FE \times DE \times \left[\frac{TC_{suelo} + A \times AD \times ABP \times MS \times 10^{-6}}{RfD_0} + \frac{TC_{aire} \times (FV + FEP)}{RfD_1} \right]} \quad \dots 4.19$$

El nivel de limpieza para cancerígenos por ingestión de suelo, inhalación de vapores y partículas, y contacto dérmico, se puede calcular como sigue:

$$C_m = \frac{R_{ac} \times PC \times TM}{FE \times DE \left[(SF_0 \times (TC_{suelo} + A \times AD \times ABP \times MS \times 10^{-6})) + (SF_1 \times TC_{aire} \times (FV + FEP)) \right]} \quad \dots 4.20$$

El nivel de acción para contaminantes no cancerígenos en suelo de uso comercial/industrial, por lixiviación al agua subterránea se calcula de la siguiente manera: (ASTM, 1995)

$$C_m = \frac{CP_{ac} \times RfD_0 \times PC \times TM}{TC_{agua} \times FE \times DE \times FL} \quad \dots 4.21$$

El cálculo para sustancias cancerígenas se realiza mediante la expresión: (ASTM, 1995)

$$C_m = \frac{R_{ac} \times PC \times TM}{SF_0 \times TC_{agua} \times FE \times DE \times FL} \quad \dots 4.22$$

Tabla 4.4. Descripción de las variables empleadas en las expresiones para la determinación de las concentraciones límite con base en riesgo a la salud

A = área de piel expuesta, cm ² ;
ABP = tasa de absorción de la piel, fracción decimal;
AD = adherencia de polvo, mg/cm ² ;
C _m = nivel medio de acción, mg/kg;
CP _{ac} = cociente de peligrosidad aceptable = 1, adimensional;
DE = duración de la exposición, años;
F _{ajagua} = factor de ajuste por edad en consumo de agua, l-año/kg-día; (fórmula 4.1)
F _{ajdérmico} = factor de ajuste dérmico por la edad, año/kg = DE _{niños} /PC _{niños} + DE _{adultos} /PC _{adultos}
F _{ajinhalación} = factor de ajuste por la edad para inhalación, m ³ -año/kg-día (fórmula 4.1);
F _{ajsuelo} = factor de ajuste por la edad para dosis de exposición de suelo, kg-año/kg-día, (fórmula 4.1)
FE = frecuencia de la exposición, días/año;
FEP = factor de emisión de partículas, kg/m ³ (fórmula 4.5);
FL = factor de lixiviación, (mg/l)/(mg/kg) (fórmula 4.8)
FV = factor de volatilización, kg/m ³ (fórmula 4.4);
MS = efecto de la matriz de suelo, fracción decimal;
PC = peso corporal, kg
R _{ac} = nivel de riesgo aceptable;
RfD ₀ = dosis de referencia oral, mg/kg/día
RfD ₁ = dosis de referencia para inhalación, mg/kg/día
SF ₀ = factor de pendiente oral, (mg/kg/día) ⁻¹
SF ₁ = factor de pendiente por inhalación, (mg/kg/día) ⁻¹
TC _{suelo} = tasa de contacto con el suelo, kg/día;
TC _{aire} = tasa de contacto con el aire, m ³ /día,
TC _{agua} = tasa de contacto con agua, l/día,
TM = tiempo medio, días = TP x 365 días/año;
TP = tiempo promedio de vida, años

4.4. Tecnologías de rehabilitación

Después de realizar la evaluación ambiental de un sitio potencialmente contaminado, y conociendo los niveles de limpieza, se elegirá las acciones más adecuadas para resolver el problema. En un principio, se puede decidir que no se necesita rehabilitar o rehabilitación por atenuación natural o rehabilitación por alguna de las tecnologías existentes.

Se decide que no se requiere rehabilitación cuando la evaluación ambiental del sitio y la evaluación de riesgo indica que el riesgo que representa el sitio es aceptable, y que se cumplen con los niveles de limpieza establecidos específicamente para el lugar.

La atenuación natural se elegirá como la opción adecuada cuando el riesgo que no es aceptable sólo se presenta para un punto de exposición potencial, es decir, que aun no existe.

La decisión de que se requiere utilizar alguna tecnología o control se adoptará cuando el impacto de la contaminación sea sobre un receptor actual.

Algunas de las diferentes tecnologías de rehabilitación que se conocen son:

- a) Atenuación natural
- b) Biorremediación
- c) Deshalogenación
- d) Desorción térmica
- e) Estabilización – solidificación
- f) Extracción de vapor
- g) Tratamiento térmico (incineración, pirólisis y gasificación)
- h) Lavado de suelos
- i) Muros o uso de barreras (geomembranas, arcilla)
- j) Técnica electrocinética
- k) Tratamientos químicos
- l) Vitrificación

4.4.1. Atenuación natural

La atenuación natural aprovecha procesos naturales para contener y reducir la contaminación en los lugares afectados. Es un método de tratamiento “in situ” (USEPA, 1996b).

Los procesos de atenuación natural pueden reducir la masa del contaminante (por procesos de biodegradación y transformaciones químicas), reducir su concentración (mediante dilución o dispersión) o unir los contaminantes a partículas de suelo para que la contaminación no migre o se extienda.

4.4.2. Biorremediación

La biorremediación consiste en el uso de microorganismos (levaduras, hongos o bacterias), naturales o microorganismos desarrollados con biotecnología, para degradar sustancias peligrosas en sustancias menos tóxicas o que no sean tóxicas (USEPA, 1996h).

Puede ser una tecnología aplicada en el sitio (“in situ”) o fuera del sitio (“ex situ”). Esta tecnología ha mostrado que puede ser efectiva degradando o transformando gran variedad de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos solubles son los que pueden ser tratados por biorremediación.

4.4.3. Deshalogenación

La deshalogenación es un proceso químico para retirar los halógenos de un contaminante, volviéndolo menos peligroso. Esta tecnología se aplica “ex situ”, es decir, es necesario excavar el suelo contaminado. Se pueden usar dos procesos químicos para la deshalogenación: (USEPA, 1996e)

- a) *Deshalogenación con glicolatos*. Se usa un reactivo que contiene dos componentes: un hidróxido de metales alcalinos y glicol polietilénico. El proceso consiste en mezclar y calentar la tierra contaminada con el reactivo. Durante el calentamiento, el hidróxido de metal alcalino reacciona con el halógeno del contaminante, formando una sal que no es tóxica, y el glicol polietilénico ocupa el lugar del halógeno en la molécula de la sustancia tóxica, volviéndolo menos peligroso.
- b) *Descomposición catalizada por bases*. En este proceso se trata el suelo contaminado agregándole bicarbonato de sodio, se les mezcla y calienta en un reactor.

4.4.4. Desorción térmica

La desorción térmica es una tecnología para tratar suelos contaminados con residuos peligrosos, calentándolo a temperaturas de 90°C a 540°C con el fin de vaporizar los contaminantes que tienen un punto de ebullición en estas temperaturas, y así separarlos del suelo. Los contaminantes vaporizados se deben recoger y tratar en un sistema para tratamiento de emisiones (USEPA, 1996f).

4.4.5. Estabilización – solidificación

El proceso de estabilización-solidificación reduce la movilidad, física y química de sustancias peligrosas en el ambiente, al contener o inmovilizar los contaminantes en lugar de removerlos.

La estabilización involucra las reacciones químicas entre el agente estabilizante y los contaminantes a inmovilizar, y se refiere a las técnicas que reducen el grado de potencial peligrosidad de los residuos o del suelo contaminado, mediante la transformación de los contaminantes a sus formas menos solubles.

La solidificación es el proceso donde los contaminantes se encierran o inmovilizan físicamente, pero no necesariamente con enlaces químicos para estabilizar la masa del material. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan el residuo en un monolito sólido de alta integridad estructural. La encapsulación puede ser de partículas finas (microencapsulación) o de un bloque o recipiente de residuos (macroencapsulación) (Malone y Lundquist, 1994).

Los procesos de estabilización-solidificación se clasifican de acuerdo al aditivo o aglutinante principal que se añade al residuo o al suelo, en: tecnologías que utilizan cemento como base, tecnologías que emplean cal como base, proceso de encapsulación termoplástica, técnicas que utilizan un polímero orgánico como base.

4.4.6. Extracción de vapor

La extracción de vapor implica un proceso para separar físicamente los contaminantes volátiles del suelo, aunque también se pueden extraer algunos compuestos orgánicos semivolátiles. Por medio de un sistema de pozos subterráneos se crea un vacío y los contaminantes ascienden a la superficie en forma de vapor o gas. A menudo, además de los pozos de extracción se instalan pozos de inyección de aire para aumentar la corriente de aire y mejorar la tasa de remoción del contaminante. Otra ventaja de introducir aire en el suelo es que se estimula la biodegradación de algunos contaminantes (USEPA, 1996g).

4.4.7. Incineración

La incineración es un proceso térmico por medio del cual los materiales contaminados se exponen a calor excesivo en algún tipo de incinerador, horno rotatorio o de lecho fluidizado. Mediante este proceso los contaminantes se destruyen térmicamente por calentamiento. Dependiendo de la intensidad los contaminantes, se evaporan y/o se destruyen, las temperaturas de operación están entre 870°C y 1370°C. Las sustancias tóxicas se reducen a elementos básicos como hidrógeno, carbono, cloro, nitrógeno, etcétera, los cuales se combinan con el oxígeno para formar sustancias como agua, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, también se producen cenizas inertes, materia orgánica particulada, ácido clorhídrico, pequeñas concentraciones de materiales orgánicos y óxidos metálicos. Generalmente se obtienen una eficiencia de destrucción del 99.99%. Las cenizas generadas deben llevarse a sitios de disposición final (Izcapa, 1998).

4.4.8. Lavado de suelos

El lavado de suelos puede aplicarse en el sitio o fuera de él, es una tecnología que consiste en inundar suelos contaminados con una solución que remueve los contaminantes y los lleva hasta donde puedan extraerse. La solución de lavado depende de los contaminantes presentes en el suelo. Puede ser: (a) solamente agua, y (b) agua con aditivos como ácidos, bases o agentes tensoactivos (USEPA, 1996a).

El agua se emplea para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en ésta. Las soluciones ácidas se usan para extraer metales y contaminantes orgánicos. Las soluciones básicas se usan para tratar fenoles y algunos metales. Los agentes tensoactivos facilitan la mezcla de contaminantes que no se mezclan y ayudan a retirar contaminantes aceitosos.

4.4.9. Muros y barreras

Su propósito es aislar los contaminantes con el fin de detener su migración y evitar con ello el avance de la mancha contaminante en la dirección horizontal y en la dirección vertical hacia el acuífero (Iturbe y Castro, 1998).

Los muros verticales se instalan en el subsuelo para controlar el movimiento horizontal del agua subterránea y contaminantes.

4.4.10. Técnica electrocinética

Consiste en la aplicación de una corriente directa a través del suelo, entre dos o más electrodos. La corriente moviliza las especies cargadas, partículas y iones en el agua en los poros, por los siguientes procesos: (Iturbe y Castro, 1998)

- a) Electromigración (transporte de especies químicas cargadas bajo un gradiente eléctrico)
- b) Electroósmosis (transporte del fluido de los poros bajo un gradiente hidráulico)
- c) Electroforesis (reacciones químicas asociadas con el campo eléctrico)
- d) Acidificación del suelo por el transporte del protón (H^+) generado por electrólisis del agua en el ánodo

En este proceso se genera un medio ácido en el ánodo y un medio alcalino en el cátodo.

4.4.11. Tratamientos químicos

Las sustancias químicas tienen la capacidad de alterar la naturaleza de los materiales. Algunos procesos químicos modifican los materiales peligrosos de manera que se vuelven no tóxicos. En algunos casos se pueden complementar los métodos químicos y biológicos. Los principales tratamientos químicos son: (Izcapa, 1998)

- a) *Oxido – reducción química.* Consiste en la transferencia de electrones de una sustancia a otra. Para obtener una reducción correcta se debe controlar el pH específico de la reacción y la agitación
- b) *Neutralización*
- c) *Oxidación húmeda con aire*

4.4.12. Vitrificación

El proceso consiste en convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable parecido al vidrio. Consiste en introducir electrodos dentro del suelo contaminado que contiene cantidades importantes de silicatos. Las superficies de los electrodos se conectan al suelo por medio del grafito, se aplica una corriente eléctrica muy alta que pasa a través de los electrodos, el grafito y el suelo se

funden como resultado de la elevada temperatura. Es necesario atrapar los gases y vapores que escapan debido la evaporación. Una vez que se enfría el suelo. Los contaminantes quedan químicamente enlazados por el calor dentro del vidrio formado. Las temperaturas de operación son del intervalo entre 1600 y 1990°C, y funciona hasta 15 m de profundidad.

4.5. Análisis de las alternativas de rehabilitación

Existen muchos y complicados factores que influyen en la selección de una alternativa de rehabilitación.

El proceso por el que se realiza la selección es muy importante para asegurar que se recopila y considera toda la información esencial. Seleccionar un sistema de rehabilitación es equivalente a “resolver un problema” y un modelo que se emplea en un proceso clásico es el de la figura 4.1

La figura 4.2 muestra una aplicación del esquema para resolver un problema a la selección de un sistema de rehabilitación para un sitio contaminado. Es un proceso en etapas que ayuda a realizar un análisis intensivo, descartando alternativas inadecuadas y detallando las más convenientes.

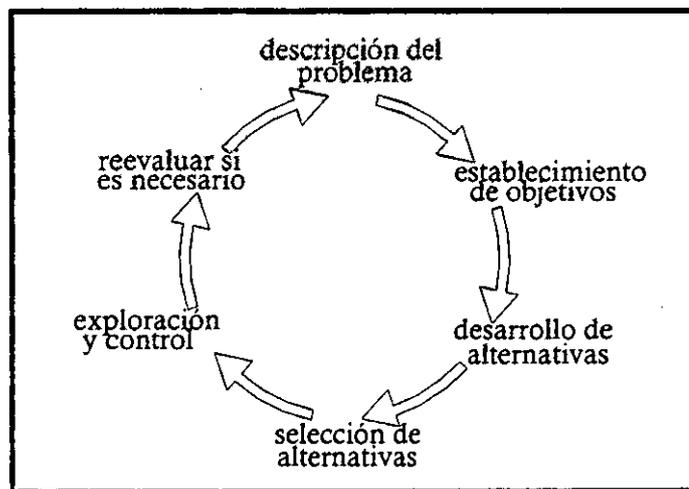


Figura 4.1. Metodología de solución de un problema
(LaGrega, 1996)

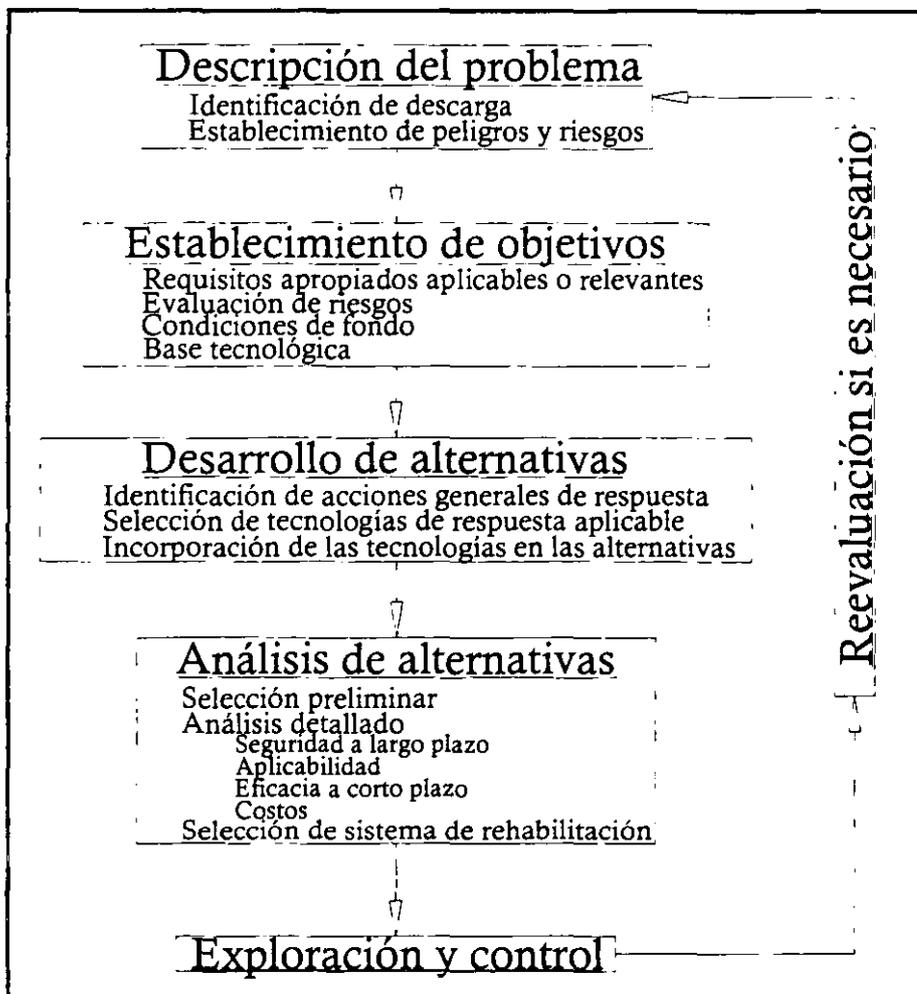


Figura 4.2. Resolución del problema de selección de la alternativa de rehabilitación (LaGrega, 1996)

4.5.1. Descripción del problema

La descripción del problema es la identificación de los contaminantes de interés por su riesgo a la salud y el posible contacto de alguna población con éstos. Es necesario relacionar las sustancias químicas de interés con las exposiciones futuras y las existentes. Esto se hace al señalar las fuentes, las rutas de exposición, las vías de exposición y los receptores.

4.5.2 Establecimiento de objetivos

Proteger la salud humana y el ambiente es el objetivo que toda alternativa de rehabilitación debe satisfacer. Se deben establecer objetivos específicos que pueden ser los criterios de limpieza descritos en este capítulo.

4.5.3 Desarrollo de alternativas

El desarrollo de alternativas se realiza en cinco etapas: (LaGrega, 1996)

- a) *Identificación de las acciones generales de respuesta para cada objetivo.* Una acción general de respuesta es una descripción de las acciones de rehabilitación que cumplirán el objetivo. Puede consistir de varias tecnologías.
- b) *Caracterización del medio a rehabilitar.* Esta etapa consiste en cuantificar la extensión de los distintos medios a los que se dirige la rehabilitación. Esto es solo un valor estimado, de acuerdo con la acción general de respuesta y con la suficiente precisión para permitir el dimensionamiento de las tecnologías.
- c) *Identificación de las tecnologías potenciales.* Es la determinación de qué tecnologías de respuesta son potencialmente aplicables.
- d) *Selección de las tecnologías potenciales.* La USEPA ha definido criterios que deben considerarse en la evaluación de las alternativas de restauración, para seleccionar la más adecuada, estos criterios son: (a) efectividad y permanencia a largo plazo, (b) reducción de la toxicidad, movilidad o volumen de contaminantes, (c) efectividad a corto plazo, (d) factibilidad, (e) costo, (f) aceptación de las autoridades, (g) aceptación de la comunidad (USEPA, 1990) (HWSRM, 1994) (ambos citados por Izcapa, 1998)
- e) *Incorporación de las tecnologías seleccionadas a las alternativas.* Un conjunto de tecnologías puede formar una alternativa de respuesta que cumplirá con el objetivo de la rehabilitación.

4.5.4 Análisis de alternativas

El análisis de las alternativas abarca una selección preliminar, una descripción del diseño del grupo final de alternativas, análisis de los criterios mencionados en el punto (d) del desarrollo de las alternativas, y elección de la tecnología preferida.

Capítulo 5

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS "TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS."

Históricamente, en México como en muchos otros países, el desarrollo tecnológico e industrial progresaba sin considerar la protección ambiental o aplicar medidas para prevenir la contaminación. Actualmente, se está presentando una creciente preocupación por la contaminación y los riesgos a la salud que ésta podría provocar. Por esta razón es importante evaluar los sitios contaminados que pueden presentar riesgo a la salud de las poblaciones aledañas, de los trabajadores, de flora y fauna en el lugar.

El desarrollo de la industria del ferrocarril desde finales del siglo XVIII hasta mediados del XIX ha influido de manera muy importante en el desarrollo económico y social del país, y de todo el mundo. La ciudad de Aguascalientes se convirtió en un centro ferrocarrilero de gran trascendencia en el sistema mexicano. Su tradición de ciudad ferrocarrilera data de fines del siglo XIX. Actualmente sigue siendo un sitio importante en la ruta de transporte del centro hacia el norte del país (Izcapa, Fernández y González, 1998).

En los talleres de FNM en esta ciudad se llevaron a cabo actividades de mantenimiento y reparación de equipo de arrastre (carros y coches); y proporcionaba abasto de combustible y agua a las locomotoras que llegaban a la estación. Debido a las actividades que se realizaron y la falta de prácticas adecuadas se contaminó el lugar, especialmente por hidrocarburos y metales pesados. Actualmente, el sitio está abandonado y las autoridades de FNM y la ciudad están tratando que parte importante del predio de los talleres sea propiedad de la ciudad. Las autoridades de la ciudad de Aguascalientes desean emplear el terreno con varios usos de suelo: habitacional, comercial y recreativo.

El presente estudio presenta la evaluación de la contaminación de los talleres mencionados para establecer si pudiese presentar riesgo importante a la salud de las personas en la vecindad del lugar, y para proponer alternativas de rehabilitación o control de la contaminación evitando riesgos a la salud.

La evaluación se realiza empleando la metodología descrita en el capítulo 3 (visitas de campo, pláticas con empleados y encargados, búsqueda de información, etc.), tomando en cuenta las propiedades del medio contaminado y de las sustancias presentes, capítulo 2. El riesgo a la salud que presenten los contaminantes para los receptores, en el lugar, se realiza empleando los procedimientos mencionados en el capítulo 4, estableciendo los criterios para decidir al nivel de limpieza al que debe llegarse.

5.1. Uso histórico de la propiedad y del área aledaña

La propiedad ha sido usada desde principio del siglo XX como taller de reparaciones de FNM. Para realizar la evaluación de lugar es necesario investigar las actividades realizadas en el sitio.

A continuación se presenta la cronología de los sucesos importantes para la evaluación ambiental del lugar: (Monroy, 1999; UAA, 1996)

- a) En 1897, se firma el convenio para construir los Talleres Generales de Reparación en Aguascalientes, Ags.
- b) En 1900, había 35,000 habitantes en la ciudad contra 100,000 en el estado
- c) En 1903, se concluye la construcción de los talleres, el más importante núcleo fabril de la región
- d) Se destinan 832,598 m² para las instalaciones de los talleres, la estación, la colonia ferrocarrilera y el deportivo ferrocarrilero
- e) En 1913, se puebla un nuevo sector de la ciudad, aledaño a los talleres
- f) A partir de 1959, se adquiere nueva maquinaria, y se remodelan y amplían los talleres
- g) De 1963 a 1969, se modernizaron los talleres, y hubo robo de materiales
- h) El arroyo, Los Arellano, se tapó entre 1967-1970
- i) Las calderas en la fundición que inicialmente usaban combustóleo se cambiaron a diesel
- j) Entre 1989 y 1993, se cancelan las fundiciones de fierro gris y de bronce
- k) A principio de la década de los 90's se removió una capa de 1.0 - 1.5 m de espesor de suelos, reportados como contaminados por diesel, de la zona de abasto, y se colocó en otra zona del mismo sitio
- l) En 1994, ya quedaban muy pocos trabajadores en el lugar (900)
- m) En 1997, los talleres prácticamente están abandonados

Además, es conveniente considerar la siguiente cronología en el uso de locomotoras:

- a) 1920: máquinas de vapor
- b) 1947 maquinaria diesel
- c) A partir de 1963: todas de diesel

Los combustibles para la maquinaria que se usaban en los talleres evolucionaron, de la siguiente manera: (Monroy, 1999)

- a) carbón
- b) combustóleo (se calentaba con vapor para mantenerlo líquido)
- c) diesel y chapopote (más líquido que el chapopote común)
- d) diesel de menor densidad y mayor volatilidad

5.2. Marco físico regional del sitio

Esta información es de utilidad para inferir la migración potencial de contaminantes. En el nivel 1 de investigación sólo se requerirá la información regional, sin embargo en los niveles 2 y 3 se requerirá información del marco físico a detalle.

5.2.1. Ubicación geográfica y población

El estado de Aguascalientes colinda al norte, noreste y oeste con el estado de Zacatecas; al sureste y sur con el estado de Jalisco. El estado está dividido en 11 municipios (figura 5.1) (INEGI, 1996).

El municipio de Aguascalientes se encuentra en la parte centro del estado. Tiene como coordenadas geográficas extremas: $22^{\circ} 04'$; $21^{\circ} 37'$ de latitud norte; $102^{\circ} 04'$, $102^{\circ} 35'$ de longitud oeste. Este municipio representa el 20.9% de la superficie del estado. Aguascalientes, la cabecera municipal del municipio con el mismo nombre tiene una altitud de 1870 metros sobre el nivel del mar.

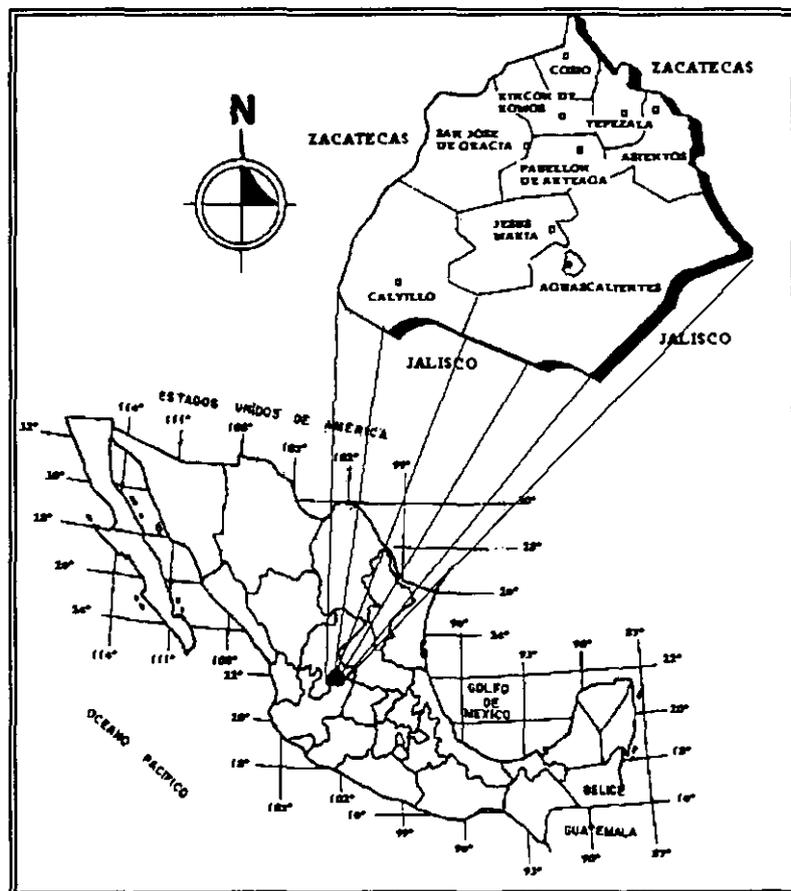


Figura 5.1. Localización del sitio de estudio (SARH, 1987)

Los talleres de FNM, están ubicados en la Av. 28 de agosto s/n en el Barrio de la Estación, C.P. 20030 en Aguascalientes, Ags. Actualmente, inmersos en la zona urbana; colindan con un centro deportivo y una zona habitacional hacia el sureste, y están rodeados de una zona mixta (habitacional, comercial e industrial) en las demás direcciones.

En 1995, el municipio tenía 582,827 habitantes, que representan el 68% de la población total de la entidad.

5.2.2. Fisiografía

El territorio oriental de la entidad (figura 5.2) está comprendido en la Mesa Central de la Provincia Fisiográfica del Altiplano, la parte del oeste pertenece a la Provincia de la Sierra Madre Occidental, y la porción central del Estado que corresponde al Valle del Río Aguascalientes (SARH, 1987).

La ciudad de Aguascalientes se ubica dentro del Valle del río Aguascalientes, este valle presenta configuración plana, con suaves lomeríos diseminados en algunas áreas y pendiente que crece hacia estribaciones de las sierras que lo flanquean, limitado al norte por la zona de Ojo Caliente, Zacatecas, al oriente por la Sierra de Tepezalá y la Meseta de El Llano, al sur por la zona de Encarnación Díaz, Jalisco, y al poniente por la Sierra Madre Occidental, con longitud de 80 Km, ancho medio de 12 Km y extensión superficial de unos 960 km², define la denominada Zona de Aguascalientes (SARH, 1987).

5.2.3. Geología

El marco geológico de la entidad está formado por rocas ígneas y sedimentarias que datan del Triásico al Cuaternario. En la zona de la ciudad de Aguascalientes se presenta roca de origen sedimentaria de la era Cuaternaria de unidad litológica aluvial, de pie monte y residuales, sueltos o medianamente compactos (SARH, 1987).

5.2.4. Hidrología

El estado de Aguascalientes es parte de la Cuenca del Río Santiago de la Región Geohidrológica N° 12, destacan en la red hidrográfica de la entidad el Río Aguascalientes, llamado también San Pedro, tributario del Río Verde, y el Río Calvillo afluente del Juchipila (figura 5.2).

agrícolas de la entidad, sustentados por la explotación intensiva de los recursos hidráulicos del subsuelo (figura 5.2) (SARH, 1987).

Alojado en el subsuelo de la zona de Aguascalientes, el acuífero homónimo que es el más grande e importante de la entidad, donde las perforaciones exploratorias han alcanzado profundidades mayores que 400 m sin llegar al fondo impermeable. Está constituido en su parte superior, esencialmente por materiales aluviales no consolidados como gravas, arenas, limos y arcillas que forman estratos interdigitados de geometría irregular, cuyo espesor varía desde unos cuantos metros en la periferia del valle hasta más de 150 metros hacia el centro del mismo, con predominio de los más gruesos y permeables en las proximidades de los cauces principales o en las partes altas de la zona; subyaciendo al relleno de aluvión, los conglomerados y las rocas ígneas fracturadas, con espesores de 200 a 300 m, conforman la parte inferior del acuífero, que disminuye en permeabilidad con la profundidad por efectos de consolidación, y en el área de Tepezalá se han encontrado rocas carbonatadas con características de calizas, cuya extensión y configuración en el subsuelo son poco conocidas.

Las rocas consolidadas de las montañas que flanquean o circundan los valles de la entidad, son en general poco permeables, pero donde están fracturadas y alteradas, funcionan como receptoras y transmisoras del agua que por ellas se infiltra, para la recarga de los almacenamientos subterráneos que se alojan en las partes bajas de las cuencas; las aluviones, los conglomerados y las rocas fracturadas, hidráulicamente interconectados, forman extensos mantos freáticos alojados en el subsuelo de los valles; los estratos de baja permeabilidad confinan y dividen localmente las formaciones del subsuelo susceptibles de almacenar agua, y las rocas sólidas compactas e impermeables de origen marino, constituyen el basamento que limita inferiormente los rellenos de acuíferos.

En la recarga de los acuíferos del estado de Aguascalientes, el 63.5%, lo constituyen la recarga natural directa, el 31.7%, corresponden a las aportaciones inducidas por los retornos de riego, vasos de almacenamiento y efluentes residuales de las poblaciones, y los restantes sólo el 4.8% representan la porción minoritaria que ingresa subterráneamente procedente del estado de Zacatecas, como recarga natural indirecta. En cuanto a la aportación subterránea procedente del estado de Zacatecas, ésta ha variado a lo largo del tiempo, dependiendo de la extracción y de la consiguiente posición relativa de los niveles acuíferos en ambos lados del límite interestatal.

5.2.5.2. Descarga de aguas subterráneas

El caudal base de los ríos es prácticamente nulo, y como la evapotranspiración ha sido también reducida, por causa de la eliminación directa e indirecta de la vegetación, puede afirmarse que en la actualidad las descargas de los acuíferos, en su gran mayoría, corresponde a la que artificialmente se realiza a través de pozos y norias (SARH, 1987).

5.2.5.3. *Movimiento del agua subterránea*

Con el transcurso del tiempo el crecimiento de los asentamientos humanos, de las áreas de producción agropecuaria y de los centros de la industria, la explotación intensiva de los recursos geohidrológicos, ha modificado gradualmente el comportamiento del agua en el subsuelo, ya que el abatimiento de los niveles por causa de la extracción, al orientar el sentido predominante del flujo subterráneo hacia las concentraciones del bombeo, ha disminuido y agotado los caudales que antes circulaban con destino a las zonas de descarga natural, dando lugar incluso al fenómeno inverso. El flujo del agua subterránea se ha interpretado con una dirección norte-sur (SARH, 1987).

5.2.5.4. *Niveles piezométricos*

La posición de los niveles del agua con respecto a la superficie del terreno, que varía desde unos cuantos metros hasta más de 120, está gobernada por la distribución de la recarga y del bombeo, por la configuración topografía y por las características hidráulicas de los acuíferos (SARH, 1987).

En la zona de Aguascalientes los niveles del agua subterránea se encuentran en general a profundidades entre 15 y 110 metros, de 35 a 80 metros en las áreas agrícolas, a más de 100 metros en la zona urbana de la Ciudad de Aguascalientes y sus proximidades, y a menos de 35 metros en el área del distrito de riego de Pabellón.

5.2.5.5. *Uso actual del agua subterránea*

El agua subterránea en el estado de Aguascalientes, se utiliza para fines diversos, entre los que destaca el riego agrícola, siguiendo en orden decreciente por la magnitud de los volúmenes que a ellos se destinan, el abastecimiento público urbano, y, en mínima proporción, de otros pequeños centros de población; los numerosos núcleos habitados, plantas pecuarias, granjas y establos diseminados por toda la entidad, y, por último, las zonas fabriles e instalaciones industriales, ubicadas fuera de los centros urbanos.

5.2.6. **Climatología**

El clima es semiseco semicálido (BS1h). La temperatura promedio es de 18.1° C. En enero con 13.2 ° C se presenta la temperatura promedio mensual mínima y la mensual máxima en mayo con 22.2° C.

La precipitación promedio anual es de 521.4 mm, con un mínimo de 3.9 mm en el mes de marzo y un máximo de 123.7 en agosto. Con 7 u ocho días de heladas al año en promedio, principalmente se presentan en los meses de enero y diciembre (INEGI, 1996).

La dirección del viento dominante es sur a norte y su velocidad promedio 2.5 m/s (SMN, 1999).

5.2.7. Especies en peligro de extinción

En el sitio no hay especies en peligro de extinción, debido a estar inmerso en una zona urbana.

5.3. Reconocimiento del sitio

Durante esta actividad se realizaron las siguientes observaciones:

- a) Ubicación del sistema de drenaje principal (curso de agua entubado y desde cuando es así) porque puede ser un medio para el transporte de sustancias contaminantes. Se consiguió plano de este sistema, que se agrega a los planos de cada zona (figuras 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.15, 5.18 y 5.22).
- b) Observación de materiales de construcción y estructuras
- c) Verificación del uso de la laguna de "chapopote" (considerando el caso de que la laguna se usara para impermeabilizar los durmientes, podría contener creosota); no se uso para ello, se empleo como una laguna de disposición de diferentes residuos, principalmente hidrocarburos (diesel, aceite, solventes) y desechos sólidos.
- d) Verificación de la ubicación de los 19 barrenos perforados en el estudio previo y su posible reuso otra vez en la toma de información. No fue posible ubicar los barrenos en el campo.
- e) Ubicación de 9 pozos para abastecimiento de agua potable. Sólo se encontraron 3 de estos pozos, que están activos.
- f) Ubicación de tuberías de suministro de agua y de combustible. Se consiguió plano del sistema de suministro de agua, pero no el de combustibles. Las figuras 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.15, 5.18 y 5.22 presentan las líneas de agua.
- g) Comprobación de la presencia de material de excavación cercano a la laguna de "chapopote" (suelo removido de la zona de abastos que presenta diesel y aceite). Efectivamente se encuentra en este sitio el suelo contaminado removido de la ona de abasto (sección 5.1, inciso k). Tiene aproximadamente área de 10,000 m² y altura de 2 metros. En el apartado 6.1.9 se trata sobre la caracterización del suelo en esta zona.
- h) Identificación visual, y con información del personal, del tipo de residuos presentes y su composición. Por ejemplo, si son residuos de fundición ¿qué metales podría contener? y toma de muestras. Se identificaron sacos de polvo negro que contienen

carbón para el proceso de fundición, y los sacos de polvo blanco con abrasivos para limpiar las impurezas.

- i) Ubicación de acumulaciones de residuos; esto se presenta en las figuras 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.15, 5.18 y 5.22.

Además, se observó que debido a estar en un área urbana y haber tenido uso industrial no habrá problema para el acceso de equipo de muestreo y tratamiento, ni para suministro de recursos como agua y energía eléctrica.

5.4. Actividades industriales y comerciales

Las actividades industriales llevadas a cabo en los talleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, Ags. fueron:

- a) Operaciones de reparación y mantenimiento de carros y coches de ferrocarril, mantenimiento de locomotoras, y operaciones de transportación
- b) Operaciones de fundición de piezas de mantenimiento de maquinaria y equipo (fierro, bronce y zapatas)

5.4.1. Operaciones en la industria del ferrocarril

Estas operaciones pueden agruparse en tres categorías (USEPA, 1998a):

- a) *Reparación y mantenimiento de carros y coches de ferrocarril*, consisten en: limpieza de interiores y exteriores de los carros, desmantelamiento y aplicación de pintura a los carros, y mantenimiento y reparación de las partes de los carros de ferrocarril.
- b) *Mantenimiento de locomotoras*, estas operaciones involucran la limpieza, reparación, y mantenimiento de la maquinaria y carrocería de la locomotora.
- c) *Operaciones de transportación*, incluye todas las actividades asociadas con el movimiento de locomotoras y carros sobre una sección de camino, incluyendo carga y descarga de fletes. En el sitio de estudio es importante tomar en cuenta la operación de abasto de combustibles.

5.4.1.1. Materiales involucrados en los procesos

5.4.1.1.1. Reparación y mantenimiento de carros

Los contaminantes generados en esta operación generalmente están en el agua residual producto de la limpieza preliminar de interiores y exteriores, y residuos peligrosos generados al pintar, remover pintura, y limpiar partes. Los residuos peligrosos generados típicos son: (tabla 5.1)

- a) Solventes gastados y lodos asociados;
- b) Residuos cáusticos gastados y lodos asociados
- c) Residuos de pintura; y lodos asociados

Tabla 5.1. Materiales y procesos involucrados en el mantenimiento de carros y coches

Proceso	Material utilizado	Residuos
Remoción de aceite y grasas	Desengrasantes, limpiadores de motores, aerosoles, solventes, ácidos/álcalis	Inflamables, solventes gastados, combustibles sólidos, soluciones residuales ácidas/alcalinas, aceite usado
Limpieza de carros y equipo	Desengrasantes, solventes, ácidos/álcalis, fluidos de limpieza	Inflamables, solventes gastados, combustibles sólidos, soluciones residuales ácidas/alcalinas, trapos
Remoción de herrumbre	Ácidos fuertes, álcalis fuertes	Ácidos y alcalinos
Preparación de pintura	Thinners, reductores de esmalte, bases blancas	Solventes gastados, residuos combustibles, residuos de pintura combustibles, residuos de pintura con metales pesados, trapos
Pintura	Esmaltes, lacas, resinas epóxicas, alquilo, acrílicos, primers	Combustibles de pintura, solventes gastados, residuos de pintura con metales pesados, residuos combustibles, trapos
Limpieza de cabinas de spray, pistolas de spray, y brochas	Thinner, reductores de esmalte, solventes, bases blancas	Combustibles de pintura, metales pesados en residuos de pintura, solventes gastados
Remoción de pintura	Solventes, thinners, reductores de esmalte, bases blancas	Residuos inflamables de pintura, metales pesados de residuos de pintura, solventes gastados, trapos

U.S. EPA Office of Solid Waste, 1993. Tomado de USEPA, 1998a

5.4.1.1.2. *Mantenimiento de locomotoras*

Cada una de las operaciones de mantenimiento de locomotoras mencionadas antes es una potencial fuente de salida de contaminantes.

5.4.1.1.3. *Operaciones de transporte en los ferrocarriles*

Las tres operaciones principales de transporte en los ferrocarriles que implican problemas ambientales potenciales son: el abasto de combustible, el transporte de materiales peligrosos, y la liberación de líquidos refrigerantes durante el transporte.

El derrame o fuga de materiales peligrosos es de interés ambiental en la industria del ferrocarril.

La contaminación del aire y el derrame de combustibles son importantes en operaciones de abasto de combustibles. Mientras que las emisiones al aire se deben a productos volátiles de petróleo tales como gasolina, la industria del ferrocarril usa muy poca gasolina en el sitio. Su principal producto combustible es el diesel, que es menos volátil. Si se suministra gasolina en el sitio, esta contribuirá a problemas locales de calidad del aire, y puede requerir permiso y control. El combustible derramado puede contaminar el suelo, el agua subterránea, o cuerpos de agua (USEPA, 1998a).

El derrame de aceites y líquido refrigerante de la maquina locomotora al ambiente puede ocurrir durante las operaciones de transporte. Los aceites pueden contaminar el agua superficial, el agua subterránea, y el suelo (USEPA, 1998a).

5.4.2. Operaciones de fundición de piezas (fierro, bronce y zapatas)

Los procesos de la fundición de metales se pueden dividir en cinco operaciones principales (figura 5.3): (USEPA, 1998b)

- a) Fabricación de patrones
- b) Preparación de moldes y corazones, y vertido
- c) Preparación de la carga al horno y fundición
- d) Desmolde, enfriamiento y manejo de la arena sílica
- e) Templado, terminado, limpieza y cubierta

5.4.2.1. Fabricación del patrón

Los patrones y los corazones se fabrican comúnmente de metal, plástico o madera. En Aguascalientes se usaron principalmente patrones de madera y metal. Que generan muy pocos residuos, provenientes de los mismos materiales de fabricación, aunque también pueden generarse solventes y limpiadores debido a la limpieza del equipo.

5.4.2.2. Preparación de molde y corazones y vertido

Los moldes y los corazones hechos con arena son destruidos y separados de la fundición durante la operación de desmolde. La arena puede reusarse varias veces; sin embargo, una porción se desgasta después de un cierto número de usos y debe removerse, como residuo, generando una gran cantidad de residuos de fundición (USEPA, 1998b).

El proceso típico para los moldes y corazones de arena, usado en Aguascalientes, se presenta a continuación.

Primero se diseña la pieza; después se fabrica el patrón (réplica de la pieza terminada) en madera o metal. Comúnmente el patrón está constituido por dos mitades. El molde de arena se forma con los patrones en una caja metálica y se remueve, quitando las mitades del patrón. Se unen las dos partes del molde (superior e inferior). El metal fundido es vertido o inyectado, permitiendo al metal solidificar en el espacio definido por el molde.

Además de las mitades del patrón se colocan corazones para moldear las cavidades de la pieza. Los corazones son formados típicamente de arena sílica y pegamentos químicos fuertes (USEPA, 1998b).

Los moldes de arena se fabrican usando una mezcla de 85 -95 % de arena sílica, 4 -10 por ciento de arcilla bentonítica, 2 - 10% de materiales carbonosos como hidrocarburos, polvo de hulla, fécula de maíz, polvo de madera, y de 2 - 5 % de agua (USEPA, 1998b).

Los sistemas de pegamentos químicos son usados principalmente para hacer los corazones, porque se requieren materiales más fuertemente unidos y resistentes. Los materiales utilizados son: aceites naturales, resinas sintéticas (como las fenolicas o furano), ácido acuoso como cloruro de amonio, sales de cobre y ácidos (USEPA, 1998b).

Los residuos generados son corazones rotos y arena colocada prematuramente o inadecuadamente, residuos de resinas, pegamentos y recipientes.

5.4.2.3. Preparación de la carga al horno y fundición del metal

El primer paso, consiste en la preparación de los materiales (chatarra y metales primarios), principalmente: limpieza, corte y desengrasado. La limpieza y desengrase suele hacerse con solventes y mediante combustión para extraer cualquier contaminante orgánico. Una vez preparados los materiales son pesados y se agrega metal adicional, aleación, y flujo antes de colocar el metal en el horno.

El flujo es un material que se agrega a la carga del horno o al metal fundido para remover impurezas. El flujo se une con las impurezas para formar escorias, que se elevan a la superficie del metal fundido donde es removido antes de verterlo. Las escorias sobre la superficie del metal fundido ayuda a prevenir la oxidación del metal. El flujo consiste de sales de cloro o flúor que tienen afinidad con ciertos contaminantes.

5.4.2.4. Desmolde, enfriamiento y manejo de la arena

Las piezas fundidas necesitan enfriarse y separarse del molde de arena. Después de que el metal fundido ha sido vertido en el molde y empieza a solidificar, es transportado a un área de enfriamiento o templado donde la fundición solidifica antes de ser separada del molde (USEPA, 1998b).

Algunas técnicas de fundición pueden generar un volumen importante de arena residual; sin embargo, muchas de ellas reusan una gran porción de esta arena y solo generan una pequeña porción como residuo.

5.4.2.5. Templado, terminado, limpieza y recubrimiento

El enfriamiento y solidificación rápidos de piezas calientes por templado, en un baño de agua, es empleado por algunos fundidores para alcanzar ciertas propiedades metalúrgicas y acelerar el proceso. El baño puede ser solo agua pura o puede contener aditivos químicos para prevenir la oxidación.

Se requiere, también, un proceso de terminado y limpieza para todas las piezas; sin embargo, el grado y los tipos específicos de operaciones dependerán de las especificaciones de la pieza y del proceso de fundición usado. Las operaciones de acabado empiezan una vez que la fundición es desmoldada y enfriada.

Como parte del proceso de terminado y limpieza, para remover impurezas se emplean martillos, serruchos, ruedas de corte abrasivas, herramientas de corte con flama, y herramientas de arco aire-carbón. El material residual refractario y los óxidos son removidos comúnmente por chorro de arena u otro método (USEPA, 1998b).

La limpieza de las piezas precede a cualquier operación de recubrimiento para asegurar que el recubrimiento se adhiera al metal. Las escamas (incrustaciones), herrumbre, óxidos, aceite, grasa, y suciedades suelen removerse químicamente de la superficie usando solventes orgánicos (comúnmente solventes clorados, nafta, metanol y tolueno), emulsificadores, agua presurizada, abrasivos, agentes alcalinos (sosa cáustica, hidróxido de sodio, silicatos alcalinos, y fosfatos), o ácidos. El proceso elegido involucra la limpieza de la superficie del metal con ácidos inorgánicos como ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, o ácido nítrico (USEPA, 1998b).

Es necesario cubrir las piezas mediante operaciones de pintura, o galvanizado, o galvanizado con níquel, u otros para inhibir la oxidación, resistir el deterioro, o mejorar la apariencia.

5.4.2.6. Residuos generados

El agua de templado puede contener fenoles, aceites y grasas, sólidos suspendidos, y metales (por ejemplo: cobre, plomo, zinc). Lodos metálicos suelen generarse cuando los baños de templado se limpian (tabla 5.2 y figura 5.3).

Las operaciones de acabado pueden generar emisiones de partículas al aire. El agua residual puede contener aceites de corte, etilen glicol, y metales. Los residuos sólidos incluyen rebabas de metal y aceites de corte gastados (USEPA, 1998b).

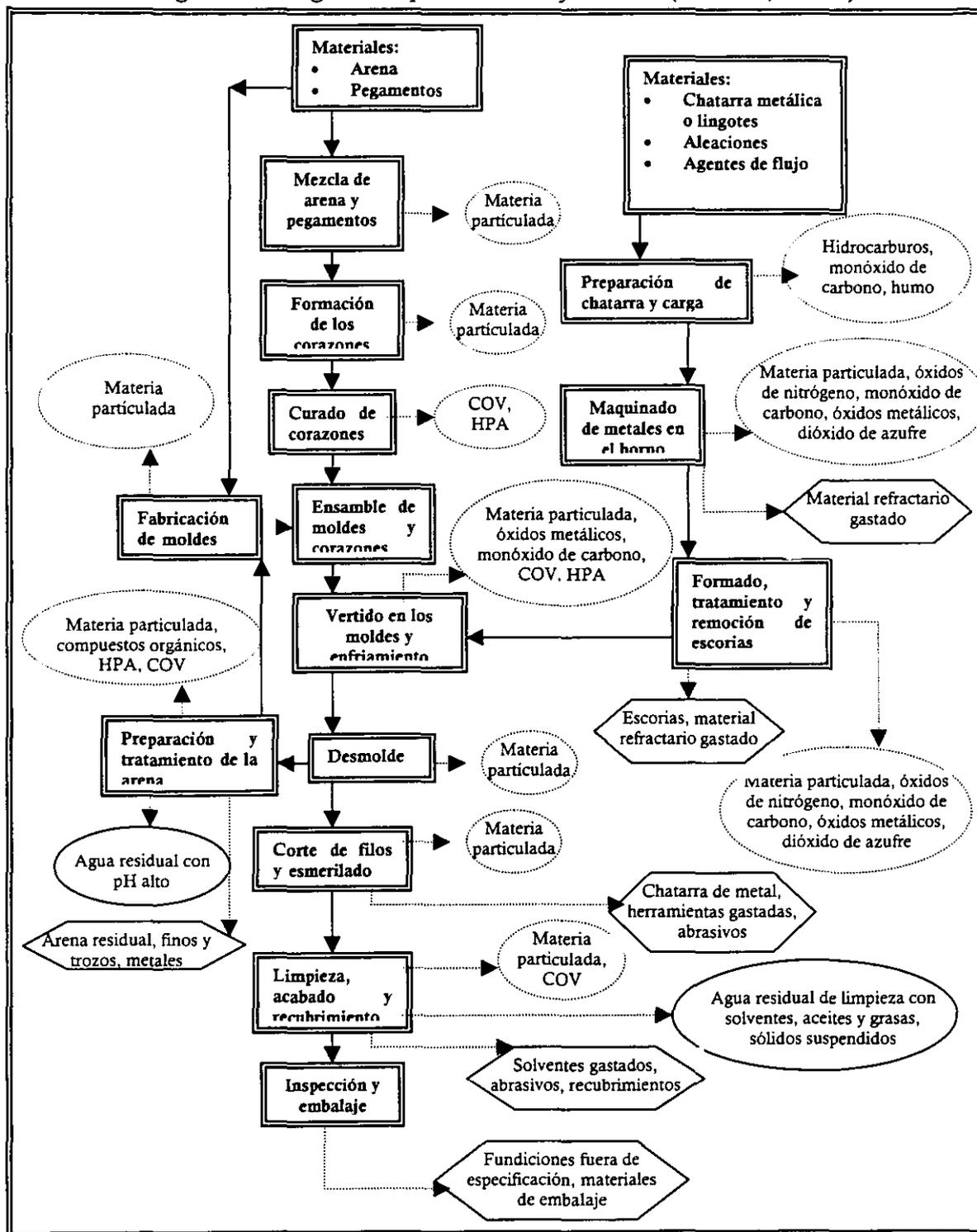
Las operaciones de limpieza y recubrimiento pueden generar emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la pintura, recubrimiento y limpieza con solventes; los residuos sólidos incluyen cianuros y lodos con metales, solventes gastados y pinturas, y baños de galvanizado gastados (USEPA, 1998b).

Tabla 5.2. Materiales utilizados y residuos generados en el proceso de fundición

Proceso industrial	Material utilizado	Emisiones al aire	Agua residual	Residuos
Fabricación del patrón	Madera, plástico, metal, cera, poliestireno	COV de pegamentos, epóxicos, y pinturas	Muy poca o nada es generada	Materiales residuales de los patrones
Preparación del molde y los corazones y vertido	Arena y pegamentos químicos para los corazones	Partículas, óxidos metálicos, monóxido de carbono, compuestos orgánicos, sulfuro de hidrógeno, dióxido sulfúrico, óxido nítrico. También, benceno, fenoles, y otros HPA si se usan corazones unidos químicamente	El agua residual contiene metales, temperatura elevada, fenoles y otros compuestos orgánicos de la colección de polvos húmedos en los sistemas y agua de enfriamiento	Arena residual y arena potencialmente contaminada con metales
Carga en el horno y fundición				
Carga y maquinado	Chatarra, lingotes y fundiciones regresadas	Productos de combustión, vapores de aceite, partículas, óxidos metálicos	Agua residual con alto pH, agua de enfriamiento con metales, y agua de enfriamiento sin contacto	Material gastado refractario conteniendo potencialmente metales y aleaciones
Flujo y remoción de escorias	Agentes de flujo	Partículas, óxidos metálicos, solventes, ácido clorhídrico	Agua residual con metales si se utiliza templado de escorias	Escorias potencialmente contaminadas con metales
Vertido	Cucharones y otros materiales refractarios	Partículas, óxidos metálicos	Muy poco o ninguna	Cucharones gastados y materiales refractarios que potencialmente contienen metales
Templado, acabado, limpieza y recubrimiento				
Pintura y aplicación de inhibidor de la oxidación	Pintura e inhibidor	COV	Poca o ninguna	Contenedores gastados y aplicadores
Limpieza, templado, corte y pulido	Fundiciones sin terminar, agua, solventes, equipos de acero	COV, polvos y partículas metálicas	Agua residual de limpieza y agua de enfriamiento con temperatura alta, solventes, aceites y grasas, y sólidos suspendidos	Solventes gastados, perdigones de acero, partículas metálicas, ruedas de corte, polvo de los sistemas de colección
Desmolde, templado y manejo de arena	Agua y cáustica	Polvo y partículas metálicas, COV	Agua residual con pH bajo o alto	Arena de fundición residual

(USEPA, 1998b)

Figura 5.3. Diagrama de proceso de una fundidora (USEPA, 1998b)



5.5. Marco físico a detalle del sitio

Los talleres de FNM comprenden un área de 58.9 hectáreas. Para facilitar la evaluación el área de estudio se dividió en once zonas (figura 5.4):

1. Norte
2. Herrería
3. Ejes y ruedas
4. Carros y coches (trucks)
5. Pintura, báscula y estensilado
6. Abasto
7. Tapicería
8. Fundición
9. Laguna conocida por la gente como de "chapopote"
10. Pailería
11. Vías

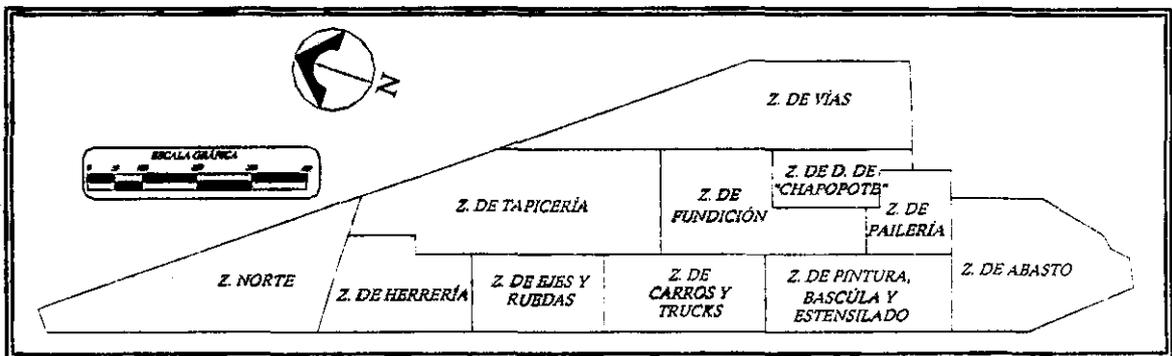


Figura 5.4. Zonas del sitio

La superficie de cada una de las zonas se presenta en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Área de las zonas en el sitio de estudio

Zona	Área (m ²)	Porcentaje (%)
Norte	76 836	13
Herrería	41 437	7
Ejes y ruedas	34 830	6
Carros y coches	42 694	7
Pintura, báscula y estensilado	48 616	8.1
Abasto	64 601	11
Tapicería	93 361	16
Fundición	55 148	9.4
Laguna de "chapopote"	23 256	4
Pailería	22 605	4
Vías	85 678	14.5
Total	589 062	100

A continuación se presenta una relación detallada de cada zona y que se encuentra ahí.

5.5.1. Zona norte

En la zona norte se tiene un tanque de agua; la nave de la mesa de lavado de jaulas y tanques; el patio de furgones, jaulas, plataformas por repararse; el patio de góndolas y tanques por reparar; patio de coches reparados; el patio de coches por reparar; y el patio de coches accidentados por reparar (figura 5.5).

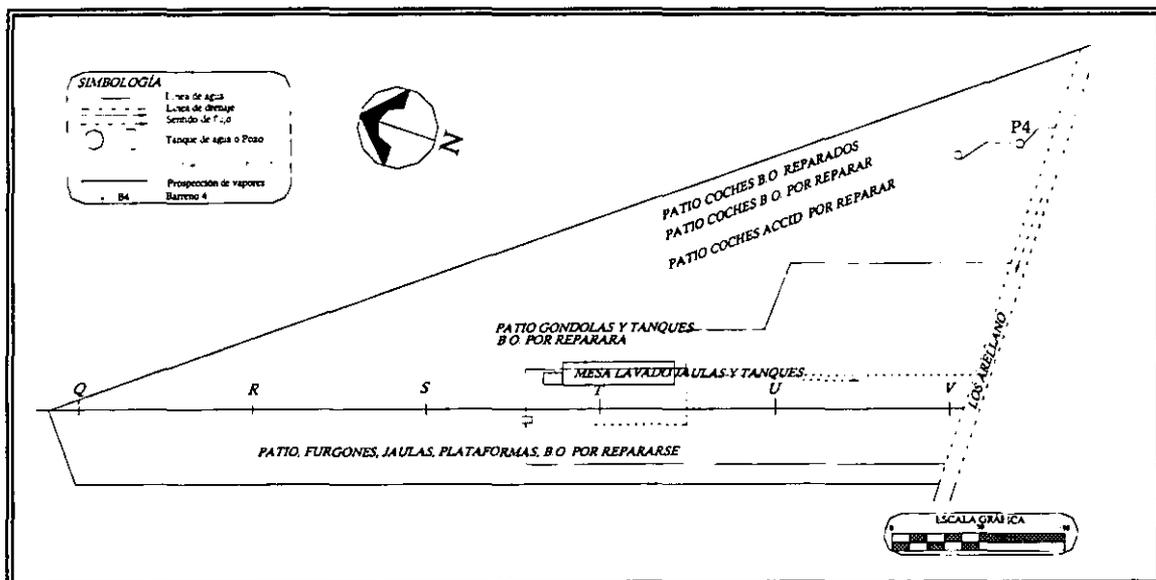


Figura 5.5. Zona norte

5.5.2. Zona de herrería

En esta zona de los talleres de FNM, en Aguascalientes está la nave de reparación de carros accidentados; la caseta; enderezado; sanitarios y oficinas; hubo tres tanques de combustible; y la nave de la herrería que tampoco existe (figuras 5.6 y 5.7).

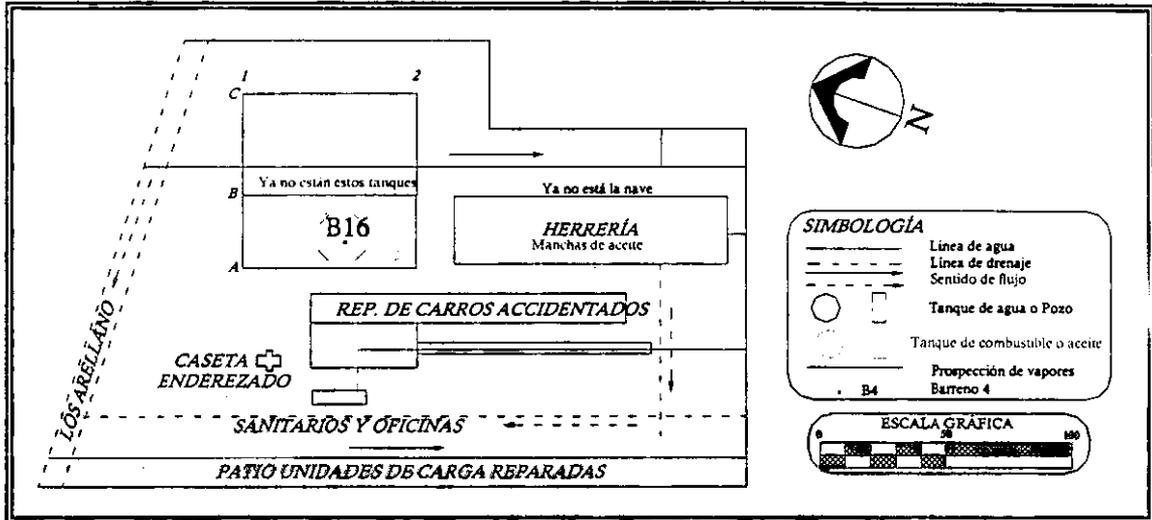


Figura 5.6. Zona de herrería



Figura 5.7. Suelo manchado en la zona de herrería

5.5.3. Zona de ejes y ruedas

En esta zona están ubicadas las naves de almacén de ruedas; taller de ejes y ruedas; de operaciones de grit blast; reparación ligera de carros cargados; el pozo 5; y un tanque de agua (figura 5.8).

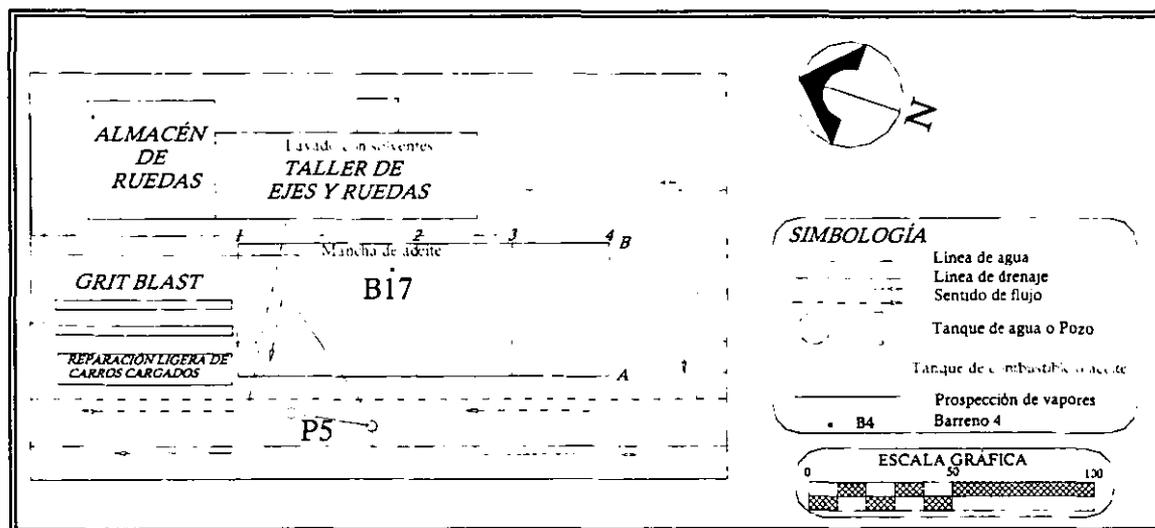


Figura 5.8. Zona de ejes y ruedas

5.5.4. Zona de carros y coches (trucks)

Comprenden la zona de carros y coches: el taller de trucas y carros; carpintería mecánica; almacén de madera; taller de carros; vestidores y baños; y un tanque de combustible (figura 5.9).

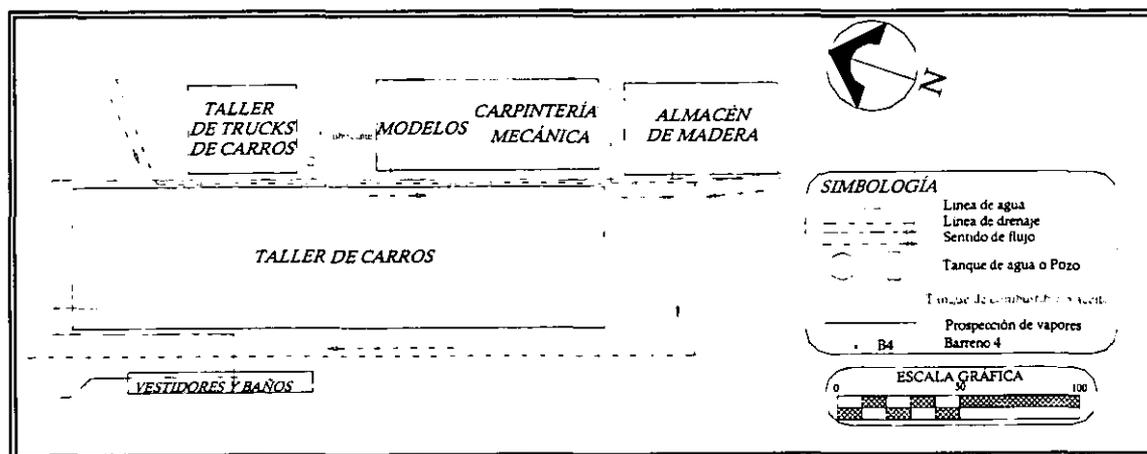


Figura 5.9. Zona de carros y coches

5.5.5. Zona de pintura, báscula y estensilado

En la zona de pintura, báscula y estensilado posee un almacén general; un almacén; un almacén de madera; el polvorín; el área de pintura, báscula y estensilado; el taller de combustión interna; y la superintendencia (figura 5.10).

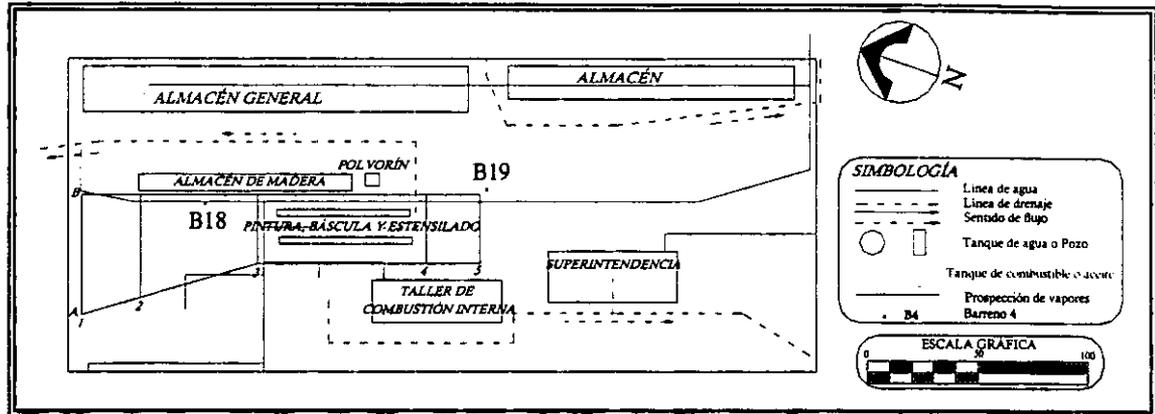


Figura 5.10. Zona de pintura, báscula y estensilado

5.5.6. Zona de abasto

Presenta varios talleres; bodegas de fierro viejo; el área de pintura de señales; el área de reparación ligera, y reparación de locomotoras; las cocheras; armones; oficinas; almacén de partes de locomotoras; almacén de madera; laboratorio; aceitera; cobertizo de locomotoras; aceitera; el taller de maquinaria pesada; el taller de terminados; la caseta de bombeo; el arenero; el decantador; un furgón abandonado; las oficinas de almacenamiento de armado de locomotoras; dos tanques subterráneos de gasolina (gasolinera); 9 tanques de aceites; dos tanques de agua cruda; y un tanque de agua tratada (figura 5.11).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS "TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS"

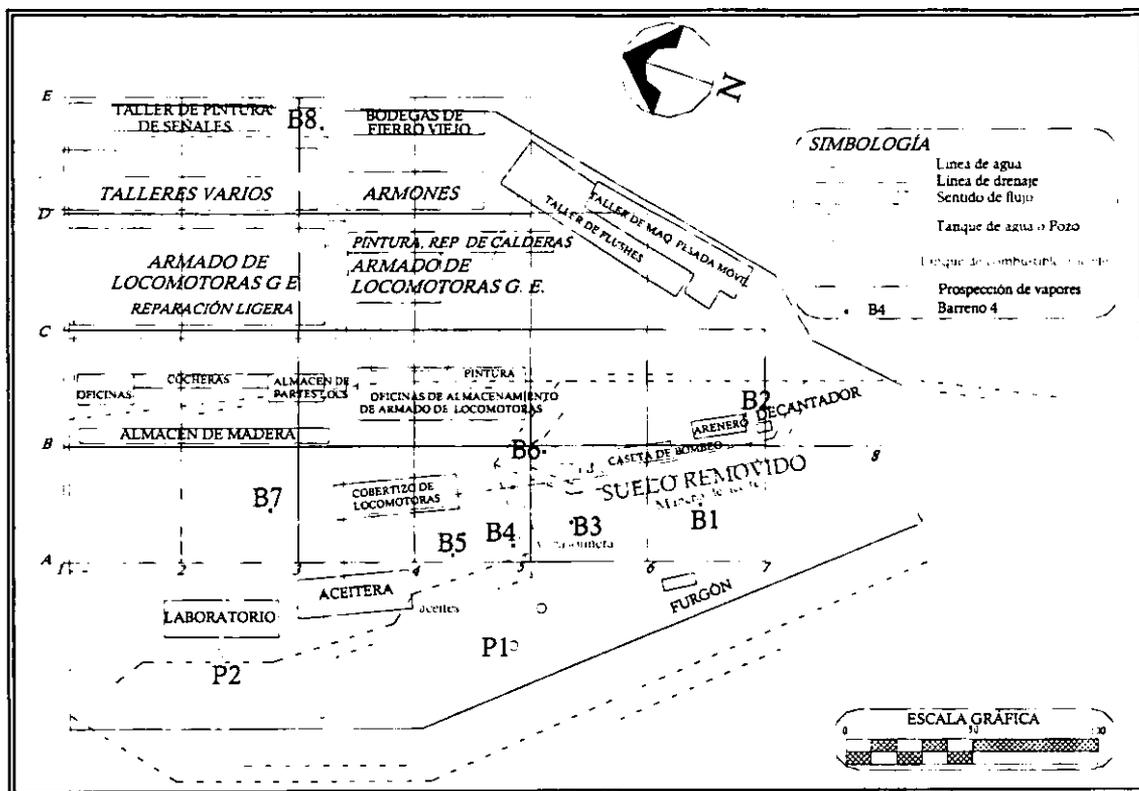


Figura 5.11. Zona de abasto

5.5.7. Zona de tapicería

La zona de tapicería comprende la fosa cruz, la nave de inspección y báscula, la nave de fumigación, el área de lavado exterior, el área de baterías, la tapicería; el área de pintura, lavado interior, casa de fuerza, cobrería, taller de coches, grit blast, taller de coches, almacenamiento de coches, mesa de translación, talleres sistemales, patio de coches accidentados a reparar; patio de coches a desmantelar, dos tanques de agua, y un tanque de diesel (figura 5.12).

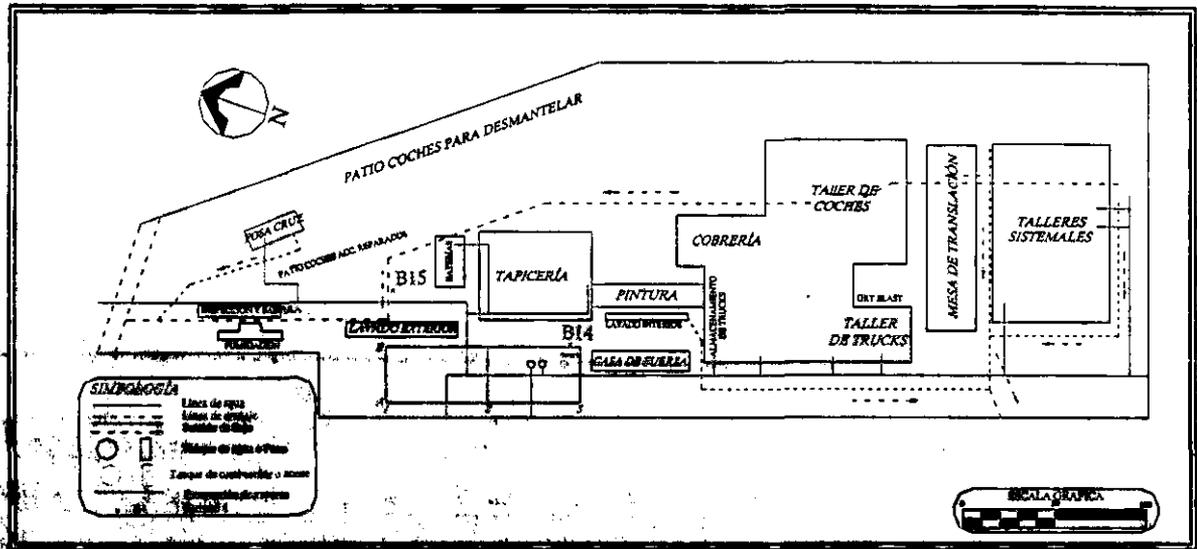


Figura 5.12. Zona de tapicería

5.5.8. Zona de fundición

Fundición; laminación; troqueles; almacén de materiales de fundición; carbonera; fundición de zapatas; fundición de fierro; fundición de bronce; taller de bronce; departamento 3; laminación y troquelado; el pozo 3; un tanque de agua, y tres tanques de combustible se tienen en la zona de fundición (figuras 5.13 y 5.14).

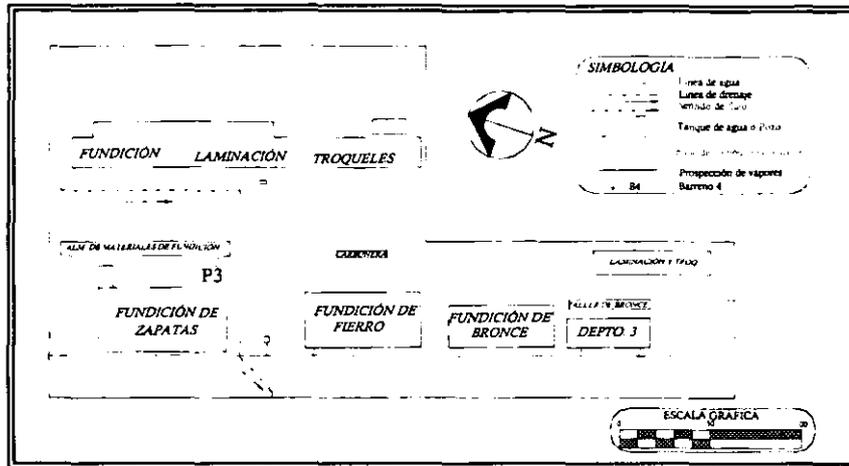


Figura 5.13. Zona de fundición

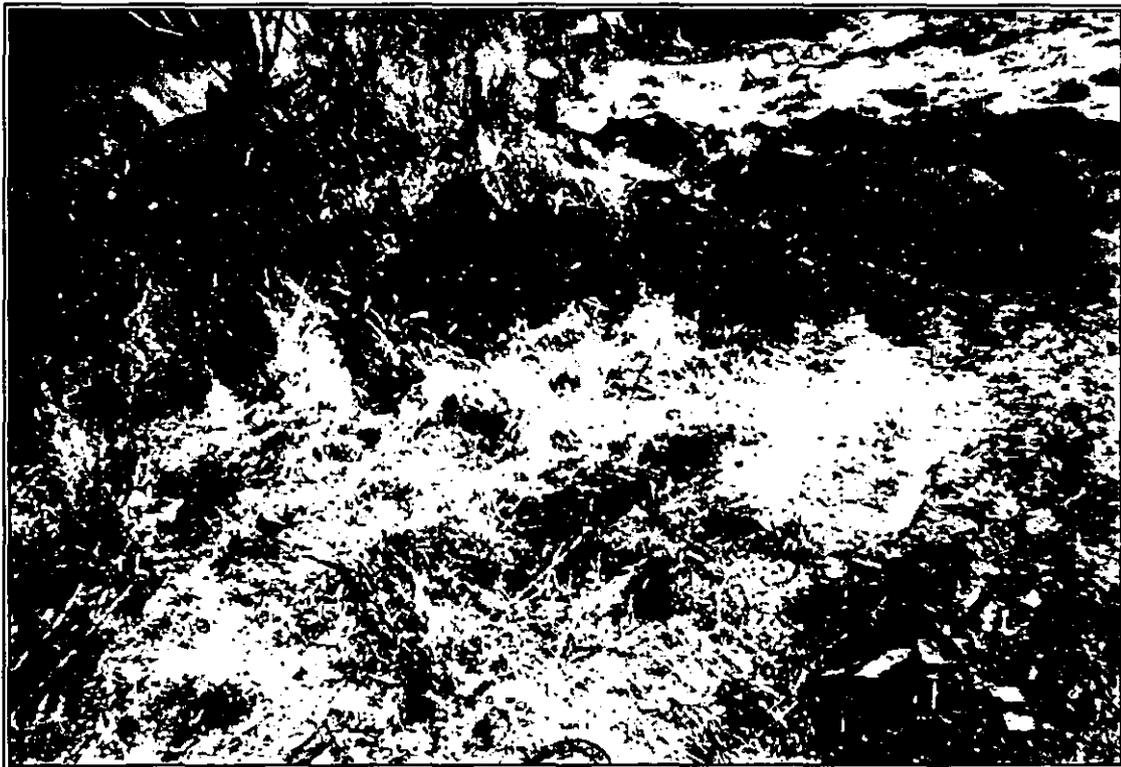


Figura 5.14. Escorias provenientes de la fundición

5.5.9. Zona de pailería

En la zona de pailería se encuentran una casa de fuerza; la pailería; la planta de recobros y cambio de vías y reparación ligera; la enfriadora; 4 tanques de agua; y dos tanques de combustible (figuras 5.15, 5.16 y 5.17).

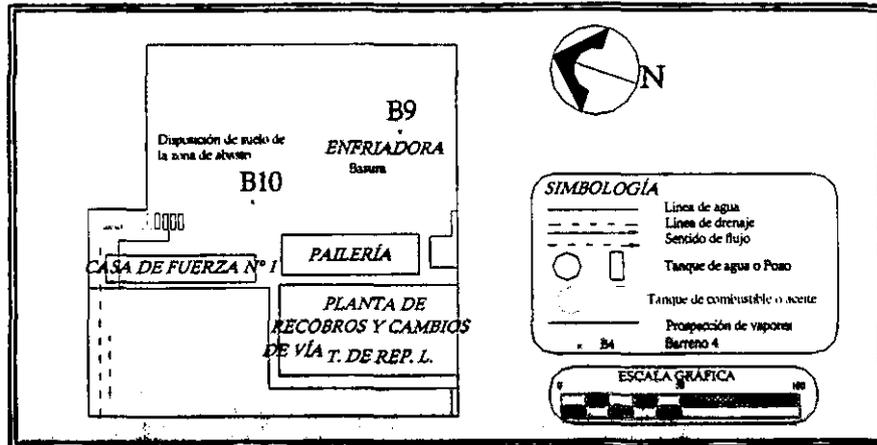


Figura 5.15. Zona de pailería



Figura 5.16. Suelo removido de la zona de abasto



Figura 5.17. Basura dispuesta en la enfriadora

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

5.5.10. Zona de laguna conocida por la gente como de "chapopote"

Consiste en un área de disposición de residuos conocida como laguna de "chapopote" que es de aproximadamente 2,000 m² (FNM, 1994). El llamado "chapopote" aparentemente es combustoleo y residuos de hidrocarburos. También hay un depósito de almacenamiento de combustible negro; y dos furgones con "chapopote" (figuras 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21).

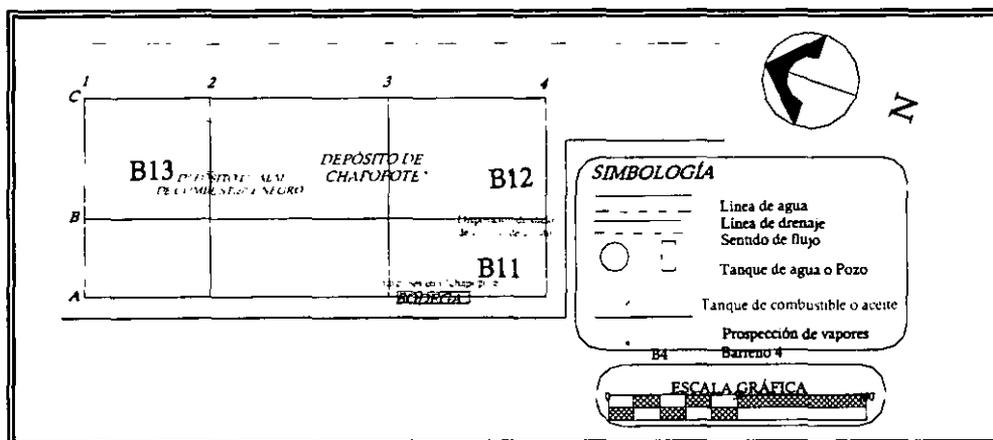


Figura 5.18. Zona de laguna de "chapopote"



Figura 5.19. Laguna de "chapopote"



Figura 5.20. Laguna de "chapopote"



Figura 5.21. Furgones con residuos

5.5.11. Zona de vías

En esta zona están el patio de coches y el patio de depósito (figura 5.22).

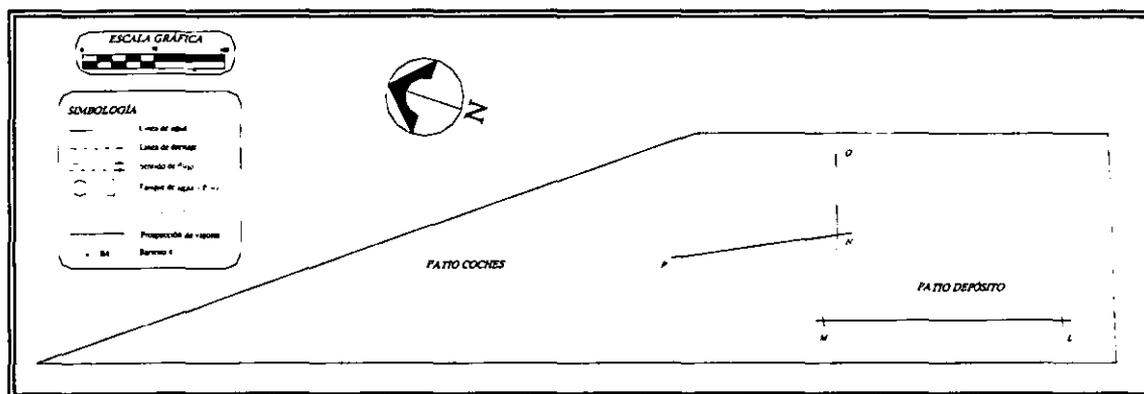


Figura 5.22. Zona de vías

5.5.12. Sistema de drenaje, y tuberías y descarga

El sistema de drenaje era combinado (aguas pluviales, aguas de procesos y aguas de servicios) hasta 1992. Posteriormente, se separaron los drenajes y se construyeron dos tanques decantadores (figura 5.11) para separar los aceites del agua residual (Monroy, 1999), pero fueron insuficientes (FNM, 1994).

No se conoce bien la ubicación de las redes de alcantarillado, agua potable y combustible existentes en los talleres. Y de acuerdo a la información obtenida, los drenajes no están separados a pesar de la existencia de los decantadores. En los planos de cada una de las zonas se presenta la información disponible de las redes de alcantarillado y agua potable del lugar, (figuras 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.15, 5.18 y 5.22).

En los talleres se contaba con dos tuberías principales de descargas de aguas residuales, una al drenaje municipal, y otra al arroyo Los Arellano (FNM, 1994).

5.6. Materiales de construcción

Desde el punto de vista de evaluación ambiental del sitio es importante notar que la mayoría de las naves tienen techo de asbesto.

5.7. Datos geotécnicos y analíticos previos

En el estudio previo se realizaron 19 barrenos. La selección se hizo con base en las observaciones en campo y una prospección geofísica con sondeos eléctricos verticales, para ver las características del subsuelo. Los barrenos fueron obtenidos con equipo para penetración estándar (FNM, 1995).

Las muestras de suelos para resultados analíticos se tomaron siguiendo un protocolo de laboratorio y se analizaron los contaminantes con los métodos indicados en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Métodos y análisis realizados

Contaminante	Método	Contaminante	Método
Metales: Arsénico* Bario Cadmio Cromo Plomo Selenio* Plata	SW-846-6010	Gasolina sin plomo Keroseno Diesel Aceites minerales Aceite de motor	SW-846-8000
Mercurio	SW-846-846-7471	Hidrocarburos totales de petróleo	EPA 418.1MOD
Bifenilos policlorados	SW-846-8080	Hidrocarburos poliaromáticos	SW-846-8270
Compuestos orgánicos volátiles	SW-846-8260a	BTEX: Benceno Tolueno Etilbenceno Xileno	SW-846-8020/5030
Compuestos orgánicos semivolátiles	SW-846-8270 SW-846-8080		

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

*Arsénico y selenio son metaloides

5.7.1. Resultados geotécnicos

Mediante las perforaciones se identificó la estratigrafía que se indica en la tabla 5.5.

Además, se realizaron análisis del contenido de agua, en promedio de 17.4%, y un peso volumétrico, húmedo de 1.86 ton/m³ y seco de 1.66 ton/m³.

Tabla 5.5. Clasificación de los suelos encontrados (textura)

Sondeo	Profundidad	Clasificación SUCS*	Descripción
B1	0.0 - 6.25	SM	Arena limosa
B2	0.0 - 6.0	SM	Arena limosa
B3	0.0 - 6.75	SC	Arena arcillosa
	6.75 - 12.0	SM	Arena limosa
B4	0.0 - 12.0	SC	Arena arcillosa
	12.0 - 15.0	GP	Grava mal graduada empacada en arcilla
B5	0.0 - 6.75	SM	Arena limosa
B6	0.0 - 6.75	SM	Arena limosa
B7	0.0 - 0.75	SM	Arena limosa
	0.75 - 6.75	GW	Grava bien graduada (balasto)
	6.75 - 8.25	SM	Arena limosa fuertemente cementada
B8	0.0 - 0.75	SC	Arena arcillosa contaminada
	0.75 - 3.75	SM	Arena limosa fuertemente cementada
B9	0.0 - 0.75	CL	Material arcilloso de baja plasticidad
	0.75 - 6.75	SM	Arena limosa cementada
B10	0.0 - 0.75	CL	Material arcilloso de baja plasticidad
	0.75 - 7.5	SM	Material areno limoso fuertemente cementado
B11	0.0 - 6.75	SM	Arena limosa fuertemente cementada
B12	0.0 - 10.5	SC	Material areno - arcilloso color negro, mezclado con material de relleno
B13	0.0 - 8.25	SM	Material areno limoso fuertemente cementado color café claro
B14	0.0 - 1.5	CL	Material arcilloso de baja plasticidad color café oscuro
B15	0.0 - 1.5	CL	Material arcilloso de baja plasticidad
	1.5 - 3.0	SC	Material areno arcilloso con bajo grado de cementación
B16	0.0 - 0.75	CL	Arcilla color café oscuro de baja plasticidad
	0.75 - 3.75	SM	Material areno limoso fuertemente cementado por sales minerales
B17	0.0 - 0.75	CL	Material arcilloso de baja plasticidad
	0.75 - 11.25	SC	Material areno arcilloso de baja plasticidad fuertemente cementado
B18	0.0 - 6.0	CL	Material arcilloso de baja plasticidad
B19	0.0 - 8.25	SM	Material areno limoso fuertemente cementado

*SUCS. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

5.7.2. Resultados analíticos

Ferrocarriles Nacionales de México realizó dos estudios relacionados con la presente investigación y son de gran utilidad:

- Auditoría ambiental a los talleres de Aguascalientes, Ags. (realizada en julio de 1994)
- Estudio para la caracterización de la contaminación en las áreas del Taller y zona de abastos en Aguascalientes, Ags. (en 1995).

El primer estudio, entre otras cosas presenta los datos analíticos para plomo de 12.8 ppm, 0.74 ppm de cadmio, 20.80 ppm de zinc y más de 2,000 ppm de hidrocarburos y límite de explosividad alto en la zona de abasto por los tanques de gasolina.

En el segundo estudio se hicieron 100 mediciones de prospección de vapores y 19 barrenos a una profundidad máxima de 11.25 m. Las figuras 5.5 - 5.22 presentan las ubicaciones de estos puntos de muestreo; a continuación se presentan tablas de los resultados obtenidos en tal estudio.

Tabla 5.6. Concentraciones de metales en el sitio

Metal	Puntos de medición						
	B1	B2	B3	B9	B11	B17	B19
Arsénico ¹	ND	2	ND*	ND	ND*	2	3
Bario	99.2	133	3.77*	171	1.68*	101	287
Cadmio	ND	ND	ND*	3	ND*	ND	ND
Cromo	9	5	ND*	4	ND*	8	10
Plomo	5	12	ND*	ND	ND*	8	9
Selenio ¹	ND	ND	0.07*	ND	0.07*	ND	ND
Plata	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND	ND
Mercurio	ND	ND		ND	ND*	ND	ND

Concentraciones en mg/kg excepto en * son en mg/l

¹ Arsénico y selenio son metaloides

ND. No detectado

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.7. Concentraciones de BPC (bifenilos policlorados) en el sitio

Sustancia	Puntos de medición					
	B1	B2	B5	B10	B12	B13
BPC	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND. No detectado

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.8. Concentraciones de compuestos orgánicos volátiles

Sustancia	Puntos de medición							
	B1	B2	B3	B5	B8	B11	B12	B19
Acetona	0.174	0.067		ND	ND		0.473	0.121
Benceno	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Bromodiclorometano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Bromoformo	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Metil bromuro	ND	ND		ND	ND		ND	ND
2-butanone (MEK)	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Disulfuro de carbono	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Clorodibromometano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Clorobenceno	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Etil cloruro	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Cloroformo	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Metil cloruro	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,1-dicloroetano	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
1,2-dicloroetano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,1-dicloroetano	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
1,2-dicloroetano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,2-dicloropropano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Cis-1,3-dicloropropeno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Trans-1,3—dicloropropeno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Etilbenceno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
2,-hexanone	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Diclorometano	ND	ND		ND	ND		0.245	ND
4-metil-2-pentanone	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Estireno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,1,2,2-tetracloroetano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Tetracloroetano	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Tolueno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,1,1-tricloroetano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,1,2-tricloroetano	ND	ND		ND	ND		ND	ND
Tricloroetano	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Cloruro de vinilo	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND
Xileno	ND	ND		ND	ND		ND	ND
1,4-diclorobenceno	ND	ND	ND*	ND	ND	ND*	ND	ND

Concentraciones en mg/kg, excepto en * son en mg/l

ND. No detectado

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.9. Concentraciones de compuestos semivolátiles

Sustancia	Puntos de medición					
	B1	B2	B3	B5	B11	B12
Acenafteno	ND	ND		ND		12
Acenaftileno	ND	ND		ND		4.32
Antraceno	ND	ND		ND		51.6
Benzo(a)antraceno	ND	ND		ND		10.4
Benzo(k)fluoranteno	ND	ND		ND		8.93
Benzo(ghi)perileno	ND	ND		ND		7.66
Benzo(a)pireno	ND	ND		ND		2.1
Bis(2-cloroetoxi)metano	ND	ND		ND		5.16
4-bromofenil-fenileter	ND	ND		ND		ND
Butilencil ftalato	ND	ND		ND		ND
Carbazol	ND	ND		ND		22.7
4-cloroanilina	ND	ND		ND		ND
4-cloro-3-metilfenol	ND	ND		ND		ND
2-cloronaftaleno	ND	ND		ND		ND
2-clorofenol	ND	ND		ND		ND
4-clorofenil-fenileter	ND	ND		ND		ND
Criseno	ND	ND		ND		16.8
o-cresol (2-metilfenol)	ND	ND		ND		ND
p-cresol(4-metilfenol)	ND	ND		ND		ND
di-n-butil ftalato	ND	ND		ND		ND
Dibenzo(a,h)antraceno	ND	ND		ND		1.84
Dibenzofurano	ND	ND		ND		8.23
1,2-diclorobenceno	ND	ND		ND		ND
1,3-diclobenceno	ND	ND		ND		ND
1,4-diclorobenceno	ND	ND		ND		ND
3,3-diclorobencidine	ND	ND		ND		ND
2,2-oxibis(1-cloropropano)	ND	ND		ND		ND
2,4-diclorofenol	ND	ND		ND		ND
Dietilftalato	ND	ND		ND		ND
2,4-dimetilfenol	ND	ND		ND		ND
Dimetilftalato	ND	ND		ND		ND
4,6-dinitro-o-cresol	ND	ND		ND		ND
2,4-dinitrofenol	ND	ND		ND		ND
2,4-dinitrotolueno	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
2,6-dinitrotolueno	ND	ND		ND		ND
di-n-octil-ftalato	ND	ND		ND		ND
Fluoranteno	ND	ND		ND		23.3
Fluoreno	ND	ND		ND		14.4
Hexaclorobenceno	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
Hexacloropentadieno	ND	ND		ND		ND
Hexacloroetano	ND	ND		ND		ND
Hexacloro-1,3-butadieno	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
Indeno(1,2,3-cd)pireno	ND	ND		ND		2.84
Isophorone	ND	ND		ND		ND
2-metilnaftaleno	ND	ND		ND		6.540
Naftaleno	ND	ND		ND		16.2
2-nitroanilina	ND	ND		ND		ND
3-nitroanilina	ND	ND		ND		ND

Concentraciones en mg/kg, excepto en * son en mg/l. ND. No detectado. (FNM, 1995)

Tabla 5.9. Continuación

Sustancia	Puntos de medición					
	B1	B2	B3	B5	B11	B12
4-nitroanilina	ND	ND		ND		ND
Nitrobenceno	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
2-nitrofenol	ND	ND		ND		ND
4-nitrofenol	ND	ND		ND		ND
n-nitrosodifenilamina	ND	ND		ND		ND
n-nitrosodi-n-propilamina	ND	ND		ND		ND
Pentaclorofenol	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
Fenantreno	ND	ND		ND		50.1
Fenol	ND	ND		ND		ND
Pireno	ND	ND		ND		44
1,2,4-triclorobenceno	ND	ND		ND		ND
2,4,5-triclorofenol	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
2,4,6-triclorofenol	ND	ND	ND*	ND	ND*	ND
piridino	ND	ND	ND*	ND		ND
o-cresol (2-metilfenol)	ND	ND	ND*	ND		ND
m+p cresol	ND	ND	ND*	ND		ND

Concentraciones en mg/kg, excepto en * son en mg/l. ND. No detectado
(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.10. Concentraciones de HPA* en el sitio

Sustancia	Puntos de medición											
	B3	B6	B7	B8	B9	B12	B13	B14	B16	B17	B18	B19
Acenafteno	ND	0.568	1.840	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acenaftileno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Antraceno	ND	ND	0.670	ND	ND	4.210	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(a)antraceno	ND	ND	1.030	ND	ND	0.387	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(b)fluoranteno	ND	ND	1.100	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(k)fluoranteno	ND	ND	0.997	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(ghi)perileno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(a)pireno	ND	ND	0.883	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Criseno	ND	0.354	1.620	ND	ND	0.730	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Dibenzo(a,h)antraceno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoranteno	ND	0.493	2.290	ND	ND	1.260	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoreno	ND	0.733	2.250	ND	ND	0.793	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1-metilnaftaleno	ND	1.060	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2-metilnaftaleno	ND	0.520	7.630	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Naftaleno	ND	ND	2.130	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fenantreno	ND	ND	4.510	ND	ND	2.250	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pireno	ND	ND	7.570	ND	ND	1.180	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Indeno(1,2,3 cd)pireno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Concentraciones en mg/kg *HPA. Hidrocarburos Poli aromáticos. ND. No detectado
(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.11. Concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo

	Puntos de medición																	
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B16	B17	B18	B19
HTP	13	20	43	26	11	4300	4450	193	20	16	1030	60600	13	168	13	ND	53	55

Concentraciones en mg/kg. ND. No detectado
(FNM, 1995)

Tabla 5.12. Concentraciones de BTEX

Sustancia	Puntos de medición									
	B4	B6	B7	B10	B12	B13	B14	B16	B17	B18
Benceno	ND	0.072	ND	ND	0.026	ND	ND	ND	ND	ND
Tolueno	ND	0.247	0.088	ND	0.053	ND	ND	ND	ND	ND
Etilbenceno	ND	0.488	0.863	ND	0.686	ND	ND	ND	ND	ND
Xileno	ND	0.821	0.393	ND	2.330	ND	ND	ND	ND	ND

Concentraciones en mg/kg

ND. No detectado

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Tabla 5.13. Concentraciones de productos de petróleo

Producto	Puntos de medición	
	B12	B12
Gasolina sin plomo	ND	ND
Keroseno	ND	ND
Diesel	ND	ND
Mineral	ND	ND
Aceite de motor	497000	9480

Concentraciones en mg/kg

ND. No detectado

(FNM, 1995. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags.)

Capítulo 6

EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD Y CRITERIOS DE LIMPIEZA ESTABLECIDOS EN LOS "TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS."

La aplicación de la metodología de análisis de riesgo a la salud, descrita con detalle en el capítulo 4, se realiza en este capítulo. Asimismo, se determinan las concentraciones permisibles de los contaminantes considerando, principalmente, la protección a la salud de las poblaciones potencialmente expuestas.

6.1. Sustancias químicas de interés

Con las visitas realizadas al sitio, la información recabada y la investigación llevada a cabo, acerca de los procesos realizados en los Talleres de FNM en Aguascalientes, se identificaron, por zonas, las sustancias químicas de interés.

6.1.1. Zona Norte

En esta zona las actividades principales eran el lavado de jaulas y tanques, las cuales generaban fundamentalmente aguas residuales con soluciones ácidas y básicas, solventes gastados y combustibles; tales aguas descargaban al arroyo los Arellano, que actualmente es parte del sistema de drenaje de la ciudad.

Los contaminantes identificados, más importantes, son: hidrocarburos poliaromáticos y compuestos orgánicos volátiles.

6.1.1.1. Resultados del muestreo

La prospección de vapores y los resultados obtenidos indican que las máximas concentraciones de vapores en partes por millón fueron en los puntos U (150 a 0.2 m de profundidad) y V (270 a 0.63 m de profundidad)(figura 5.5).

Este nivel alto de concentración de vapores se debe a que la descarga se hace en el arroyo. No se hizo caracterización de contaminantes específicos mediante análisis en muestras de suelo.

6.1.2. Zona de Herrería

En esta zona se contaba con tres tanques de combustible y el suelo está visiblemente manchado con aceite. Por lo que los contaminantes más importantes en esta zona son los hidrocarburos poliaromáticos y los compuestos orgánicos volátiles.

6.1.2.1. Resultados del muestreo

Se realizó prospección de vapores en la zona de los tanques. La máxima concentración de vapores fue de 220 ppm entre 1.5 y 2.0 m de profundidad.

En esta zona se perforó el barreno 16 (figura 5.6), y se analizaron hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos totales de petróleo y BTEX. Se encontraron niveles de HPA no detectables ($<330 \mu\text{g}/\text{kg}$), de HTP de 13 mg/kg, y en BTEX también no detectado ($< 20 \mu\text{g}/\text{kg}$).

Tabla 6.1. Concentraciones en la zona de herrería

Sustancia	Concentración
HPA	ND
HTP	13
BTEX	ND

Concentraciones en mg/kg

ND. No detectado

(FNM, 1995)

6.1.3. Zona de ejes y ruedas

En esta zona se llevaban a cabo operaciones de grit blast* las cuales consisten en emplear un chorro de arena para remoción de escorias e impurezas en las piezas metálicas. Manejaron grandes cantidades de gasolina y aceite. Se observan chatarra, aserrín, y manchas de aceite. También, realizaban operaciones de lavado con solventes.

Las actividades mencionadas en el párrafo anterior indican que la contaminación principal es por hidrocarburos poliaromáticos, BTEX, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles.

6.1.3.1. Resultados del muestreo

La prospección de vapores mostró máxima concentración de 200 ppm a una profundidad de 0.95 m. Además, se perforó el barreno 17 (figura 5.8) para obtener muestras y realizar análisis de metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos totales de petróleo y BTEX, de estos análisis se observó que los niveles de metales pesados y arsénico, son de 2, 101, 8 y 8 mg/kg de arsénico, bario, cromo y plomo, respectivamente. Los niveles de HPA fueron de ND asimismo el nivel de HTP y los de BTEX

* grit blast. Chorro de arena

Tabla 6.2. Concentraciones en la zona de ejes y ruedas

Sustancia	Concentración
Arsénico	2
Bario	101
Cromo	8
Plomo	8
HPA	ND
HTP	ND
BTEX	ND

Concentraciones en mg/kg
 ND. No detectado
 (FNM, 1995)

6.1.4. Zona de carros y coches (trucks)

En esta zona se realizaba la fabricación de los moldes para las piezas metálicas a fundir, debido a que el material de los moldes es madera, en esta zona se generaban residuos sólidos no peligrosos. Por lo anterior, no se realizaron prospección de vapores ni muestreo para análisis del suelo de sustancias específicas

6.1.5. Zona de pintura, báscula y estensilado

Debido a que en esta zona se aplicaba pintura a carros y coches se generaron solventes gastados, residuos de combustibles, residuos de pinturas con metales pesados y trapos. Los principales contaminantes identificados son hidrocarburos poliaromáticos, compuestos orgánicos volátiles, BTEX y metales pesados.

6.1.5.1. Resultados del muestreo

Se realizó la prospección de vapores y se perforaron los barrenos B18 y B19 (figura 5.10). En las muestras de suelo se analizaron metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos totales de petróleo y BTEX.

Los resultados observados en la prospección de vapores, indican una concentración máxima de 270 ppm a 0.83 m de profundidad.

En el barreno B19 el muestreo indicó 3, 287, 10 y 9 mg/kg de arsénico, bario, cromo y plomo, respectivamente. Además, se encontró un nivel de 0.121 mg/kg de acetona. Por otro lado, no se presentan niveles detectados en las concentraciones de HPA tanto en las muestras del B18 como del B19. Los niveles de HTP fueron de 53 mg/kg, en el B18, y 55 mg/kg, en el B19.

Los análisis de BTEX se realizaron en muestras del barreno B18 y no presentan niveles detectados.

Tabla 6.3. Concentraciones en la zona de pintura, báscula y estensilado

Sustancia	Concentración	
	B18	B19
Arsénico		3
Bario		287
Cadmio		ND
Cromo		10
Plomo		9
Acetona		0.121
HPA		ND
HTP	53	55
BTEX	ND	

Concentraciones en mg/kg

ND. No detectado

(FNM, 1995)

6.1.6. Zona de abasto

Como su nombre lo indica en esta zona se llevaban a cabo operaciones de abasto de combustible y agua a las locomotoras. La contaminación más importante ocurrió al aire por derrame de combustibles. El principal producto utilizado es el diesel que es menos volátil que la gasolina. Además, había un taller de pintura de señales. La zona más contaminada era la de abasto pero el suelo de esta zona fue removido y se llevó a la zona de paillería en los talleres. Los principales contaminantes esperados son hidrocarburos poliaromáticos, compuestos orgánicos volátiles y algunos metales pesados que pudiera haber en los combustibles.

6.1.6.1. Resultados del muestreo

Se realizó prospección de vapores y 8 barrenos en esta zona (del B1 al B8) (figura 5.11), obteniéndose muestras de suelo en las que se realizaron los análisis de metales pesados en muestras de los barrenos B1, B2, y B3; de bifenilos policlorados en los barrenos B1, B2 y B5; compuestos orgánicos volátiles en los barrenos B1, B2 B3, B4, B5 y B8; de compuestos orgánicos semivolátiles en los barrenos B1, B2 y B5; de hidrocarburos poliaromáticos en los barrenos B3, B6, B7 y B8; de HTP en todos los barrenos de esta zona; y BTEX en los barrenos B4, B6 y B7.

Los resultados de prospección de vapores arrojan una concentración máxima de 1990 ppm a 1.37 m de profundidad, en la zona donde se removió el suelo.

Los resultados de metales pesados y arsénico, presentaron máximas concentraciones de 2, 133, 9 y 12 mg/kg de arsénico, bario, cadmio y plomo, respectivamente. También se presentó selenio (0.07 mg/l) en análisis de lixiviación.

Los niveles de bifenilos policlorados no se detectaron por estar presentes a niveles menores de 30µg/kg.

En compuestos orgánicos volátiles las máximas concentraciones encontradas fueron de 0.174 mg/kg de acetona y no detectados en el resto de los contaminantes.

Los niveles identificados en los análisis de los compuestos orgánicos semivolátiles fueron de no detección.

En cuanto a los análisis de hidrocarburos poliaromáticos se observaron los siguientes resultados de concentraciones máximas en algunos de los compuestos de este grupo: acenafteno con 1.840 mg/kg, antraceno con 0.670 mg/kg, benzo(a)antraceno con 1.030 mg/kg, benzo(b)fluoranteno con 1.100 mg/kg, benzo(k)fluoranteno 0.997 mg/kg, benzo(a)pireno con 0.883 mg/kg, criseno con 1.629 mg/kg, fluoranteno con 2.290 mg/kg, fluoreno con 2.250 mg/kg, 1-metilnaftaleno con 1.060 mg/kg, 2-metilnaftaleno con 7.630 mg/kg, naftaleno con 2.130mg/kg, fenantreno con 4.510 mg/kg, pireno con 7.570 mg/kg.

La máxima concentración presente de HTP fue de 4450 mg/kg.

Las concentraciones máximas de BTEX fueron benceno 0.072 mg/kg, tolueno 0.247 mg/kg, etilbenceno 0.863 mg/kg, xileno 0.821 mg/kg.

Tabla 6.4. Concentraciones en la zona de abasto

Sustancias	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Arsénico	ND	2	ND*					
Bario	99.2	133	3.77*					
Cadmio	ND	ND	ND*					
Cromo	9	5	ND*					
Plomo	5	12	ND*					
BPC	ND	ND			ND			
Acetona	0.174	0.67			ND			ND
HPA			ND			Tabla 5.9	Tabla 5.9	ND
HTP	13	20	43	26	11	4300	4450	193
Benceno				ND		0.072	ND	
Tolueno				ND		0.247	0.088	
Etilbenceno				ND		0.488	0.863	
Xileno				ND		0.821	0.393	

Concentraciones en mg/kg, excepto * en mg/l

ND. No detectado

(FNM, 1995)

6.1.7. Zona de tapicería

En esta zona se realizó la prospección de vapores y dos barrenos (B14 y B15) en la parte cercana a un tanque de combustible diesel.

6.1.7.1. Resultados del muestreo

La prospección de vapores mostró máxima concentración de 90 ppm a 0.86 m de profundidad.

Se realizaron dos barrenos, B14 y B15 (figura 5.12). Los análisis no detectaron hidrocarburos poliaromáticos ni BTEX (tabla 6.5). Los hidrocarburos totales de petróleo fueron de 168 mg/kg.

Tabla 6.5. Concentraciones en la zona de tapicería

Sustancia	Concentración
HPA	ND
BTEX	ND

Concentraciones en mg/kg

ND. No detectado

(FNM, 1995)

6.1.8. Zona de fundición

En esta zona la contaminación se debe a metales pesados pero en los análisis previos no se realizó ningún muestreo. Se deben encontrar todos los residuos sólidos generados durante las operaciones de la fundición de piezas, tales residuos son escorias con metales pesados y material refractario de los hornos.

6.1.9. Zona de pailería

Las actividades en esta zona dejaron limadura de metales pesados en la nave de pailería. En la parte norte se dispuso el suelo removido de la zona de abasto (montones de aproximadamente 2 m de altura y 10,000 m² de superficie de terreno). Además, se tiró todo tipo de basura en la zona de la enfriadora.

6.1.9.1. Resultados del muestreo

En esta zona no se realizó prospección de vapores.

Se realizaron los barrenos B9 y B10 (figura 5.15) y se realizaron análisis de metales pesados, bifenilos policlorados, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos totales de petróleo, BTEX.

Los resultados indican 171 mg/kg de bario, 3 mg/kg de cadmio, 4 mg/kg cromo; no se detectaron bifenilos policlorados, ni hidrocarburos poliaromáticos, ni BTEX (tabla 6.6).

Tabla 6.6. Concentraciones en la zona de pailería

Sustancia	B9	B10
Arsénico	ND	
Bario	171	
Cadmio	3	
Cromo	4	
Plomo	ND	
BPC		ND
HPA	ND	
HTP	20	16
BTEX		ND

Concentraciones en mg/kg
ND. No detectado
(FNM, 1995)

6.1.10. Zona la laguna de "chapopote"

La contaminación de esta zona conocida como la "laguna de chapopote" se debe, principalmente, a combustible y residuos de hidrocarburos dispuestos en la laguna y al derrame de los furgones que contienen residuos de hidrocarburos ("chapopote"). A la laguna también se vertieron todo tipo de residuos. Los contaminantes de interés son hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles.

6.1.10.1. Resultados del muestreo

En esta zona se realizó prospección de vapores y se perforaron tres barrenos, B11, B12 y B13 (figura 5.18). Se llevaron a cabo análisis para identificar metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos totales de petróleo y BTEX.

En esta zona, especialmente en el barreno 12, el más cercano a la laguna de "chapopote", se tienen las concentraciones más altas obtenidas en todos los análisis realizados en todo el sitio. Los resultados se muestran en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. Concentraciones en la zona de la laguna de "chapopote"

Sustancia	B11	B12	B13
Bario	1.68*		
Selenio	0.07*		
BPC		ND	ND
Acetona		0.473	
HPA		Tabla 5.9	ND
HTP	1030	60600	13
Benceno		0.026	ND
Tolueno		0.053	ND
Etilbenceno		0.686	ND
Xileno		2.330	ND

Concentraciones en mg/kg, excepto * en mg/l
(FNM, 1995)

6.1.11. Zona de vías

En esta zona sólo se realizó la prospección de vapores de la cual se obtuvo una concentración máxima de 110 ppm a 0.75 m de profundidad.

6.2. Evaluación de la exposición

6.2.1. Identificación de las fuentes de contaminación y la distribución espacial de los contaminantes en el sitio

La contaminación en los talleres de FNM en Aguascalientes se debe a las actividades industriales realizadas, principalmente: mantenimiento de carros y coches del ferrocarril y fundición.

Por estas actividades, las fuentes contaminantes son:

- a) Tanques de almacenamiento de combustibles y aceites
- b) Furgones de combustible
- c) Suelo, con diesel, removido de la zona de abasto y reubicado en la zona de pailería
- d) Desechos de hidrocarburos y residuos sólidos en la laguna de "chapopote"
- e) Suelos contaminados con antiguos derrames de combustibles y aceites
- f) Escorias de fundición, que en el pasado, se dispersaron por acción del viento y se esparcieron en los suelos del lugar
- g) Acumulaciones de escorias de fundición y de limaduras de metales pesados
- h) Materiales abandonados
- i) Techos de asbesto
- j) Desechos sólidos dispersos en toda el área

No es posible establecer un modelo de la distribución espacial de los contaminantes con la cantidad de datos obtenidos del muestreo y porque se localizan en áreas contaminadas por fuentes diferentes. Las concentraciones de los contaminantes estudiados se presentan en las tablas 6.1-6.7.

6.2.2. Análisis de las formas de liberación de las sustancias de interés

Con la finalidad de facilitar el análisis de los contaminantes identificados se le ha agrupado en compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos poliaromáticos y metales pesados, y por ello se trataran separadamente.

Los procesos del transporte que influyen en la movilidad de los contaminantes identificados son: volatilización, solubilización, emisión de materia particulada, sorción y lixiviación.

Los compuestos orgánicos volátiles pueden volatilizarse, disolverse y luego lixivarse, y adsorberse a las partículas de suelo.

Los hidrocarburos poliaromáticos volatilizan en menor grado que los compuestos orgánicos volátiles, tienden a ser más sorbidos por las partículas del suelo, son poco solubles, y lixivian en menor grado que otros contaminantes precisamente por su preferencia a ser sorbidos.

Los metales pesados volatilizan solo cuando están metilados o formando un compuesto orgánico; sin embargo, pueden ser emitidos a la atmósfera como materia particulada. La solubilidad y la lixiviación son procesos importantes para su emisión al ambiente.

6.2.3. Rutas de migración del contaminante desde la fuente hasta un receptor potencial

Los contaminantes pueden migrar de la fuente por:

- a) Lixiviación del suelo contaminado hacia el agua subterránea,
- b) Acción del viento y
- c) A través de tuberías

6.2.4. Identificación de las poblaciones generales y sensibles de los receptores generales y potenciales

Actualmente, el sitio no está en uso por lo que la población expuesta es la ubicada en zona de uso de suelo residencial, comercial y recreativo que rodea al lugar; sin embargo, las poblaciones potencialmente expuestas serán aquellas debidas al uso futuro del lugar.

6.2.5. Estimación de las exposiciones a corto y largo plazo

Las exposiciones a largo plazo se deberán a uso de suelo residencial, comercial e industrial. Las exposiciones a corto plazo serán para trabajadores de la construcción y visitantes.

6.2.6. Concentraciones de contaminantes en los puntos de exposición

El uso de suelo potencial determina que los puntos de exposición están ubicados en el sitio mismo y fuera de él. Se decidió considerar únicamente los puntos de exposición en el sitio por ser los más adversos.

Las concentraciones de los contaminantes presentes en el lugar se muestran en las tablas 6.1-6.7.

6.2.7. Dosis del receptor

La determinación de la dosis a la que se expone la población receptora se realizó empleando las fórmulas 4.1-4.12 presentadas en la sección 4.2.3.7(dosis del receptor) y los valores que se detallan en el apéndice 2.

Los resultados obtenidos por zonas se muestran en las tablas 6.8-6.12. Indicando las diferentes exposiciones de acuerdo al uso de suelo y actividades a realizar en la rehabilitación del lugar (residencial, comercial/industrial y exposición de trabajador de la construcción); asimismo, se indica la vía de exposición (ingestión de suelo, contacto dérmico con el suelo contaminado, inhalación de partículas y vapores provenientes del suelo contaminado e ingestión de agua subterránea).

En el apéndice 2 se presenta la memoria de cálculo de las dosis de exposición, por zonas, usos de suelo y vías de exposición.

Tabla 6.8. Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de abasto*

Sustancia	Dosis en uso de suelo residencial				Dosis en uso de suelo comercial/industrial				Dosis para trabajador de la construcción			
	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.
	mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día			
Arsénico	3.4E-06	3.6E-08	2.3E-12	7.9E-07	8.4E-07	1.3E-08	8.6E-13	2.9E-07	2.0E-08	3.2E-10	2.1E-14	7.0E-09
Bario	5.2E-04	5.6E-06	3.6E-10	8.7E-05	1.3E-04	2.1E-06	1.3E-10	3.2E-05	9.4E-05	1.5E-06	9.6E-11	2.3E-05
Cromo	1.5E-05	1.6E-07	1.0E-11	5.3E-06	3.8E-06	6.0E-08	3.9E-12	2.0E-06	9.1E-08	1.4E-09	9.3E-14	4.7E-08
Plomo	2.0E-05	2.2E-07	1.4E-11	-	5.0E-06	8.0E-08	5.2E-12	-	1.2E-07	1.9E-09	1.2E-13	-
Acetona	6.8E-07	3.6E-06	3.1E-08	3.8E-03	1.7E-07	1.3E-06	1.2E-08	1.4E-03	1.2E-07	9.7E-07	8.9E-09	1.0E-03
Acenafteno	7.2E-06	3.8E-06	7.7E-08	1.1E-04	1.8E-06	1.4E-06	3.1E-08	4.0E-05	1.3E-06	1.0E-06	2.2E-08	2.9E-05
Antraceno	2.6E-06	1.4E-06	1.2E-08	1.3E-05	6.6E-07	5.2E-07	4.9E-09	4.7E-06	4.7E-07	3.7E-07	3.5E-09	3.4E-06
Benzo(a)antraceno	1.7E-06	9.2E-07	6.9E-11	8.5E-08	4.3E-07	3.4E-07	2.8E-11	3.1E-08	1.0E-08	8.2E-09	6.7E-13	7.5E-10
Benzo(b)fluoranteno	1.9E-06	9.9E-07	9.4E-11	2.3E-07	4.6E-07	3.6E-07	3.8E-11	8.4E-08	1.1E-08	8.7E-09	9.2E-13	2.0E-09
Benzo(k)fluoranteno	1.7E-06	8.9E-07	7.2E-10	2.1E-07	4.2E-07	3.3E-07	2.9E-10	7.6E-08	1.0E-08	7.9E-09	7.0E-12	1.8E-09
Benzo(a)pireno	1.5E-06	7.9E-07	3.7E-11	1.8E-08	3.7E-07	2.9E-07	1.5E-11	6.7E-09	8.9E-09	7.0E-09	3.6E-13	1.6E-10
Criseno	2.7E-06	1.5E-06	1.0E-10	9.2E-07	6.8E-07	5.4E-07	4.1E-11	3.4E-07	1.6E-08	1.3E-08	9.9E-13	8.2E-09
Fluoranteno	9.0E-06	4.8E-06	6.8E-08	1.6E-05	2.2E-06	1.8E-06	2.7E-08	5.9E-06	1.6E-06	1.3E-06	2.0E-08	4.2E-06
Fluoreno	8.8E-06	4.7E-06	1.9E-08	8.2E-05	2.2E-06	1.7E-06	7.6E-09	3.0E-05	1.6E-06	1.3E-06	5.5E-09	2.2E-05
Naftaleno	8.4E-06	4.5E-06	6.4E-08	2.8E-04	2.1E-06	1.6E-06	2.6E-08	1.0E-04	1.5E-06	1.2E-06	1.9E-08	7.5E-05
Fenantreno	1.8E-05	9.4E-06	2.2E-08	8.5E-05	4.4E-06	3.5E-06	8.7E-09	3.1E-05	3.2E-06	2.5E-06	6.3E-09	2.3E-05
Pireno	3.0E-05	1.6E-05	6.9E-09	5.3E-05	7.4E-06	5.9E-06	2.8E-09	1.9E-05	5.3E-06	4.2E-06	2.0E-09	1.4E-05
Benceno	1.2E-07	6.5E-07	1.8E-08	8.5E-05	3.0E-08	2.4E-07	7.4E-09	3.1E-05	7.2E-10	5.7E-09	1.8E-10	7.6E-07
Tolueno	9.7E-07	5.2E-06	1.2E-07	2.1E-04	2.4E-07	1.9E-06	5.0E-08	7.7E-05	1.7E-07	1.4E-06	3.6E-08	5.6E-05
Etilbenceno	3.4E-06	1.8E-05	2.9E-07	2.1E-04	8.4E-07	6.7E-06	1.2E-07	7.6E-05	6.1E-07	4.8E-06	8.5E-08	5.5E-05
Xileno	3.2E-06	1.7E-05	2.8E-07	8.6E-04	8.0E-07	6.3E-06	1.1E-07	3.2E-04	5.8E-07	4.6E-06	8.2E-08	2.3E-04

*Calculados utilizando las expresiones 4.1 a 4.12 del capítulo 4

Tabla 6.9. Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de laguna de "chapopote"*

Sustancia	Dosis en uso de suelo residencial				Dosis en uso de suelo comercial/industrial				Dosis para trabajador de la construcción			
	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.
	mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día			
Bario	6.60E-06	7.03E-08	3.13E-12	1.09E-06	1.64E-06	2.60E-08	1.16E-12	4.04E-07	1.18E-06	1.87E-08	8.33E-13	2.91E-07
Acetona	1.86E-06	9.90E-06	6.33E-08	2.01E-01	4.63E-07	3.66E-06	2.56E-08	7.44E-02	3.33E-07	2.63E-06	1.84E-08	5.36E-02
Diclorometano	4.12E-07	2.20E-06	1.96E-13	1.38E-03	1.03E-07	8.12E-07	7.23E-14	5.11E-04	2.47E-09	1.95E-08	1.74E-15	1.23E-05
Acenafteno	4.71E-05	2.51E-05	3.42E-07	7.05E-04	1.17E-05	9.28E-06	1.39E-07	2.60E-04	8.45E-06	6.68E-06	9.98E-08	1.87E-04
Acenaftileno	1.70E-05	9.04E-06	3.17E-08	4.56E-04	4.23E-06	3.34E-06	1.28E-08	1.68E-04	3.04E-06	2.40E-06	9.24E-09	1.21E-04
Antraceno	2.03E-04	1.08E-04	6.34E-07	9.75E-04	5.05E-05	3.99E-05	2.57E-07	3.60E-04	3.64E-05	2.87E-05	1.85E-07	2.59E-04
Benzo(a)antraceno	1.75E-05	9.33E-06	4.79E-10	8.55E-07	4.36E-06	3.45E-06	1.93E-10	3.16E-07	1.05E-07	8.27E-08	4.64E-12	7.58E-09
Benzo(k)fluoranteno	1.50E-05	8.01E-06	4.40E-09	1.84E-06	3.74E-06	2.96E-06	1.78E-09	6.81E-07	8.99E-08	7.10E-08	4.27E-11	1.63E-08
Benzo(ghi)perileno	3.01E-05	1.60E-05	8.32E-10	1.27E-06	7.50E-06	5.92E-06	3.36E-10	4.68E-07	5.40E-06	4.26E-06	2.42E-10	3.37E-07
Benzo(a)pireno	3.53E-06	1.88E-06	6.03E-11	4.33E-08	8.81E-07	6.96E-07	2.43E-11	1.60E-08	2.11E-08	1.67E-08	5.84E-13	3.84E-10
Criseno	2.83E-05	1.51E-05	7.27E-10	9.53E-06	7.05E-06	5.57E-06	2.94E-10	3.52E-06	1.69E-07	1.34E-07	7.06E-12	8.45E-08
Dibenzo(a,h)antraceno	3.10E-06	1.65E-06	2.64E-11	6.33E-08	7.72E-07	6.10E-07	1.06E-11	2.34E-08	1.85E-08	1.46E-08	2.55E-13	5.61E-10
Fluoranteno	9.15E-05	4.87E-05	4.73E-07	1.62E-04	2.28E-05	1.80E-05	1.91E-07	6.00E-05	1.64E-05	1.30E-05	1.38E-07	4.32E-05
Fluoreno	5.65E-05	3.01E-05	8.22E-08	5.22E-04	1.41E-05	1.11E-05	3.33E-08	1.93E-04	1.01E-05	8.01E-06	2.40E-08	1.39E-04
Indeno(1,2,3-cd)pireno	4.78E-06	2.55E-06	1.04E-11	2.01E-07	1.19E-06	9.41E-07	4.15E-12	7.44E-08	2.86E-08	2.26E-08	9.95E-14	1.79E-09
Naftaleno	6.36E-05	3.39E-05	3.32E-07	2.14E-03	1.59E-05	1.25E-05	1.34E-07	7.90E-04	1.14E-05	9.02E-06	9.67E-08	5.69E-04
Fenantreno	1.97E-04	1.05E-04	1.65E-07	9.47E-04	4.90E-05	3.87E-05	6.66E-08	3.50E-04	3.53E-05	2.79E-05	4.80E-08	2.52E-04
Pireno	1.73E-04	9.21E-05	2.74E-08	3.07E-04	4.31E-05	3.40E-05	1.11E-08	1.13E-04	3.10E-05	2.45E-05	7.98E-09	8.16E-05
Benceno	4.38E-08	2.33E-07	4.51E-09	3.08E-05	1.09E-08	8.61E-08	1.83E-09	1.14E-05	2.62E-10	2.07E-09	4.38E-11	2.73E-07
Tolueno	2.08E-07	1.11E-06	1.81E-08	4.48E-05	5.19E-08	4.10E-07	7.34E-09	1.65E-05	3.73E-08	2.95E-07	5.29E-09	1.19E-05
Etilbenceno	2.69E-06	1.44E-05	1.58E-07	1.63E-04	6.71E-07	5.30E-06	6.41E-08	6.02E-05	4.83E-07	3.82E-06	4.61E-08	4.34E-05
Xileno	9.15E-06	4.87E-05	5.45E-07	2.44E-03	2.28E-06	1.80E-05	2.21E-07	9.00E-04	1.64E-06	1.30E-05	1.59E-07	6.48E-04

*Calculados utilizando las expresiones 4.1 a 4.12 del capítulo 4

*Tabla 6.10. Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de ejes y ruedas**

Sustancia	Dosis en uso de suelo residencial				Dosis en uso de suelo comercial/industrial				Dosis para trabajador de la construcción			
	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.
	mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día			
Arsénico	3.37E-06	3.59E-08	1.77E-12	7.92E-07	8.39E-07	1.33E-08	6.54E-13	2.93E-07	2.01E-08	3.18E-10	1.57E-14	7.02E-09
Bario	3.97E-04	4.23E-06	2.08E-10	6.58E-05	9.88E-05	1.56E-06	7.70E-11	2.43E-05	7.12E-05	1.12E-06	5.55E-11	1.75E-05
Cromo	1.35E-05	1.43E-07	7.08E-12	4.74E-06	3.35E-06	5.30E-08	2.61E-12	1.75E-06	8.05E-08	1.27E-09	6.28E-14	4.20E-08
Plomo	1.35E-05	1.43E-07	7.08E-12	-	3.35E-06	5.30E-08	2.61E-12	0.00E+00	8.05E-08	1.27E-09	6.28E-14	-

*Tabla 6.11. Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de pailería**

Sustancia	Dosis en uso de suelo residencial				Dosis en uso de suelo comercial/industrial				Dosis para trabajador de la construcción			
	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.
	mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día			
Bario	6.72E-04	7.16E-06	2.75E-10	1.11E-04	1.67E-04	2.64E-06	1.02E-10	4.11E-05	1.20E-04	1.90E-06	7.33E-11	2.96E-05
Cadmio	5.05E-06	5.38E-08	2.07E-12	4.55E-07	1.26E-06	1.99E-08	7.65E-13	1.68E-07	3.02E-08	4.77E-10	1.84E-14	4.03E-09
Cromo	6.73E-06	7.17E-08	2.76E-12	2.37E-06	1.68E-06	2.65E-08	1.02E-12	8.75E-07	4.03E-08	6.36E-10	2.45E-14	2.10E-08

*Tabla 6.12. Dosis de exposición a contaminantes para diferentes usos de suelo en zona de pintura, báscula y estensilado**

Sustancia	Dosis en uso de suelo residencial				Dosis en uso de suelo comercial/industrial				Dosis para trabajador de la construcción			
	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.	Ing. de suelo	Contacto dérmico	Inhalación	Ing. de agua subt.
	mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día				mg/kg de peso/día			
Arsénico	5.05E-06	5.38E-08	3.47E-12	1.19E-06	1.26E-06	1.99E-08	1.28E-12	4.39E-07	3.02E-08	4.77E-10	3.07E-14	1.05E-08
Bario	1.13E-03	1.20E-05	7.73E-10	1.87E-04	2.81E-04	4.44E-06	2.86E-10	6.90E-05	2.02E-04	3.19E-06	2.06E-10	4.97E-05
Cromo	1.68E-05	1.79E-07	1.16E-11	5.92E-06	4.19E-06	6.63E-08	4.27E-12	2.19E-06	1.01E-07	1.59E-09	1.02E-13	5.25E-08
Plomo	1.51E-05	1.61E-07	1.04E-11	-	3.77E-06	5.96E-08	3.84E-12	-	9.06E-08	1.43E-09	9.22E-14	-
Acetona	4.75E-07	2.53E-06	2.11E-08	2.62E-03	1.18E-07	9.35E-07	8.56E-09	9.69E-04	8.52E-08	6.73E-07	6.16E-09	6.98E-04

*Calculados utilizando las expresiones 4.1 a 4.12 del capítulo 4

6.3. Evaluación de la toxicidad

Los estudios de toxicidad de las sustancias químicas permiten establecer valores de dosis de referencia (RfD reference dose) para sustancias no cancerígenas, y factores de pendiente (SF slope factor) para sustancias cancerígenas. En este estudio se emplean valores de RfD y SF obtenidos de literatura. En la tabla 6.13 se presentan los datos de toxicidad obtenidos para los contaminantes de interés en el sitio.

Tabla 6.13. Datos toxicológicos de los contaminantes de interés

Sustancia	Clase	RfD _o	RfD _i	SF _o	SF _i
		Ingestión mg/kg/día	Inhalación mg/kg/día	Ingestión (mg/kg-día) ⁻¹	Inhalación (mg/kg-día) ⁻¹
METALES					
Arsénico*	A	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01
Bario	D	7.00E-02	1.40E-04		
Cadmio	B1	5.00E-04	6.29E+00		6.30E+00
Cromo	A	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01
VOLÁTILES					
Acetona	D	1.00E-01			
Diclorometano	B	6.00E-02		7.50E-03	1.65E-03
SEMIVOLÁTILES E HPA					
Acenafteno	D	6.00E-02			
Acenaftileno	D	4.00E-03			
Antraceno	D	3.00E-01			
Benzo(a)antraceno	B2		2.86E-01	7.30E-01	3.08E-01
Benzo(b)fluoranteno	B2			7.30E-01	3.08E-01
Benzo(k)fluoranteno	B2		1.00E-01	7.30E-02	3.08E-02
Benzo(ghi)perileno	D	3.00E-02			
Benzo(a)pireno	B2		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00
Criseno	B2			1.15E+00	1.15E+00
Dibenzo(a,h)antraceno	B2		1.14E-01	7.30E+00	
Fluoranteno	D	4.00E-02			
Fluoreno	D	4.00E-02			
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2		3.14E-01	7.30E-01	3.08E-01
Naftaleno	D	2.00E-02	8.57E-04		
Fenantreno	D	3.00E-02			
Pireno	D	3.00E-02			
BTEX					
Benceno	A	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02
Tolueno	D	2.00E-01	1.14E-01		
Etilbenceno	D	1.00E-01	2.86E-01		
Xileno	D	2.00E+00	8.57E-02		

*El arsénico es un metaloide

A cancerígeno humano. B1 y B2 probable cancerígeno humano. D no cancerígeno

RfD_o = dosis de referencia oral, RfD_i = dosis de referencia por inhalación, SF_o = factor de pendiente oral, SF_i = factor de pendiente por inhalación

(ASTM, 1995; Buonicore, 1996; GSI, 1999; IRIS, 1999)

6.4. Caracterización del riesgo

Como ya se mencionó en el capítulo 4, la caracterización de riesgo consiste en la determinación de los valores cuantitativos de riesgo y cocientes de peligrosidad.

Los valores de riesgo, R, de contraer cáncer se obtienen empleando la ecuación 4.13 con los valores de dosis de exposición (tablas 6.8 a 6.12) y los valores de factor de pendiente (SF slope factor) (tabla 6.13) para las sustancias cancerígenas presentes en cada una de las zonas de los talleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, Aguascalientes.

Los valores de cociente de peligrosidad (CP), determinado para sustancias con efectos a la salud diferentes al cáncer, se obtienen empleando la ecuación 4.14 y sustituyendo las dosis de exposición (tablas 6.8 a 6.12) y las dosis de referencia (RfD reference dose) (tabla 6.13).

Los resultados de los valores de riesgo y cocientes de peligrosidad para los compuestos presentes en las zonas del sitio de estudio, considerando los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición (ingestión y contacto dérmico de suelo contaminado, inhalación de partículas y vapores provenientes del suelo contaminado e ingestión de agua subterránea) se muestran en las tablas 6.14 – 6.18.

En estas tablas se sombrea los valores que superan los límites permisibles, para riesgo, 1×10^{-6} , y para cociente de peligrosidad, 1. Además, se subrayan los valores en los que coinciden exactamente con el valor límite o umbral.

Tabla 6.14. Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de abasto*

Sustancia	C	CP (residencial)			R (residencial)			CP (comercial/industrial)			R (comercial/industrial)			CP (trabajador de la construcción)			R (trabajador de la construcción)		
		CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}
Arsénico	A	0.0		0.0		4.E-11	1.E-06	0.0	0.0	0.0	1.E-06	1.E-11	4.E-07	0.0		0.0	3.E-08	3.E-13	1.E-08
Bario	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	0.0	0.0	0.0	1.E-07	4.E-10	4.E-08	0.0	0.0	0.0	3.E-08	2.E-10	1.E-08	0.0	0.0	0.0	7.E-10	4.E-12	3.E-10
Acetona	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Acenafteno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Antraceno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Benzo(a) antraceno	B2		0.0		1.E-06	2.E-11	6.E-08		0.0		6.E-07	9.E-12	2.E-08		0.0		1.E-08	2.E-13	5.E-10
Benzo(b) fluoranteno	B2				1.E-06	3.E-11	2.E-07				6.E-07	1.E-11	6.E-08				1.E-08	3.E-13	1.E-09
Benzo(k) fluoranteno	B2		0.0		2.E-07	2.E-11	2.E-08		0.0		5.E-08	9.E-12	6.E-09		0.0		1.E-09	2.E-13	1.E-10
Benzo(a) pireno	B2		0.0		1.E-05	3.E-10	1.E-07		0.0		1.E-06	1.E-10	5.E-08		0.0		1.E-07	3.E-12	1.E-09
Criseno	B2				1.E-05	1.E-10	1.E-06				1.E-06	5.E-11	4.E-07				3.E-08	1.E-12	9.E-09
Fluoranteno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Fluoreno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Naftaleno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Fenantreno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Pireno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Benceno	A	0.0	0.0	0.0	2.E-08	5.E-10		0.0	0.0	0.0	8.E-09	2.E-10	9.E-07	0.0	0.0	0.0	2.E-10	5.E-12	2.E-08
Tolueno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Etilbenceno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Xileno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Suma		0.0	0.0	0.1		1.E-09	5.E-06	0.0	0.0	0.0	9.E-06	6.E-10	2.E-06	0.0	0.0	0.0	2.E-07	1.E-11	5.E-08

*Calculados utilizando las expresiones 4.13 y 4.14 del capítulo 4

CP. Cociente de peligrosidad. CP_o. Cociente de peligrosidad oral. CP_i. Cociente de peligrosidad por inhalación. CP_{ag}. Cociente de peligrosidad por ingestión de agua subterránea

R. Riesgo. R_o. Riesgo oral. R_i. Riesgo por inhalación. R_{ag}. Riesgo por ingestión de agua subterránea

Las celdas sombreadas indican que se ha excedido el valor aceptable de riesgo o cociente de peligrosidad. Los valores subrayados indican que se está en el valor límite o umbral.

Tabla 6.15. Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de laguna de "chapopote"*

Sustancia	C	CP (residencial)			R (residencial)			CP (comercial/industrial)			R (comercial/industrial)			CP (trabajador de la construcción)			R (trabajador de la construcción)		
		CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}
Bario	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Acetona	D	0.0		2.0				0.0		0.7				0.0		0.5			
Diclorometano	B	0.0		0.0	2.E-08	3.E-16	1.E-05	0.0		0.0	7.E-09	1.E-16	4.E-06	0.0		0.0	2.E-10	3.E-18	9.E-08
Acenafteno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Acenaftileno	D	0.0		0.1				0.0		0.0				0.0		0.0			
Antraceno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Benzo(a) antraceno	B2		0.0		2.E-05	1.E-10	6.E-07		0.0		6.E-06	6.E-11	2.E-07		0.0		1.E-07	1.E-12	6.E-09
Benzo(k) fluoranteno	B2		0.0		2.E-06	1.E-10	1.E-07		0.0		5.E-07	5.E-11	5.E-08		0.0		1.E-08	1.E-12	1.E-09
Benzo(ghi) perileno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Benzo(a) pireno	B2		0.0		4.E-05	4.E-10	3.E-07		0.0		1.E-05	2.E-10	1.E-07		0.0		3.E-07	4.E-12	3.E-09
Criseno	B2				5.E-05	8.E-10	1.E-05				1.E-05	3.E-10	4.E-06				3.E-07	8.E-12	1.E-07
Dibenzo(a,h) antraceno	B2		0.0		3.E-05		5.E-07		0.0		1.E-05		2.E-07		0.0		2.E-07		4.E-09
Fluoranteno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Fluoreno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2		0.0		5.E-06	3.E-12	1.E-07		0.0		2.E-06	1.E-12	5.E-08		0.0		4.E-08	3.E-14	1.E-09
Naftaleno	D	0.0	0.0	0.1				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Fenantreno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Pireno	D	0.0		0.0				0.0		0.0				0.0		0.0			
Benceno	A	0.0	0.0	0.0	8.E-09	1.E-10	9.E-07	0.0	0.0	0.0	3.E-09	5.E-11	3.E-07	0.0	0.0	0.0	7.E-11	1.E-12	8.E-09
Tolueno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Etilbenceno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Xileno	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Suma		0.0	0.0	2.3	1.E-04	2.E-09	2.E-05	0.0	0.0	0.9	3.E-05	7.E-10	9.E-06	0.0	0.0	0.6	8.E-07	2.E-11	2.E-07

*Calculados utilizando las expresiones 4.13 y 4.14 del capítulo 4

CP. Cociente de peligrosidad. CP_o. Cociente de peligrosidad oral. CP_i. Cociente de peligrosidad por inhalación. CP_{ag}. Cociente de peligrosidad por ingestión de agua subterránea

R. Riesgo. R_o. Riesgo oral. R_i. Riesgo por inhalación. R_{ag}. Riesgo por ingestión de agua subterránea

Las celdas sombreadas indican que se ha excedido el valor aceptable de riesgo o cociente de peligrosidad. Los valores subrayados indican que está en el valor límite o umbral.

Tabla 6.16. Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de ejes y ruedas*

Sustancia	C	CP (residencial)			R (residencial)			CP (comercial/industrial)			R (comercial/industrial)			CP (trabajador de la construcción)			R (trabajador de la construcción)		
		CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}
Arsénico	A	0.0		0.0		3.E-11	1.E-06	0.0	0.0	0.0	1.E-06	1.E-11	4.E-07	0.0		0.0	3.E-08	2.E-13	1.E-08
Bario	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	0.0	0.0	0.0	1.E-07	3.E-10	3.E-08	0.0	0.0	0.0	2.E-08	1.E-10	1.E-08	0.0	0.0	0.0	6.E-10	3.E-12	3.E-10
Suma		0.0	0.0	0.0	5.E-06	3.E-10	1.E-06	0.0	0.0	0.0	1.E-06	1.E-10	5.E-07	0.0	0.0	0.0	3.E-08	3.E-12	1.E-08

Tabla 6.17. Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de pailería*

Sustancia	C	CP (residencial)			R (residencial)			CP (comercial/industrial)			R (comercial/industrial)			CP (trabajador de la construcción)			R (trabajador de la construcción)		
		CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}
Bario	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Cadmio	B1	0.0	0.0	0.0		1.E-11		0.0	0.0	0.0		5.E-12		0.0	0.0	0.0		1.E-13	
Cromo	A	0.0	0.0	0.0	5.E-08	1.E-10	2.E-08	0.0	0.0	0.0	1.E-08	4.E-11	6.E-09	0.0	0.0	0.0	3.E-10	1.E-12	2.E-10
Suma		0.0	0.0	0.0	5.E-08	1.E-10	2.E-08	0.0	0.0	0.0	1.E-08	5.E-11	6.E-09	0.0	0.0	0.0	3.E-10	1.E-12	2.E-10

Tabla 6.18. Cocientes de peligrosidad y riesgos para diferentes usos de suelo en la zona de pintura, báscula y estensilado*

Sustancia	C	CP (residencial)			R (residencial)			CP (comercial/industrial)			R (comercial/industrial)			CP (trabajador de la construcción)			R (trabajador de la construcción)		
		CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}	CP _o	CP _i	CP _{ag}	R _o	R _i	R _{ag}
Arsénico	A	0.0		0.0		5.E-11		0.0	0.0	0.0		2.E-11	7.E-07	0.0		0.0	5.E-08	5.E-13	2.E-08
Bario	D	0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0				0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	0.0	0.0	0.0	1.E-07	5.E-10	4.E-08	0.0	0.0	0.0	3.E-08	2.E-10	2.E-08	0.0	0.0	0.0	7.E-10	4.E-12	4.E-10
Plomo	B2																		
Acetona	D	0.0		0.0				0.0	0.0	0.0				0.0		0.0			
Suma		0.0	0.0	0.0	8.E-06	5.E-10	2.E-06	0.0	0.0	0.0	2.E-06	2.E-10	7.E-07	0.0	0.0	0.0	5.E-08	5.E-12	2.E-08

*Calculados utilizando las expresiones 4.13 y 4.14 del capítulo 4

CP. Cociente de peligrosidad. CP_o. Cociente de peligrosidad oral. CP_i. Cociente de peligrosidad por inhalación. CP_{ag}. Cociente de peligrosidad por ingestión de agua subterránea

R. Riesgo. R_o. Riesgo oral. R_i. Riesgo por inhalación. R_{ag}. Riesgo por ingestión de agua subterránea

Las celdas sombreadas indican que se ha excedido el valor aceptable de riesgo o cociente de peligrosidad.

6.5. Determinación de los niveles de limpieza específicos del sitio

Empleando la metodología descrita en el capítulo 4, fórmulas 4.15 a 4.22, se obtuvieron los valores de concentraciones de contaminantes que son aceptables de acuerdo con el análisis de riesgo a la salud.

En las tablas 6.19 a 6.23 se presentan las concentraciones permisibles en el sitio de estudio, por zonas, considerando el uso de suelo, las actividades que se podrían llevar a cabo en el sitio y las vías de exposición.

En el apéndice 2 se presenta la memoria de cálculo de los niveles, concentraciones límite, de limpieza específicos del sitio.

Tabla 6.19. Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de abasto*

Sustancia	C	Conc. (mg/kg)	Suelo (residencial) (mg/kg)		Agua (residencial) (mg/kg)		Suelo (com/ind) (mg/kg)		Agua (com/ind) (mg/kg)		Suelo (constructor) (mg/kg)		Agua (constructor) (mg/kg)	
			no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno
Arsénico	A	2	1.76E+02		7.58E+02		7.04E+02		2.05E+03	4.56E+00	2.93E+04	6.52E+01	8.55E+04	1.90E+02
Bario	D	133	1.76E+04		1.07E+05		7.04E+04		2.91E+05		9.78E+04		4.04E+05	
Cromo	A	9	1.76E+03	8.02E+01	5.07E+03	2.31E+02	7.04E+03	3.20E+02	1.37E+04	6.26E+02	2.93E+05	1.33E+04	5.71E+05	2.61E+04
Acetona	D	0.174	4.02E+03		4.61E+00		1.15E+04		1.25E+01		1.59E+04		1.73E+01	
Acenafteno	D	1.84	9.97E+03		1.02E+03		3.43E+04		2.77E+03		4.76E+04		3.84E+03	
Antraceno	D	0.67	4.98E+04		1.59E+04		1.71E+05		4.30E+04		2.38E+05		5.97E+04	
Benzo(a) antraceno	B2	1.03	4.26E+09	3.31E+00		1.67E+01	1.05E+10	1.82E+00		4.51E+01	4.39E+11	7.60E+01		1.88E+03
Benzo(b) fluoranteno	B2	1.1				6.64E+00		1.82E+00		1.80E+01		7.60E+01		7.49E+02
Benzo(k) fluoranteno	B2	0.997	1.39E+08	5.31E+00		6.64E+01	3.44E+08	1.82E+01		1.80E+02	1.43E+10	7.60E+02		7.49E+03
Benzo(a) pireno	B2	0.883	7.52E+10			6.64E+00	1.86E+11		1.80E+01	7.76E+12	7.60E+00		7.49E+02	
Criseno	B2	1.62							4.15E+00		4.83E+01		1.73E+02	
Fluoranteno	D	2.29	6.65E+03		5.74E+03		2.28E+04		1.55E+04		3.17E+04		2.16E+04	
Fluoreno	D	2.25	6.65E+03		1.10E+03		2.28E+04		2.99E+03		3.17E+04		4.15E+03	
Naftaleno	D	2.13	2.98E+03		1.51E+02		9.84E+03		4.10E+02		1.37E+04		5.69E+02	
Fenantreno	D	4.51	4.98E+03		1.59E+03		1.71E+04		4.30E+03		2.38E+04		5.97E+03	
Pireno	D	7.57	4.98E+03		4.31E+03		1.71E+04		1.17E+04		2.38E+04		1.62E+04	
Benceno	A	0.072	2.70E+02	3.16E+00	2.53E+00		7.67E+02	8.99E+00	6.86E+00	7.89E-02	3.19E+04	3.75E+02	2.86E+02	3.29E+00
Tolueno	D	0.247	7.77E+03		2.37E+02		2.21E+04		6.41E+02		3.07E+04		8.90E+02	
Etilbenceno	D	0.863	4.01E+03		4.21E+02		1.14E+04		1.14E+03		1.59E+04		1.58E+03	
Xileno	D	0.821	6.10E+04		1.91E+03		1.68E+05		5.18E+03		2.33E+05		7.19E+03	

*Calculados utilizando las expresiones 4.15-4.22 del capítulo 4

Las celdas sombreadas indican que la concentración observada excede el nivel permisible.

Tabla 6.20. Concentraciones limite para diferentes usos de suelo en la zona de laguna de "chapopote"*

Sustancia	C	Conc. (mg/kg)	Suelo (residencial) (mg/kg)		Agua (residencial) (mg/kg)		Suelo (com/ind) (mg/kg)		Agua (com/ind) (mg/kg)		Suelo (constructor) (mg/kg)		Agua (constructor) (mg/kg)	
			no cancerigeno	cancerigeno	no cancerigeno	cancerigeno	no cancerigeno	cancerigeno	no cancerigeno	cancerigeno	no cancerigeno	cancerigeno	no cancerigeno	cancerigeno
Bario	D	1.68	4.11E+04		2.51E+05		1.64E+05		6.79E+05		6.84E+06		2.83E+07	
Acetona	D	0.473	9.39E+03		5.48E-01		2.68E+04		1.48E+00		1.12E+06		6.18E+01	
Diclorometano	B	0.245	5.63E+03	1.25E+01	1.06E+01	2.36E-02	1.61E+04	3.57E+01	2.87E+01	6.39E-02	6.70E+05	1.49E+03	1.20E+03	2.66E+00
Acenafteno	D	12	2.33E+04		2.38E+03		7.99E+04		6.45E+03		3.33E+06		2.69E+05	
Acenaftileno	D	4.32	1.55E+03		8.85E+01		5.33E+03		2.39E+02		2.22E+05		9.98E+03	
Antraceno	D	51.6	1.16E+05		3.70E+04		4.00E+05		1.00E+05		1.67E+07		4.18E+06	
Benzo(a) antraceno	B2	10.4	6.21E+09	5.31E-01		1.67E+01	1.54E+10	1.82E+00		4.51E+01	6.40E+11	7.60E+01		1.88E+03
Benzo(k) fluoranteno	B2	8.93	2.03E+08	5.31E+00		6.64E+01	5.02E+08	1.82E+01		1.80E+02	2.09E+10	7.60E+02		7.49E+03
Benzo(ghi) perileno	D	7.66	1.16E+04		4.23E+05		4.00E+04		1.14E+06		1.67E+06		4.77E+07	
Benzo(a) pireno	B2	2.1	1.10E+11	5.31E-02		6.64E+00	2.71E+11	1.82E-01		1.80E+01	1.13E+13	7.60E+00		7.49E+02
Criseno	B2	16.8		3.37E-01		1.53E+00		1.16E+00		4.15E+00		4.83E+01		1.73E+02
Dibenzo(a,h)a ntraceno	B2	1.84	7.96E+09	5.31E-02		3.98E+00	1.98E+10	1.82E-01		1.08E+01	8.24E+11	7.60E+00		4.49E+02
Fluoranteno	D	23.3	1.55E+04		1.34E+04		5.33E+04		3.63E+04		2.22E+06		1.51E+06	
Fluoreno	D	14.4	1.55E+04		2.58E+03		5.33E+04		6.97E+03		2.22E+06		2.91E+05	
Indeno(1,2,3- cd)pireno	B2	2.84	8.55E+10	5.31E-01		1.93E+01	2.15E+11	1.82E+00		5.23E+01	8.97E+12	7.60E+01		2.18E+03
Naftaleno	D	16.2	7.18E+03		3.53E+02		2.40E+04		9.56E+02		1.00E+06		3.99E+04	
Fenantreno	D	50.1	1.16E+04		3.70E+03		4.00E+04		1.00E+04		1.67E+06		4.18E+05	
Pireno	D	44	1.16E+04		1.00E+04		4.00E+04		2.72E+04		1.67E+06		1.13E+06	
Benceno	A	0.026	2.74E+04	3.19E+00	2.53E+00	2.91E-02	7.78E+02	9.07E+00	6.86E+00	7.89E-02	3.24E+04	3.78E+02	2.86E+02	3.29E+00
Tolueno	D	0.053	1.83E+04		5.52E+02		5.21E+04		1.50E+03		2.17E+06		6.23E+04	
Etilbenceno	D	0.686	9.36E+03		9.82E+02		2.67E+04		2.66E+03		1.11E+06		1.11E+05	
Xileno	D	2.33	1.54E+05		4.46E+03		4.27E+05		1.21E+04		1.78E+07		5.03E+05	

*Calculados utilizando las expresiones del capítulo 4

Las celdas sombreadas indican que la concentración observada excede el nivel permisible.

Tabla 6.21. Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de ejes y ruedas*

Sustancia	C	Conc. (mg/kg)	Suelo (residencial) (mg/kg)		Agua (residencial) (mg/kg)		Suelo (com/ind) (mg/kg)		Agua (com/ind) (mg/kg)		Suelo (constructor) (mg/kg)		Agua (constructor) (mg/kg)	
			no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno
Arsénico	A	2	1.76E+02		7.58E+02		7.04E+02		2.05E+03	4.56E+00	2.93E+04	6.52E+01	8.55E+04	1.90E+02
Bario	D	101	1.76E+04		1.07E+05		7.04E+04		2.91E+05		9.78E+04		4.04E+05	
Cromo	A	8	1.76E+03	8.03E+01	5.07E+03	2.31E+02	7.04E+03	3.20E+02	1.37E+04	6.26E+02	2.93E+05	1.33E+04	5.71E+05	2.61E+04

*Calculados utilizando las expresiones del capítulo 4

Las celdas sombreadas indican que la concentración observada excede el nivel permisible.

Tabla 6.22. Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de pailería*

Sustancia	C	Conc. (mg/kg)	Suelo (residencial) (mg/kg)		Agua (residencial) (mg/kg)		Suelo (com/ind) (mg/kg)		Agua (com/ind) (mg/kg)		Suelo (constructor) (mg/kg)		Agua (constructor) (mg/kg)	
			no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno
Bario	D	171	1.76E+04		1.07E+05		7.04E+04		2.91E+05		9.78E+04		4.04E+05	
Cadmio	B1	3	2.94E+02	2.30E+05	3.30E+03		1.17E+03	6.22E+05	8.93E+03		4.89E+04	2.59E+07	3.72E+05	
Cromo	A	4	1.76E+03	8.03E+01	5.07E+03	2.31E+02	7.04E+03	3.20E+02	1.37E+04	6.26E+02	2.93E+05	1.34E+04	5.71E+05	2.61E+04

*Calculados utilizando las expresiones del capítulo 4

Las celdas sombreadas indican que la concentración observada excede el nivel permisible.

Tabla 6.23. Concentraciones límite para diferentes usos de suelo en la zona de pintura, báscula y estensilado*

Sustancia	C	Conc. (mg/kg)	Suelo (residencial) (mg/kg)		Agua (residencial) (mg/kg)		Suelo (com/ind) (mg/kg)		Agua (com/ind) (mg/kg)		Suelo (constructor) (mg/kg)		Agua (constructor) (mg/kg)	
			no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno	no cancerígeno	cancerígeno
Arsénico	A	3	1.76E+02		7.58E+02		7.04E+02		2.05E+03	4.56E+00	2.93E+04	6.52E+01	8.55E+04	1.90E+02
Bario	D	287	1.76E+04		1.07E+05		7.04E+04		2.91E+05		9.78E+04		4.04E+05	
Cromo	A	10	1.76E+03	8.02E+01	5.07E+03	2.31E+02	7.04E+03	3.20E+02	1.37E+04	6.26E+02	2.93E+05	1.33E+04	5.71E+05	2.61E+04
Acetona	D	0.121	8.05E+03		9.23E+00		1.15E+04		1.25E+01		1.59E+04		1.73E+01	

*Calculados utilizando las expresiones del capítulo 4

Las celdas sombreadas indican que la concentración observada excede el nivel permisible.

Capítulo 7

ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN EN LOS "TALLERES DE FNM EN AGUASCALIENTES, AGS."

Para elegir diferentes alternativas de rehabilitación para los Talleres se empleó la metodología descrita en el capítulo 4.

En la presente investigación de los talleres de FNM en Aguascalientes se ha llevado a cabo primero la descripción del problema en los capítulos 5 y 6, revisando las características geológicas, identificando las fuentes contaminantes, los contaminantes presentes y las poblaciones potencialmente expuestas, así como las vías y rutas de exposición en el lugar. Se ha encontrado que el nivel freático es profundo, más de 100 m, el suelo que está en las zonas del sitio es principalmente areno limoso y areno arcilloso y se ha identificado que los principales contaminantes son hidrocarburos poliaromáticos, algunos metales (por ejemplo plomo), y arsénico.

Cabe señalar que las poblaciones expuestas estarán en función del uso futuro del sitio (residencial, comercial e industrial). Además de los trabajadores de la construcción expuestos durante la fase de rehabilitación del lugar. Que las vías principales de exposición podrían ser el contacto directo con el suelo o la ingestión de agua subterránea contaminada por los lixiviados provenientes del suelo contaminado.

Aunque también se realizó la evaluación de riesgo por la exposición a partículas y vapores provenientes de los contaminantes presentes en el suelo contaminado, esto no representa un riesgo a la salud significativo lo cual era de esperarse pues los contaminantes han permanecido bastantes años y no se deben a disposición de materiales y residuos, derrames o fugas recientes.

7.1. Objetivos de la rehabilitación

Los objetivos primordiales, que se deben alcanzar para rehabilitar los Talleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, son:

1. Proteger a la población de ingestión y contacto dérmico con suelos contaminados, seleccionando la mejor alternativa de rehabilitación para el medio afectado y de tratamiento y disposición de los residuos peligrosos presentes en el lugar
2. Prevenir la contaminación del agua subterránea por los lixiviados provenientes del suelo afectado, considerando las alternativas más viables desde el punto de vista costo - beneficio

7.2. Desarrollo de alternativas

Para llevar a cabo el desarrollo de las alternativas se han establecido cinco etapas: (LaGrega, 1996)

- a) Identificación de las acciones generales de respuesta para cada objetivo
- b) Caracterización del medio a recuperar
- c) Identificación de las tecnologías potenciales
- d) Selección entre tecnologías potenciales
- e) Incorporación de las tecnologías a las alternativas

7.2.1. Acciones generales de respuesta

Para cumplir el primer objetivo se propone explorar las siguientes acciones generales de respuesta:

- Tratar el suelo contaminado “in situ”
- Remover y tratar el suelo contaminado (tratar “ex situ”)

En el caso del segundo objetivo:

- Tratar “in situ” el suelo contaminado
- Remover y tratar el suelo contaminado (tratar “ex situ”)

7.2.2. Caracterización del medio a recuperar

En esta etapa es fundamental identificar que el único medio a rehabilitar es el suelo. En los capítulos 5 y 6, se presenta la estratigrafía y las características del medio contaminado, contenido de humedad y las concentraciones de contaminantes, por zonas en el área de estudio.

También, es conveniente cuantificar la extensión del suelo a rehabilitar. Esto se hará por zonas pensando en realizar trabajos de excavación y rehabilitación o contención. Las dimensiones medidas permiten obtener el área del terreno afectado y el volumen de suelo contaminado.

Los datos calculados se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Área y volumen del suelo contaminado, por zonas.

Zona	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Abasto	64 601	323 005
Conocida como laguna de "chapopote"	23 256	116 280
Ejes y ruedas	34 830	174 150
Pintura, báscula y estensilado	48 616	243 080

7.2.3. Identificación de potenciales tecnologías a emplear

De acuerdo a las acciones generales de respuesta y las tecnologías existentes, los tipos de tecnologías potenciales de emplearse, se presentan en la tabla 7.2. y se mencionan los criterios de selección.

Tabla 7.2. Tecnologías de rehabilitación que pudieran emplearse para el suelo contaminado en el sitio de estudio (Talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.)

Acción general de respuesta	Tipos de tecnologías potenciales	Criterios de selección
Tratamientos "in situ"	• Atenuación natural	Para compuestos orgánicos a bajas concentraciones
	• Biorremediación	Para hidrocarburos
	• Desorción térmica	A temperaturas mayores de 400 ó 540°C, punto de ebullición de diesel y aceites pesados
	• Estabilización -Solidificación	Para metales e hidrocarburos
	• Lavado de suelos	Eficiente remoción de hidrocarburos (tensoactivos) y metales (solución ácida)
	• Muros o barreras	Impermeabilizar el suelo superficial con geomembrana o arcilla, para evitar el contacto de los contaminantes por la población
	• Vitrificación	Para metales
Tratamientos "ex situ"	• Biorremediación	Para hidrocarburos
	• Desorción térmica	A temperaturas mayores de 400 ó 540°C, punto de ebullición de diesel y aceites pesados
	• Estabilización -Solidificación	Para metales e hidrocarburos
	• Incineración	Para hidrocarburos
	• Lavado de suelos	Eficiente remoción de hidrocarburos (tensoactivos) y metales (solución ácida)
	• Técnica electrocinética	Para metales

7.2.4. Selección de la tecnología

Para elegir las tecnologías más adecuadas es conveniente considerar varios criterios: (LaGrega, 1996)

- a) Aptitud, capacidad técnica general para hacer frente a la contaminación del sitio
- b) Aplicabilidad, capacidad para ejecutar y poner en funcionamiento la tecnología
- c) Rendimiento,
- d) Intereses sanitarios y ambientales,
- e) Intereses institucionales, permisos
- f) Costos, en términos cualitativos

La evaluación cualitativa de las tecnologías de acuerdo a los criterios antes descritos se realiza en la tabla 7.3, calificando a la tecnología con los símbolos (+) favorable, (0) neutra y (-) desfavorable, y haciendo una serie de observaciones a cerca de los cuidados a tener presentes al emplear tales tecnologías.

Tabla 7.3. Selección de las tecnologías potenciales para rehabilitación en los talleres de FNM en Aguascalientes, Ags.

Tecnología	Aptitud	Aplicabilidad	Rendimiento	Intereses sanitarios y ambientales	Costo	Seleccionado	Observaciones
Atenuación natural	-	+	0	+	+	No	Sólo cuando las concentraciones existentes no son muy altas
Biorremediación	+	+	+	+	+	Sí	Cuando sea fuera del sitio hay un costo adicional por la excavación del suelo
Desorción térmica	+	+	+	+	-	Sí	Se requieren controles de contaminación atmosférica que pueden hacer más costoso el tratamiento
Estabilización - solidificación	+	+	+	+	+	Sí	Cuando sea fuera del sitio hay un costo adicional por la excavación del suelo
Lavado de suelos	+	+	+	+	0	Sí	Se emplean soluciones ácidas para metales, y tensoactivos para hidrocarburos. Se debe cuidar que no se afecte el agua subterránea.
Muros o barreras	+	+	+	+	+	Sí	Puede ser con arcilla o geomembrana
Técnica electrocinética	+	+	0	+	-	No	Solo se aplica a metales y es costoso
Vitrificación	+	+	+	+	-	No	Es importante revisar su resistencia mecánica, y durabilidad de las propiedades confinantes, además de ser costoso
Incineración	+	+	+	+	-	Sí	Se requieren controles de contaminación atmosférica que pueden hacer más costoso el tratamiento, además del costo por la excavación

(+) favorable, (0) neutra, (-) desfavorable

De acuerdo a la evaluación cualitativa realizada en la tabla 7.3, las tecnologías seleccionadas son:

- a) Biorremediación
- b) Desorción térmica
- c) Estabilización-solidificación, e
- d) Lavado de suelos
- e) Muros o barreras
- f) Incineración

En el caso de los residuos dispuestos en la zona de la laguna de "chapopote" y los furgones de combustible las tecnologías posibles son excavación y tratamiento con estabilización solidificación o incineración. La primer tecnología es más económica, pero la segunda permite obtener un menor volumen de residuos a disponer.

7.2.5. Incorporación de las tecnologías a las alternativas

Una alternativa consta de varios componentes. Existen componentes que se requieren en casi todas las tecnologías elegidas en el apartado anterior, estos componentes son: (LaGrega, 1996)

- a) Evitar la migración de soluciones de lavado o agua producto de la degradación biológica hacia el agua subterránea, y
- b) En la desorción térmica, realizar el control y tratamiento de los gases que salgan del proceso

En las tablas 7.4-7.7 se integran las tecnologías a alternativas que contienen otros componentes, necesarios para alcanzar los objetivos de la rehabilitación en las diversas zonas del sitio contaminado en estudio.

Tabla 7.4. Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de abasto

Zona	Contaminantes a remover	Tecnología	Componentes de la alternativa además de la tecnología
Abasto	Arsénico Benzo(a)antraceno Benzo(b)fluoranteno Benzo(a)pireno Criseno Benceno	Biorremediación	Dispositivos para alimentación de nutrientes y población microbiana Control y tratamiento del agua efluente del proceso
		Desorción térmica	Si es fuera del sitio: remover el suelo del lugar y colocación en la instalación donde se aplicará el tratamiento térmico, transporte del suelo ya tratado al sitio o a disposición final Dispositivos para el control y tratamiento de gases efluentes
		Estabilización-solidificación	Excavación y transporte del suelo contaminado Instalaciones para aplicar el material de estabilización solidificación Equipo de mezclado Transporte del suelo estabilizado al sitio o a disposición final
		Lavado de suelo	Dispositivos para la alimentación de la solución de lavado Control de migración y tratamiento de la solución de lavado
		Muros barreras	o Colocación de material impermeable Monitoreo de la migración y de presencia de fallas o grietas en el material impermeabilizante

Tabla 7.5. Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de laguna de chapopote

Zona	Contaminantes a remover	Tecnología	Componentes de la alternativa además de la tecnología
Conocida como laguna de "chapopote"	Diclorometano Benzo(a)antraceno Benzo(k)fluoranteno Benzo(a)pireno Criseno Dibenzo(a,h)antraceno Indeno(1,2,3-cd)pireno	Biorremediación	Dispositivos para alimentación de nutrientes y población microbiana Control y tratamiento del agua efluente del proceso
		Desorción térmica	Remover el suelo del lugar y colocación en la instalación donde se aplicará el tratamiento térmico Dispositivos para el control y tratamiento de gases efluentes Transporte del suelo ya tratado al sitio o a disposición final
		Estabilización-solidificación	Excavación y transporte del suelo contaminado Instalaciones para aplicar el material de estabilización solidificación Equipo de mezclado Transporte del suelo estabilizado al sitio o a disposición final
		Lavado de suelo	Dispositivos para la alimentación de la solución de lavado Control de migración y tratamiento de la solución de lavado
		Muros barreras	Colocación de material impermeable Monitoreo de la migración y de presencia de fallas o grietas en el material impermeabilizante

Tabla 7.6. Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de ejes y ruedas

Zona	Contaminantes a remover	Tecnología	Componentes de la alternativa además de la tecnología
Ejes y ruedas	Arsénico	Estabilización - solidificación	Excavación y transporte del suelo contaminado Instalaciones para aplicar el material de estabilización solidificación Equipo de mezclado Transporte del suelo estabilizado al sitio o a disposición final
		Lavado de suelos	Dispositivos para la alimentación de la solución de lavado Control de migración y tratamiento de la solución de lavado
		Muros barreras	Colocación de material impermeable Monitoreo de la migración y de presencia de fallas o grietas en el material impermeabilizante

Tabla 7.7. Tecnologías seleccionadas y componentes de las alternativas de rehabilitación en la zona de pintura, báscula y estensilado

Zona	Contaminantes a remover	Tecnología	Componentes de la alternativa además de la tecnología
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico	Estabilización-solidificación	Excavación y transporte del suelo contaminado Instalaciones para aplicar el material de estabilización solidificación Equipo de mezclado Transporte del suelo estabilizado al sitio o a disposición final
		Lavado de suelos	Dispositivos para la alimentación de la solución de lavado Control de migración y tratamiento de la solución de lavado
		Muros o barreras	Colocación de material impermeable Monitoreo de la migración y de presencia de fallas o grietas en el material impermeabilizante

Capítulo 8

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza la discusión de los resultados obtenidos en los capítulos seis y siete. En el capítulo seis al realizar la evaluación de riesgo a la salud se obtuvieron: los cocientes de peligrosidad y el valor de riesgo, y se establecieron: los criterios y niveles de limpieza específicos del sitio. En el capítulo siete se desarrollaron las alternativas de rehabilitación que se pueden emplear en los talleres de FNM en Aguascalientes.

8.1. Discusión de resultados acerca de la evaluación de riesgo a la salud y criterios de limpieza

Con los resultados presentados en las tablas 6.14-6.18 se estableció la tabla 8.1 con la finalidad de poder realizar más fácilmente la discusión de resultados en el análisis de riesgo a la salud.

En esta tabla se presenta los contaminantes presentes por zonas, indicando para cuál uso de suelo considerado se sobrepasa el cociente de peligrosidad o riesgo permisible (1 y 10^{-6} , respectivamente) y las concentraciones límite permisibles. Asimismo, se menciona cuál es la exposición por la cual se superan los valores permisibles. Las exposiciones consideradas fueron:

- a) Contacto dérmico e ingestión accidental de suelo
- b) Inhalación de partículas y vapores
- c) Ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviación de contaminantes presentes en el suelo

Tabla 8.1. Resumen de las tablas 6, 14 y 18 para hacer un análisis cualitativo

ZONA	SUSTANCIAS	RESIDENCIAL		COM./INDUSTR.		TRAB. CONST.		VÍA DE EXPOSICIÓN DÓNDE SE SOBREPASA
		IP	RIESGO	IP	RIESGO	IP	RIESGO	
Abasto	Bario, cromo, acetona, acenafteno, antraceno, benzo(k)fluoranteno, fluoranteno, fluoreno, naftaleno, fenantreno, pireno, tolueno, etilbenceno y xileno							Ninguna
	Arsénico, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno y criseno		X					Contacto dérmico e ingestión de suelo
	Benzo(a)pireno		X		X			Contacto dérmico e ingestión de suelo
	Benceno		X					Ingestión de agua subterránea
Laguna de "chapopote"	Bario, acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo(ghi)perileno, fluoranteno, fluoreno, naftaleno, fenantreno, pireno, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno							Ninguna
	Acetona	X						Ingestión de agua subterránea
	Diclorometano y criseno		X		X			Ingestión de agua subterránea
	Benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, indeno(1,2,3-cd)pireno		X		X			Contacto dérmico e ingestión de suelo
	Benzo(k)fluoranteno		X					Contacto dérmico e ingestión de suelo
Ejes y ruedas	Bario y cromo							
	Arsénico		X					Contacto dérmico e ingestión de suelo
Pastería	Bario, cadmio y cromo							Ninguna
Pintura, báscula y estensilado	Bario, cromo y acetona							Ninguna
	Arsénico		X					Contacto dérmico e ingestión de suelo

Se sobrepasa No se sobrepasa

En el capítulo 6 se presentan las concentraciones permisibles con base en riesgo a la salud y el uso de suelo en el sitio. Además de estos criterios, es necesario revisar en la literatura las concentraciones límite, para los contaminantes del sitio, de acuerdo a criterios nacionales y extranjeros (apéndice 3).

Con el plomo es conveniente tomar uno de los criterios encontrados en la revisión bibliográfica como comparación, pues no es posible hacer el análisis de riesgo a la salud debido a que la USEPA considera que no es conveniente dar valores de RfD (reference dose) y SF (slope factor) (dosis de referencia y factor de pendiente de cáncer), para este contaminante.

En la tabla 8.2 se presentan los criterios y niveles de limpieza para aplicarse en el sitio de estudio, indicando una serie de comentarios pertinentes acerca de su origen. Estos niveles se seleccionaron, por ser los más restrictivos, considerando: las vías de exposición (ingestión y contacto dérmico de suelo e ingestión de agua subterránea), y los efectos tóxicos (cancerígeno o no cancerígeno).

Tabla 8.2. Criterios y niveles de limpieza a alcanzar (específicos del sitio de estudio)

Zona	Sustancia	Concentración presente	Concentraciones límite de acuerdo con el uso de suelo (mg/kg)		Comentarios (via/toxicidad)
			Uso Residencial	Uso Comercial	
Abasto	Arsénico	2	0.39	1.57	Suelo/cancerígeno
	Plomo	12	200	1500	PROFEPA, 2000
	Benzo(a) antraceno	1.03	0.53	-	Suelo/cancerígeno
	Benzo(b) Fluoranteno	1.1	0.53	-	Suelo/cancerígeno
	Benzo(a) pireno	0.883	0.053	0.18	Suelo/cancerígeno
	Criseno	1.62	0.34	1.16	Suelo/cancerígeno
	Benceno	0.072	0.029	-	Agua/cancerígeno
Conocida como laguna de "chapopote"	Diclorometano	0.245	0.024	0.07	Agua/cancerígeno
	Benzo(a) antraceno	10.4	0.53	1.82	Suelo/cancerígeno
	Benzo(k) Fluoranteno	8.93	5.31	-	Suelo/cancerígeno
	Benzo(a) pireno	2.1	0.053	0.18	Suelo/cancerígeno
	Criseno	16.8	0.34	1.16	Suelo/cancerígeno
	Dibenzo(a,h) antraceno	1.84	0.053	0.18	Suelo/cancerígeno
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	2.84	0.53	1.82	Suelo/cancerígeno
Ejes y ruedas	Arsénico	2	0.39	1.57	Suelo/cancerígeno
	Plomo	8	200	1500	PROFEPA, 2000
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico	3	0.39	1.57	Suelo/cancerígeno
	Plomo	9	200	1500	PROFEPA, 2000

Al revisar las tablas 8.1 y 8.2 se observa que la vía de exposición de inhalación de vapores y partículas, en ningún caso supera los valores permisibles de riesgo, cociente de peligrosidad o concentración, de los contaminantes analizados. Además, puede apreciarse, como era de esperarse, que el uso de suelo residencial exige concentraciones menores (más restrictivas) que cualquier otro uso de suelo.

A continuación, se hace la discusión de los resultados, por zonas, del análisis de riesgo a la salud humana y los criterios de limpieza por zonas.

8.1.1. Zona de abasto

8.1.1.1. Uso de suelo residencial

El cociente de peligrosidad calculado para uso de suelo residencial y para todas las sustancias analizadas resultó ser aceptable de acuerdo al análisis de riesgo (< 1.0), en todas las vías de exposición.

Respecto a los valores de riesgo de contraer cáncer, obtenido por los modelos aplicados, se observa que para uso de suelo residencial y la vía de contacto con suelo contaminado (contacto dérmico e ingestión) se sobrepasa el nivel aceptable (1×10^{-6}) para las concentraciones presentes de: arsénico, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno y criseno (tabla 8.1).

Cuando se analiza la vía de ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados se aprecia que los valores de riesgo disminuyen considerablemente, ello es debido a que los contaminantes quedan sorbidos en la porción de suelo limpio y alcanzan concentraciones menores al alcanzar el agua subterránea (tabla 6.19). Sin embargo, son mayores a los niveles aceptables para el benceno porque éste es muy soluble y bastante tóxico.

Para uso de suelo residencial, los contaminantes que sobrepasan el nivel de limpieza a alcanzar en esta zona son: arsénico, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno, criseno y benceno.

Las concentraciones elegidas para arsénico, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno y criseno consideran las vías de exposición: contacto dérmico e ingestión de suelo contaminado y el riesgo de contraer cáncer. En el caso del benceno se eligió la concentración permisible debida a la ingestión de agua subterránea y también el riesgo de contraer cáncer.

8.1.1.2. Uso de suelo comercial/industrial

Los resultados obtenidos para uso de suelo comercial/industrial indican que en ninguna de las vías de exposición y ninguna de las sustancias revisadas se sobrepasan el cociente de peligrosidad permisible (1) (tabla 8.1).

Por otra parte, para el benzo(a)pireno se presenta un valor de riesgo de contraer cáncer mayor a 1×10^{-6} , por contacto en ingestión de suelo contaminado (tabla 8.1).

Para todos los casos, los valores de riesgo calculados son menores al nivel aceptable en la exposición a agua subterránea contaminada por lixiviados.

Las concentraciones presentes de los contaminantes cancerígenos: arsénico, benzo(a)pireno, y criseno son mayores a los niveles permisibles por la vía contacto dérmico e ingestión del suelo; sin embargo, es importante señalar que aunque los niveles de arsénico y criseno son rebasados, el valor de riesgo no, debido a que las concentraciones presentes están muy cercanas a las permisibles.

8.1.1.3. Exposición de trabajadores de la construcción

Los cálculos realizados indican que la exposición a la contaminación que pudieran sufrir trabajadores de la construcción, no es peligrosa (valores de cociente de peligrosidad menores a 1).

El riesgo de cáncer debido a los contaminantes presentes en esta zona, para las diferentes vías de exposición de los trabajadores de la construcción, no sobrepasa al admisible, por lo cual no hay peligro (tabla 8.1).

Ninguna concentración límite, con base en riesgo a la salud, es superada.

8.1.2. Zona de laguna de “chapopote”

8.1.2.1. Uso de suelo residencial

La vía de exposición por contacto con suelo en esta zona, considerando uso de suelo residencial, para todas las sustancias químicas revisadas, presentan valores de cocientes aceptables (<1).

Respecto a la vía de ingestión de agua subterránea se sobrepasa el cociente de peligrosidad aceptable para la concentración de acetona.

El riesgo de cáncer por la vía de contacto con el suelo contaminado es inaceptable ($> 1 \times 10^{-6}$) para: benzo(a)antraceno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, e indeno (1,2,3-cd)pireno; por la vía de ingestión de agua subterránea para las concentraciones de los compuestos: diclorometano y criseno también superan el nivel de riesgo permisible (tabla 8.1).

Las concentraciones límite de benzo(a)antraceno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(1,2,3 -cd)pireno se eligieron por la vía de exposición con el suelo contaminado y el riesgo de contraer cáncer. El nivel de limpieza alcanzar de diclorometano se debe a la vía de ingestión de agua subterránea y el riesgo de contraer cáncer.

8.1.2.2. Uso de suelo comercial/industrial

El cociente de peligrosidad determinado en la zona de laguna de "chapopote", para uso de suelo comercial/industrial, es menor a 1 para todos los contaminantes estudiados.

En esta zona, el riesgo de cáncer es inaceptable por la vía de contacto dérmico e ingestión de suelo contaminado por: benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, e indeno(1,2,3-cd)pireno. Respecto a la vía de exposición de ingestión de agua subterránea el riesgo calculado es inaceptable para las concentraciones presentes de diclorometano, y criseno (tabla 8.1).

Las concentraciones establecidas como permisibles se deben, principalmente, al riesgo de contraer cáncer y la vía de exposición al suelo (ingestión y contacto dérmico), excepto en el caso del diclorometano que se debe a la vía de ingestión de agua subterránea.

8.1.2.3. Exposición de trabajadores de la construcción

Los cocientes de peligrosidad determinados para la exposición de trabajadores de la construcción en todas las vías de exposición y para todas las sustancias no superan al valor aceptable.

Ninguno de las sustancias revisadas presentan valores de riesgo inaceptables (tabla 8.1).

Ninguna concentración límite se rebasa.

8.1.3. Zona de ejes y ruedas

En esta zona el contaminante que debe ser removido es el arsénico. Está presente a una concentración de 2 mg/kg. Se debe reducir a valores menores de 0.39 mg/kg si se

quiere dar a esta zona uso de suelo residencial, y se deberá limpiar a 1.57 mg/kg si el uso de suelo será comercial/industrial.

8.1.3.1. Uso de suelo residencial

Las concentraciones presentes de todos los contaminantes en esta zona resultan en cocientes de peligrosidad menores a 1 (tabla 8.1).

El riesgo de contraer cáncer, en el uso de suelo residencial, es superior a 1×10^{-6} para el arsénico; para la vía de exposición con suelo, lo cual no sucede para la vía de ingestión de agua subterránea.

8.1.3.2. Uso de suelo comercial/industrial

Los cocientes de peligrosidad para todas las vías de exposición y para todos los contaminantes revisados no sobrepasan el valor permisible.

Los valores de riesgo de cáncer debidos a los contaminantes presentes en esta zona, no superan el valor permisible de 1×10^{-6} (tabla 8.1).

Al comparar las concentraciones permisibles, se observa que el arsénico supera el valor permisible, pero un valor de riesgo de contraer cáncer de 1×10^{-6} que es aceptable. Lo cual sucede porque la concentración presente (2mg/kg) es muy cercana al nivel límite (mg/kg).

8.1.3.3. Exposición de trabajadores de la construcción

En lo que respecta a la exposición de trabajadores de la construcción, en todos los casos, el cociente de peligrosidad aceptable no es superado.

El riesgo de contraer cáncer por los contaminantes estudiados no supera el valor permisible para todos los casos.

8.1.4. Zona de pailería

Los cocientes de peligrosidad calculados en esta zona para los contaminantes presentes en todos los usos de suelo revisados (residencial, comercial/industrial y construcción) no superan el valor de 1. El valor de riesgo tampoco supera el valor de 1×10^{-6} (tabla 8.1).

8.1.5. Zona de pintura, báscula y estensilado

El único contaminante que debe ser removido es el arsénico, de acuerdo al análisis de riesgo a la salud. Este contaminante presenta una concentración de 3 mg/kg que debe

reducirse a 0.39 mg/kg para uso de suelo residencial y a 1.57 mg/kg para uso de suelo comercial/industrial.

8.1.5.1. Uso de suelo residencial

El valor de riesgo de contraer cáncer, debido al arsénico, resulta mayor al valor permisible en todas las vías de exposición revisadas (tabla 8.1).

8.1.5.2. Uso de suelo comercial/industrial

Ninguna sustancia provoca valores de cociente de peligrosidad mayores al permisible.

El arsénico presenta valores de riesgo inaceptables por contacto con suelo; sin embargo, en contacto con agua subterránea todos los valores de riesgo son aceptables (tabla 8.1).

8.1.5.3. Exposición de trabajadores de la construcción

La exposición de trabajadores de la construcción no les puede significar un peligro pues resultó que los cocientes de peligrosidad son menores a 1 para todos los contaminantes revisados.

El riesgo es aceptable, para esta exposición dadas las concentraciones presentes de todos los contaminantes revisados.

8.2. Discusión de resultados de las alternativas de rehabilitación

En la tabla 8.3 se presenta una revisión de los costos de las diferentes alternativas de tratamiento en cada zona que lo requiere. El volumen y el área de suelo contaminado se determinó considerando el área total y cinco metros de profundidad de afectación. Para determinar cantidades a tratar más adecuadas se requiere hacer un levantamiento de las áreas contaminadas específicas por cada zona.

Desde el punto de vista económico, la mejor alternativa para proteger la salud de la población potencialmente expuesta a los contaminantes es evitar el contacto entre la población y el suelo contaminado. Esto se puede lograr colocando una barrera.

Para asegurar que realmente se cumplan los objetivos de la rehabilitación del lugar, a largo plazo, al emplear una barrera se debe realizar monitoreo y revisar su funcionamiento.

Además de la colocación de barreras (ya sea capa de material impermeable como arcilla o geomembrana) se debe cuidar que la construcción de nuevas instalaciones subterráneas como cimentaciones y tuberías no dañe las barreras. Es conveniente que

en donde se decida colocar la impermeabilización sea una zona de uso recreativo (como un parque o canchas deportivas), que cuente con el drenaje adecuado para evitar la infiltración.

Cabe mencionar que en la zona del valle de Aguascalientes se han presentado asentamientos diferenciales en el suelo dañando las estructuras y la infraestructura hidrosanitaria de la ciudad.

Tabla 8.3. Costo de las alternativas de rehabilitación

Zona	Volumen (m ³)	Tecnología	Costo unitario (\$/m ³)	Costo (pesos)
Abasto	323 005	Biorremediación	654-1046	211 millones-338 millones
		Desorción térmica	1308-19620	422 millones-6337 millones
		Estabilización-solidificación	654-3270	211 millones-1056 millones
		Lavado de suelo	1570-2620	507 millones-846 millones
	64 601 m ²	Muros o barreras	100	6. 4 millones
Chapopote	116 280	Biorremediación	654-1046	76 millones-122 millones
		Desorción térmica	1308-19620	152 millones-2281 millones
		Estabilización-solidificación	654-3270	76 millones-380 millones
		Lavado de suelo	1570-2620	183 millones-305 millones
	23 256 m ²	Muros o barreras	100	2.3 millones
Ejes y ruedas	174 150	Estabilización - solidificación	654-3270	114 millones-569 millones
		Lavado de suelos	1570-2620	273 millones-456 millones
	34 830 m ²	Muros o barreras	100	3.5 millones
Pintura, báscula y estensilado	243 080	Estabilización-solidificación	654-3270	159 millones-795 millones
		Lavado de suelos	1570-2620	382 millones-637 millones
	48 616 m ²	Muros o barreras	100	4.9 millones

*Fuente Madrigal (1998).

En lo que respecta a las tecnologías de rehabilitación más convenientes para aplicarse en el sitio de estudio. Considerando los resultados del capítulo 7, se ha determinado que las más adecuadas son:

- “In situ”: lavado con tensoactivos o con solución ácida, biorrestauración, e impermeabilización o contención
- Fuera del sitio o sobre éste (“ex situ”, “on situ”): lavado de suelo con tensoactivos o solución ácida, biorrestauración, tratamiento térmico y estabilización-solidificación

Para elegir las alternativas más adecuadas es necesario realizar un estudio previo de pruebas en el laboratorio y a nivel piloto, utilizando muestras de suelo. Además, estos estudios serán muy útiles para calcular las eficiencias y para un mejor diseño.

Capítulo 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

9.1.1. Características del medio físico y los contaminantes identificados

El sitio de estudio se ubica, en un suelo areno-limoso y areno-arcilloso con un acuífero libre, cuyo nivel freático se encuentra a más de 100 m de profundidad. Debido al tipo de materiales presentes y por la profundidad del nivel freático la migración de los contaminantes hacia el acuífero se retarda.

El contenido de materia orgánica es bajo, los Talleres se ubican en una región semiárida e inmersa en la zona urbana, por ello no existe una retención importante de contaminantes orgánicos, por esta fracción del suelo; sin embargo, el contenido de arcilla ayuda a retener la migración de los contaminantes.

Los principales contaminantes identificados son hidrocarburos poliaromáticos y metales pesados.

Aunque el sitio ha tenido contaminación por compuestos orgánicos volátiles, la presencia de estos ya no es importante debido a que el lugar tiene varios años sin operar (contaminación “antigua”). Los hidrocarburos poliaromáticos son semivolátiles y aun están en cantidades considerables lo que representa un riesgo a la salud humana, principalmente por ser potencialmente cancerígenos.

Los metales pesados presentes, pueden representar un peligro a la población potencialmente expuesta, principalmente por las vías de inhalación de partículas, ingestión accidental de suelo contaminado y contacto dérmico con el suelo contaminado; en mucho menor medida presenta un riesgo a la salud por su posible lixiviación al agua subterránea.

9.1.2. Fuentes de contaminación en el sitio de estudio

Las principales fuentes de contaminación son el suelo afectado, las escorias y partículas de metales pesados, los tanques que contienen hidrocarburos y la zona donde se han depositado residuos de hidrocarburos, conocida como laguna de “chapopote”. Las tuberías para transporte de combustibles, de acuerdo con información proporcionada por personal de FNM, ya fueron limpiadas. Por lo que se determinó que el lugar puede presentar un riesgo a la salud de la población.

9.1.3. Evaluación de riesgo a la salud

Con la información reunida acerca del marco físico del lugar, las actividades que se realizaron y las fuentes que originaron la contaminación se realizó la evaluación de riesgo a la salud.

- Considerando un uso de suelo residencial los resultados indicaron que las zonas que representan riesgo a la salud son:

Zona	Sustancia
Abasto	Arsénico Benzo(a)antraceno Benzo(b)fluoranteno Benzo(a)pireno Criseno Benceno
La laguna de "chapopote"	Acetona Diclorometano Benzo(a)antraceno Benzo(k)fluoranteno Benzo(a)pireno Criseno Dibenzo(a, h)antraceno Indeno(1,2,3-cd)pireno
Ejes y ruedas	Arsénico
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico

- Para uso de suelo comercial/industrial, la evaluación de riesgo a la salud indicó que las zonas que presentaron riesgo inaceptable son:

Zona	Contaminante
Abasto	Benzo(a)pireno (arsénico y criseno presentaron un valor de riesgo de 1×10^{-6} , que es aceptable)
Laguna de "chapopote"	Diclorometano Benzo(a)antraceno Benzo(a)pireno Criseno Dibenzo(a, h)antraceno Indeno(1,2,3-cd)pireno
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico

- Considerando la exposición de trabajadores de la construcción, en los trabajos de rehabilitación, ninguna zona rebasa el riesgo permisible, por lo cual los trabajadores no correrán riesgos.

9.1.4. Sitios donde se requiere rehabilitación

Con la metodología empleada en el capítulo 6, las concentraciones límite obtenidas con base en riesgo a la salud, indican que para uso de suelo residencial se deben alcanzar los niveles permisibles, reduciendo en:

Zona	Contaminante	Concentración presente (mg/kg)	Concentración permisible con base en riesgo a la salud
Abasto	Arsénico	2	0.39
	Benzo(a)antraceno	1.03	0.53
	Benzo(b)fluoranteno	1.1	0.53
	Benzo(a)pireno	0.883	0.053
	Criseno	1.62	0.034
	Benceno	0.072	0.029
La laguna de "chapopote"	Diclorometano	0.245	0.024
	Benzo(a)antraceno	10.4	0.53
	Benzo(k)fluoranteno	8.93	5.31
	Benzo(a)pireno	2.1	0.053
	Criseno	16.8	0.34
	Dibenzo(a, h)antraceno	1.84	0.053
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	2.84	0.53
Ejes y ruedas	Arsénico	2	0.39
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico	3	0.39

- Para uso de suelo comercial/industrial se deben reducir las concentraciones de los contaminantes como se indica:

Zona	Contaminante	Concentración presente (mg/kg)	Concentración permisible con base en riesgo a la salud (mg/kg)
Abasto	Arsénico	2	1.57
	Benzo(a)pireno	0.883	0.18
	Criseno	1.62	1.16
La laguna de "chapopote":	Diclorometano	0.245	0.064
	Benzo(a)antraceno	10.4	1.82
	Benzo(a)pireno	2.1	0.18
	Criseno	16.8	1.16
	Dibenzo(a,h)antraceno	1.84	0.18
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	2.84	1.82
	Ejes y ruedas	Arsénico	2
Pintura, báscula y estensilado	Arsénico	3	1.57

Con base en la evaluación ambiental del sitio, desde el punto de vista de la evaluación de riesgo a la salud, no hay problemas de contaminación, en las zonas:

Carros y coches
Herrería
Norte
Tapicería
Vías

9.1.5. Acciones de respuesta convenientes y alternativas factibles de reuso del suelo

Respecto al análisis de las tecnologías de rehabilitación más convenientes para el sitio de estudio, de acuerdo con el análisis realizado en los capítulos 7 y 8, se ha determinado que las más adecuadas a emplearse son:

Zona	Tecnologías propuesta
Abasto	Lavado de suelo con tensoactivos Biorrestauración Tratamiento térmico Estabilización-solidificación Barreras (impermeabilización)
La laguna de "chapopote"	Lavado de suelo con tensoactivos Biorrestauración Tratamiento térmico Estabilización-solidificación Barreras (impermeabilización)
Ejes y ruedas	Lavado con solución ácida Estabilización-solidificación Barreras (impermeabilización)
Pintura, báscula y estensilado	Lavado con solución ácida Estabilización-solidificación Barreras (impermeabilización)

Desde el punto de vista costo-beneficio dadas las características físicas del sitio, considerando que el nivel freático es profundo (más de 100 m), y considerando que si no hay exposición, no se presentan riesgos a la salud; el realizar las obras de ingeniería adecuadas con la finalidad de impermeabilizar (uso de arcilla o geomembrana) se cumplen los objetivos de la rehabilitación en los Talleres: impedir que haya exposición de las poblaciones potencialmente afectadas y, también, la migración de contaminantes hacia el agua subterránea. Independientemente del uso de suelo al que se destine el sitio, con estas medida se asegura que no se correrán riesgos inaceptables. A su vez se llevará a cabo un monitoreo, para confirmar que las barreras estén funcionando adecuadamente.

Finalmente, con la evaluación ambiental efectuada en los Talleres de Ferrocarriles Nacionales de México es factible reutilizar sus instalaciones, tanto para uso residencial como comercial/industrial y recreativo, siempre y cuando se reduzcan las concentraciones de los contaminantes y/o se realicen las obras de ingeniería antes mencionadas para minimizar los riesgos a la población y aprovechar un sitio abandonado cercano al centro de la ciudad de Aguascalientes.

9.2. Recomendaciones

Desde el punto de vista de la economía es muy conveniente aprovechar las edificaciones existentes, para ello se deberán remover los techos de asbesto y colocar otro material que no sea tóxico y realizar remodelaciones.

Por otro lado, para establecer conclusiones respecto de la zona de fundición se deberá realizar nuevos muestreos de metales presentes. Lo mismo es conveniente llevar a cabo en la zona de pailería, en las porciones donde se dispuso el suelo removido de la zona de abasto.

Los residuos presentes en el lugar deben ser removidos y dispuestos adecuadamente:

- a) La chatarra, puede ser vendida a empresas para su reciclaje
- b) Los residuos de hidrocarburos, denominados como "chapopote", que están en dos furgones y en la zona de la laguna de "chapopote", deben ser removidos y darles tratamiento.

El tratamiento a aplicar a los residuos de hidrocarburos conocidos como "chapopote" podría consistir en su mezcla con polímeros o tensoactivos para formar emulsión asfáltica; sin embargo, para ello es necesario realizar una serie de análisis para revisar la factibilidad de su reciclaje para pavimentos, revisando su calidad mecánica y, principalmente, su capacidad para evitar la liberación de las sustancias tóxicas al ambiente. Otra alternativa es el tratamiento térmico controlado y/o disposición final, además de ser conveniente conocer sus características corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso, realizando la prueba CRETIB.

En la actualidad se tiene muchos sitios potencialmente contaminados con sustancias peligrosas, además de que muchas fabricas que ya cumplieron con su vida útil y están desmantelándose. Todos estos lugares pueden llegar a reusarse; sin embargo, para ello, se debe asegurar que la población que esté en el lugar, ahora o en el futuro, no corra riesgo de daños a su salud. La metodología presentada en esta investigación es una herramienta para evaluar tales aspectos.

Se necesita más investigación para mejorar la evaluación de riesgo a la salud humana (por ejemplo: factores de exposición para países como México y datos que evalúen la toxicidad de los contaminantes).

Para realizar evaluaciones de riesgo ecológico, la metodología puede ser semejante, pero hace falta mucho más investigación con respecto a las determinaciones de las dosis de exposición de los animales y las plantas así como datos de toxicidad para la salud de estos seres vivos.

También, falta encontrar tecnologías a costos más accesibles.

En muchos ámbitos del conocimiento hay bastante por hacer para enfrentar de mejor manera el problema de contaminación del suelo.

REFERENCIAS

1. Alloway, B.J. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic & Professional, 1995
2. ASTM, American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Risk-Based corrective Action Applied at Petroleum Release. ASTM Designation: E 1739-95, 1995.
3. Blyth, F.G.H. Geología para Ingenieros. D.F., México, 1989
4. Brusseau, M. Chemical Processes Affecting Contaminant Fate and Transport in Soil and Water. En Pollution Science. Academic Press. 1996
5. Buonicore, A. Cleanup Criteria for Contaminated Soil and Groundwater. ASTM DS 64, 1996
6. Byrnes, M. E. Field Sampling Methods for Remedial Investigations. Lewis Publishers, 1994
7. Domenico, P. A. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Nueva York, 1990
8. FNM Ferrocarriles Nacionales de México. Auditoria Ambiental a: Taller de Aguascalientes, Aguascalientes. 1994
9. FNM, Ferrocarriles Nacionales de México. Estudio para la Caracterización de la Contaminación en las Áreas del Taller de FNM Aguascalientes, Ags. 1995
10. Freeze, R. A y Cherry, J. A. Groundwater. Nueva Jersey, 1979
11. Gerba, C. P. Principles of Toxicology. En Pollution Science. Academic Press. 1996
12. GSI Groundwater Services, Inc. RBCA TOOL KIT for Chemical Releases. Software de GSI, 1999
13. GSI, Groundwater Services Inc. Guidance Manual for RBCA TOOL KIT for Chemical Releases, 1998
14. Hess, Kathleen, MS, CIH. Environmental Site Assessment Phase I: a Basic Guide. Lewis Publishers, 1993

15. Hobson, D. M. Rational site investigations. En Contaminated Land Problems and Solutions. N. W., 1993
16. INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Cuaderno Estadístico Municipal. Aguascalientes, Ags. 1996
17. IRIS. Integrated Risk Information System. En Internet <http://www.epa.gov/iris>, 1999
18. ISSMFE International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical Committee TC5 "Environmental Geotechnics". Contaminat Transport Modeling. H. L. Jessberger & O. Syllwasschy, 1997
19. Iturbe, R. Apuntes de la Cátedra: Control de la Contaminación del Agua Subterránea. DEPFI UNAM
20. Iturbe, R; Castro, A. Técnicas de Rehabilitación de Suelos y Acuíferos. II UNAM, 1998
21. Izcapa, C. Lineamientos Generales para la Evaluación de Sitios Contaminados y Propuestas de Acciones Para su Restauración. Tesis de Maestría, DEPFI UNAM, 1998
22. Izcapa C., Fernández, G. y González, T. Evaluación de la contaminación del suelo en sitios abandonados y propuestas de solución para la mitigación de impactos al ambiente y a la población. Informe Primera Etapa. CENAPRED. México, 1998.
23. Juárez, E. B. Mecánica de Suelos. Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos. Ed. Limusa. D. F., México, 1992
24. LaGrega, M. D.; Buckingham, P. L.; Evans, J. C. Gestión de Residuos Tóxicos (traducido de Hazardous Waste Management). Mc Graw Hill, 1994, V. I y V.II
25. Madrigal, Ismael. Alternativas de Tratamiento para la Rehabilitación de Sitios Contaminados con Hidrocarburos en México. Tesis de Maestría DEPFI UNAM, 1998
26. Malone, George A.; Lundquist, Dennis E. A Survey of Technical Aspects of Site Remediation: Stabilization and Solidification. Waste Management, Vol. 14 No. 1, 1994

27. Michelsen, Teresa C; Petito, C. Cleanup Standards for Petroleum Hydrocarbons. Part 1. Review of Methods and Recent Developments. Journal of Soil Contamination, 1993
28. Monroy, Vocal Ejecutivo del Comité de Protección Ambiental de FNM. Comunicación Verbal. Ferrocarriles Nacionales de México, 1999
29. Montgomery, John H.; Welkom, L. Groundwater Chemicals Desk Reference. Lewis Publishers, 1990
30. Palmer, Christopher M. Principles of Contaminant Hydrogeology. Lewis Publishers, 1996
31. Pepper, Ian L.; Gerba, Charles P.; Brusseau, Mark L. Pollution Science. Academic Press, 1996
32. PROFEPA. Procuraduría Federal de Protección Ambiental. Criterios Interinos de Restauración de Suelos Contaminados con Hidrocarburos. 1999
33. PROFEPA. Procuraduría Federal de Protección Ambiental. Criterios Interinos de Restauración de Suelos Contaminados con Inorgánicos Tóxicos (Metales Pesados) y Otros. 2000
34. Rail, Chester D. Groundwater Contamination. Technomic Publishing Co. INC, 1989
35. Sandoval, Ismael. La Contaminación del Subsuelo y Aguas Subterráneas por Hidrocarburos y una Evaluación de Sitios Contaminados en el Centro - Este de México. Tesis de Maestría ESIA IPN, 1998
36. SARH Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Aguascalientes, 1987
37. SMN. Servicio Meteorológico Nacional. Datos de 1981 - 1993 de velocidad del viento dominante en la estación meteorológica de Aguascalientes, Aguascalientes. México, 1999.
38. SSA. Secretaria de Salubridad y Asistencia. Manual de Toxicología. 1993
39. Tschebotarioff, G. P. Mecánica del suelo Cimientos y estructuras de tierra. Madrid, 1972.

40. UAA. Universidad Autónoma de Aguascalientes. **Los Ferrocarriles en Aguascalientes**. Departamento de Videoproducción Docente. 1996
41. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **A Citizen's Guide to Soil Washing**. EPA 542-F-96-002. En Internet <http://clu-in.com/citguide/soilwash.htm>, 1996 a.
42. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: Atenuación natural**. EPA 542-F-96-026. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spannatt.htm>, 1996 b.
43. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: El enjuague del suelo in situ**. EPA 542-F-96-022. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spanflus.htm>, 1996 c.
44. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: La extracción con solventes**. EPA 542-F-96-019. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spansolv.htm>, 1996 d.
45. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: La deshalogenación química**. EPA 542-F-96-020. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spanchde.htm>, 1996 e.
46. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: La desorción térmica**. EPA 542-F-96-021. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spanthde.htm>, 1996 f.
47. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: La extracción de vapores del suelo**. EPA 542-F-96-024. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spansve.htm>, 1996 g.
48. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Guía del ciudadano: Medidas biocorrectivas**. EPA 542-F-96-023. En Internet <http://clu-in.com/citguide/spanbio.htm>, 1996 h.
49. USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Risk Assessment Guide for Super fund, Vol. 1, Human Health Evaluation Manual, Part B**, EPA/540/1-89/002, Washington, DC, 1989. En Internet <http://www.epa.gov/superfund/programs/ragsb/capt3.pdf>

50. USEPA. U. S. Environmental Protection Agency. Office of Compliance Sector Notebook Project. **Profile of the Ground Transportation Industry**. EPA/310-R-97-002, 1998 a. En Internet <http://www.epa.gov/oeca/sectornote/pdf/grdtrnsdn.pdf>
51. USEPA. U. S. Environmental Protection Agency. Office of Compliance Sector Notebook Project. **Profile of the Metal Casting Industry**. EPA/310-R-97-004, 1998 b. En Internet <http://www.epa.gov/oeca/sectornote/pdf/metcstsng.pdf>
52. Wilson, David J.; Clarke A. **Hazardous Waste Site Soil Remediation Theory and Application of Innovative Technologies**. Marcel Dekker, 1994

Apéndice 1

CONSIDERACIONES PARA LOS FACTORES DE: VOLATILIZACIÓN, EMISIÓN DE PARTICULAS Y LIXIVIACIÓN

En este apéndice se trata más a detalle los fundamentos en que se basan los modelos para determinar los factores de transferencia entre los diversos medios y que fueron empleados en la evaluación de riesgo a la salud.

En la evaluación de riesgo a la salud aplicada a un suelo contaminado es importante considerar el transporte de contaminantes de este medio contaminado a otros, es decir la migración de suelo a aire y agua.

Además, cuando el receptor potencial se encuentra fuera del sitio se debe determinar la migración horizontal en el mismo medio.

Para el caso de estudio que nos ocupa, debido a que el receptor potencial se encontrará en el mismo sitio de la contaminación, no fue necesario realizar una estimación del transporte de contaminantes hacia fuera del sitio, únicamente se modeló la migración vertical de los contaminantes.

Considerando sólo la migración vertical, en el capítulo 4 se presentaron las expresiones útiles para determinar las dosis de exposición de las poblaciones receptoras potenciales de contaminantes y para calcular las concentraciones permisibles de contaminantes con base en riesgo a la salud. Estos dos tipos de fórmulas emplean factores para hacer una extrapolación del transporte de contaminantes entre los diversos medios: factor de volatilización, factor de emisión de partículas y factor de lixiviación.

El factor de volatilización (FV) se emplea para determinar la migración de un contaminante volátil desde el suelo hacia el aire. El factor de emisión de partículas (FEP) representa el transporte de contaminantes adsorbidos al suelo como partículas en el aire. El factor de lixiviación (FL) permite estimar la cantidad de sustancia química presente en el suelo que migra hacia el agua subterránea debajo de él.

Estos factores (FV, FEP y FL) dependen de las características del medio contaminado y de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias involucradas.

En las secciones siguientes se mencionan los fundamentos en que se basan las expresiones para calcular los factores mencionados. En la tabla A1.1 se presenta la descripción de las variables empleadas.

A1.1. Factor de volatilización

El factor de volatilización representa la relación de la concentración, predicha, de un compuesto orgánico en el aire entre la concentración fuente en el suelo. Se puede calcular mediante la expresión A1.1: (ASTM, 1998)

$$FV = \frac{2 \times a \times \rho_s}{V_{\text{viento}} \times h \times \tau} \times \sqrt{\frac{D_{ei} \times H}{\pi(\theta_w + Koc \times foc \times \rho_s + H \times \theta_a)}} \times 10^{-2} \quad A1.1$$

El factor de volatilización incorpora dos elementos de transferencia entre medios:

- Flujo de vapor orgánico de la masa de suelo a la superficie del terreno
- Mezcla de vapores en el aire directamente arriba del suelo afectado

La ecuación A1.1 se emplea comúnmente para compuestos de baja volatilidad, considerando que existe una fuente contaminante infinita. Usa una tasa de volatilización basada en las propiedades de la sustancia química. La expresión toma en cuenta la dilución de los compuestos químicos en el aire por el movimiento del aire.

A1.2. Factor de emisión de partículas

El factor de emisión de partículas (FEP) representa la proporción, en estado estacionario, de la concentración predicha de compuestos químicos en partículas en el aire a la concentración fuente del contaminante en el suelo: (ASTM, 1998)

$$FEP = \frac{T_{ep} \times a}{V_{\text{viento}} \times h} \quad A1.2$$

El factor incorpora dos elementos de transferencia entre los medios:

- La tasa de liberación de las partículas de suelo (polvo) hacia la superficie del terreno
- Mezcla de estas partículas en el aire directamente arriba del suelo afectado

Considera que las partículas se diluyen por el flujo lateral de aire directamente sobre la zona fuente, y que la longitud del área de suelo afectado paralela a la dirección del viento.

A1.3. Factor de lixiviación

Este factor incorpora tres componentes: coeficiente de distribución lixiviado-suelo, atenuación del suelo y dilución lixiviado-agua subterránea. Por lo cual integra las consideraciones hechas para obtener estos tres componentes, la representación matemática de este factor es: (ASTM, 1998)

$$FL = \frac{\rho_s \times L_1}{(\theta_w + Kd \times \rho_s + H\theta_a) \times L_2} \quad A1.3$$

A continuación se explican las consideraciones de las tres componentes que forman el factor de lixiviación.

A1.3.1. Coeficiente de distribución lixiviado-suelo

El coeficiente de distribución lixiviado-suelo es la proporción, en estado estacionario, entre la concentración (de un constituyente orgánico) en el agua de los poros de suelo y la concentración fuente sobre la masa de suelo afectado. Este factor es usado para representar la liberación de constituyentes de suelo a lixiviados percolando a través de la zona de suelo afectada.

Consideraciones importantes:

- Equilibrio entre las concentraciones de los lixiviados y el suelo fuente afectado
- No hay biodegradación u otros mecanismos de degradación en suelo o lixiviado
- La masa del compuesto químico es constante en el tiempo

A1.3.2. Modelo de atenuación del suelo

El "Modelo de Atenuación del Suelo" (ASTM, 1998) puede aplicarse para tomar en cuenta la sorción de constituyentes, en los lixiviados, por suelo limpio que este bajo la zona de suelo afectado. El suelo limpio reduce las concentraciones que llegan al agua subterránea.

En sistemas donde el nivel freático es profundo, existe un espesor importante de suelo limpio bajo la zona de suelo afectado, por ello no se debe omitir la capacidad de sorción de estos suelos limpios porque se sobre estimaría la concentración que llega hacia el agua subterránea. Este factor se refiere al movimiento de constituyentes disueltos a través del medio poroso y no se aplica a casos que involucran la migración de materiales no acuosos en fase líquida.

Consideraciones (ASTM, 1998):

- No hay biodegradación u otros mecanismos de degradación en el suelo o lixiviados
- La masa del contaminante es constante en el tiempo

A1.3.3. Dilución lixiviado-agua subterránea

El factor de dilución lixiviado-agua subterránea toma en cuenta la dilución de los constituyentes químicos como lixiviado con agua subterránea.

Consideraciones:

- La infiltración de lluvia-percolación es profunda a través del suelo afectado, alcanza el nivel freático, sin importar su profundidad o la conductividad hidráulica vertical
- No hay biodegradación u otras formas de degradación por otros mecanismos, en la zona del agua subterránea

Tabla A1.1. Descripción de las variables para el calculo de FV, FEP y FL

a = ancho del área contaminada paralelo a la dirección del viento, m;
D_{agua} = coeficiente de difusión en agua, cm^2/s ;
D_{aire} = coeficiente de difusión en aire, cm^2/s ;
D_{ei} = difusividad efectiva, cm^2/s ;
$D_{\text{ei}} = D_{\text{aire}} \times \frac{\theta_a^{3.33}}{n^2} + D_{\text{agua}} \times \frac{\theta_w^{3.33}}{Hn^2}$
FEP = factor de emisión de partículas, kg/m^3 ;
FL = factor de lixiviación, $(\text{mg}/\text{l})/(\text{mg}/\text{kg})$;
foc = contenido de carbono orgánico en el suelo, fracción;
FV = factor de volatilización, kg/m^3 ;
h = altura de difusión, m;
H = constante de la ley de Henry, $(\text{cm}^3\text{-agua})/(\text{cm}^3\text{-aire})$;
Kd = Koc x foc, para compuestos orgánicos;
Koc = coeficiente de distribución carbono orgánico, cm^3/g ;
L_1 = espesor del suelo contaminado, m;
L_2 = distancia de la superficie superior del suelo afectado al nivel freático, m
n = porosidad del suelo, m^3/m^3 ;
T_{ep} = tasa de emisión de partículas, $\text{g}/\text{cm}^2\text{-s}$;
V_{viento} = velocidad del viento en la zona de mezclado, m/s;
π = constante = 3.1416
θ_a = contenido volumétrico de aire, m^3/m^3 ;
θ_w = contenido volumétrico de agua, m^3/m^3 ;
ps = peso volumétrico del suelo, kg/m^3 ;
τ = tiempo promedio de flujo de vapor, s;

Apéndice 2

MEMORIA DE CÁLCULO DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD

En este apéndice se presenta los cálculos realizados en la evaluación de riesgo a la salud cuyos resultados se muestran en las tablas 6.8 a 6.23 del capítulo 6, emplean las fórmulas mencionadas en el capítulo 4 (4.1-4.22) y toman en cuenta las consideraciones detalladas en el apéndice 1.

En la tabla A2.1 se presentan los valores de los parámetros que se emplean en los cálculos de la evaluación de riesgo a la salud, además se indican las fuentes de las cuáles se obtuvieron.

Tabla A2.1. Valores de los parámetros empleados en las fórmulas para la evaluación de riesgo a la salud

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
a	Ancho del área contaminada paralelo a la dirección del viento, en m	Por zona	Del plano del sitio
C	Concentración en el punto de exposición, mg/kg	Por zona y sustancia	De los datos analíticos del muestreo (FNM, 1995)
CP_{ac}	Cociente de peligrosidad aceptable, adimensional	1	USEPA, 1989
D_{agua}	Coefficiente de difusión en agua, cm ² /s	Específico de la sustancia	Montgomery, 1990 LaGrega, 1996 GSI, 1999
D_{aire}	Coefficiente de difusión en aire, cm ² /s	Específico de la sustancia	Montgomery, 1990 LaGrega, 1996 GSI, 1999
foc	Fracción orgánica del suelo, adimensional	0.001	Consideración tomando el valor de GSI, 1999
h	Altura de difusión, m	1.7	Considerando la altura promedio de un hombre adulto
H	Constante de la ley de Henry, (cm ³ -agua)/(cm ³ -aire)	Específico de la sustancia	Montgomery, 1990 LaGrega, 1996 GSI, 1999
K_d	Coefficiente de partición agua - suelo	Específico de la sustancia	Montgomery, 1990 LaGrega, 1996 GSI, 1999
K_{oc}	Coefficiente de partición agua - carbono orgánico	Específico de la sustancia	Montgomery, 1990 LaGrega, 1996 GSI, 1999
L₁	Espesor de suelo contaminado, m	5	Consideración
L₂	Profundidad del nivel freático, m	100	SARH, 1986

Tabla A2.1.(Continuación)

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
n	Porosidad total del suelo, adimensional	0.4	Consideración tomando el valor de GSI (1999) para un suelo areno - arcilloso,
R_{ac}	Valor de riesgo aceptable, adimensional	1×10^{-6}	USEPA, 1989
T_{ep}	Tasa de emisión de partículas, $g/cm^2 \cdot s$	6.9×10^{-14}	GSI, 1999
V_{viento}	Velocidad del viento en la zona de mezclado, m/s	2.5	SMN, 1999
θ_a	Contenido volumétrico de aire, adimensional	0.226	$n - \theta_w$ (FNM, 1995)
θ_w	Contenido volumétrico de agua, adimensional	0.174	FNM, 1995
ρ_s	Peso volumétrico del suelo, kg/m^3	1.74	FNM, 1995
τ	Tiempo promedio de flujo de vapor, s	9.46×10^8 residencial 7.88×10^8 comercial	GSI, 1998

LOS PARÁMETROS EMPLEADOS EN LA SIGUIENTES TABLAS SE DESCRIBEN EN LOS CAPÍTULOS 4 Y 6.

A2.1. Cálculos de factor de volatilización (FV), factor de emisión de partículas (FEP) y factor de lixiviación(FL).

En las expresiones 4.3, 4.6, 4.10, 4.12, 4.15-4.22 se emplean los factores de volatilización, de emisión de partículas y de lixiviación (FV, FEP y FL, respectivamente). En la siguiente página se presentan los datos empleados y los cálculos de los factores, por zonas, por compuesto y por uso de suelo.

DATOS Y CÁLCULOS PARA FACTOR DE VOLATILIZACIÓN, FACTOR DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS Y FACTOR DE LIXIVIACIÓN

$$FV = \frac{2 \times a \times \rho_s}{V_{viento} \times h \times r} \times \sqrt{\frac{D_a \times H}{\pi(\theta_w + koc \times foc \times \rho_s + H \times \theta_s)} \times 10^3}$$

$$FEP = \frac{T_p \times a}{V_{viento} \times h}$$

$$FL = (\theta_w + kd \times \rho_s + H \theta_s) \times L_2$$

foc	0.01	L1	5
ps	1.74	L2	100
θa	0.226	n	0.4
θw	0.174		

Tep	6.90E-14	a	
Vviento	2.5	ejes y rueda	pintura
h	2	abasto	chapotote
τ	9.46E+08	res	com
	7.88E+08	FEP	
		3.9E-12	5.09E-12
		5.13E-12	3.52E-12
		3.042E-12	

Compuesto	Diaire cm2/s	Diagna cm2/s	Dei cm2/s	H m-m3/mo	H dimensional	log Koc	Koc	Koc cm3/g	ejes y ruedas		pintura		abasto		chapotote		galeria		FL mg/kg	
									FV res kg/m3	FV com kg/m3	FV res kg/m3	FV com kg/m3	FV res kg/m3	FV com kg/m3	FV res kg/m3	FV com kg/m3				
METALES																				
Arsénico	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.87E+03												1.74E-05
Bario	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.07E+03												1.23E-05
Cadmio	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.49E+03												6.68E-06
Cromo	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.92E+03												2.61E-05
Plomo	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00													
VOLÁTILES																				
Acetona	1.24E-01	1.14E-05	5.61E-03	3.97E-05	1.61E-03	-2.40E-01	5.75E-01	2.20E+00	2.53E-07	2.77E-07	3.30E-07	3.61E-07	3.32E-07	3.64E-07	2.28E-07	2.50E-07	1.97E-07	2.16E-07	4.09E-01	
Diclorometano(metil cloruro)			0.00E+00	2.44E-03	9.90E-02	9.40E-01	8.71E+00	8.80E+00											2.49E-01	
SEMIVOLÁTILES E HPA																				
Acenafeno	4.21E-02	7.69E-06	1.87E-03	2.28E-04	9.27E-03	2.55E+00	3.55E+02	4.50E+03	5.97E-08	6.54E-08	7.79E-08	8.53E-08	7.85E-08	8.60E-08	5.39E-08	5.90E-08	4.66E-08	5.10E-08	1.11E-03	
Acenafileno	4.39E-02	7.53E-06	1.96E-03	1.90E-04	7.73E-03	3.68E+00	4.79E+03	2.50E+03	1.53E-08	1.68E-08	2.00E-08	2.20E-08	2.02E-08	2.21E-08	1.39E-08	1.52E-08	1.20E-08	1.31E-08	1.99E-03	
Antraceno	4.21E-02	7.74E-06	1.86E-03	1.65E-03	6.71E-02	4.15E+00	1.41E+04	1.40E+04	2.57E-08	2.82E-08	3.35E-08	3.68E-08	3.38E-08	3.70E-08	2.32E-08	2.54E-08	2.01E-08	2.20E-08	3.57E-04	
Benzo(a)antraceno	5.10E-02	9.00E-06	2.76E-03	8.00E-06	3.25E-04	6.14E+00	1.38E+06	1.38E+06	2.21E-10	2.42E-10	2.88E-10	3.16E-10	2.90E-10	3.18E-10	1.99E-10	2.18E-10	1.72E-10	1.89E-10	3.62E-06	
Benzo(b)fluoranteno	2.26E-02	5.56E-06	1.21E-03	1.20E-05	4.88E-04	5.74E+00	5.50E+05	5.50E+05	2.83E-10	3.10E-10	3.70E-10	4.05E-10	3.73E-10	4.08E-10	2.56E-10	2.80E-10	2.21E-10	2.42E-10	9.09E-06	
Benzo(k)fluoranteno	2.26E-02	5.56E-06	1.00E-03	1.04E-03	4.23E-02	5.74E+00	5.50E+05	5.50E+05	2.40E-09	2.63E-09	3.13E-09	3.43E-09	3.16E-09	3.46E-09	2.17E-09	2.37E-09	1.87E-09	2.05E-09	9.09E-06	
Benzo(ghi)perileno	4.90E-02	5.65E-05	1.86E-01	1.40E-07	5.69E-06	6.20E+00	1.58E+06	1.60E+06	2.23E-10	2.45E-10	2.91E-10	3.19E-10	2.94E-10	3.22E-10	2.02E-10	2.21E-10	1.74E-10	1.91E-10	3.12E-06	
Benzo(a)pireno	4.30E-02	9.00E-06	5.52E-03	1.13E-06	4.60E-05	6.01E+00	1.02E+06	5.50E+06	1.36E-10	1.49E-10	1.78E-10	1.95E-10	1.79E-10	1.96E-10	1.23E-10	1.35E-10	1.06E-10	1.16E-10	9.09E-07	
Bis(2-clorotoxi)metano			0.00E+00	3.78E-07	1.54E-05	2.06E+00	1.15E+02												5.00E-01	
Cruseno (benzo(a)fenantreno)	2.48E-02	6.21E-06	3.89E+10	7.26E-20	2.95E-18	5.30E+00	2.00E+05	2.00E+05	2.07E-10	2.27E-10	2.71E-10	2.97E-10	2.73E-10	2.99E-10	1.87E-10	2.05E-10	1.62E-10	1.77E-10	2.50E-05	
Dibenzo(a,h)antraceno	2.00E-02	5.24E-06	3.26E-01	7.33E-09	2.98E-07	6.22E+00	1.66E+06	3.30E+06	6.61E-11	7.25E-11	8.63E-11	9.46E-11	8.70E-11	9.53E-11	5.97E-11	6.54E-11	5.16E-11	5.65E-11	1.52E-06	
Fluoranteno	3.02E-02	6.35E-06	1.33E-03	1.69E-02	6.87E-01	4.58E+00	3.80E+04	3.80E+04	4.24E-08	4.65E-08	5.54E-08	6.07E-08	5.58E-08	6.12E-08	3.83E-08	4.20E-08	3.31E-08	3.63E-08	1.32E-04	
Fluoreno	3.63E-02	7.88E-06	1.62E-03	2.10E-04	8.54E-03	3.86E+00	7.24E+03	7.30E+03	1.19E-08	1.31E-08	1.56E-08	1.71E-08	1.57E-08	1.72E-08	1.08E-08	1.18E-08	9.32E-09	1.02E-08	6.84E-04	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2.33E-02	4.41E-06	6.77E+10	2.96E-20	1.20E-18	7.49E+00	3.09E+07	1.60E+06	1.40E-11	1.54E-11	1.83E-11	2.01E-11	1.85E-11	2.02E-11	1.27E-11	1.39E-11	1.10E-11	1.20E-11	3.12E-06	
Naftaleno	5.90E-02	7.50E-06	2.61E-03	4.63E-04	1.88E-02	3.30E+00	2.00E+03	2.00E+03	4.28E-08	4.69E-08	5.59E-08	6.12E-08	5.63E-08	6.17E-08	3.87E-08	4.24E-08	3.34E-08	3.66E-08	2.49E-03	
Fenantreno	3.30E-02	7.47E-06	1.48E-03	1.48E-04	6.02E-03	4.15E+00	1.41E+04	1.40E+04	6.86E-09	7.52E-09	8.96E-09	9.82E-09	9.03E-09	9.89E-09	6.20E-09	6.79E-09	5.36E-09	5.87E-09	3.57E-04	
Pireno	2.72E-02	7.24E-06	1.42E-03	1.48E-05	6.02E-04	4.58E+00	3.80E+04	3.80E+04	1.30E-09	1.42E-09	1.69E-09	1.86E-09	1.71E-09	1.87E-09	1.17E-09	1.28E-09	1.01E-09	1.11E-09	1.32E-04	
BTEX																				
Benceno	8.80E-02	9.80E-06	3.89E-03	5.49E-03	2.23E-01	1.89E+00	7.76E+01	8.30E+01	8.46E-07	9.27E-07	1.11E-06	1.21E-06	1.11E-06	1.22E-06	7.64E-07	8.37E-07	6.61E-07	7.24E-07	5.21E-02	
Tolueno	8.50E-02	9.40E-06	3.75E-03	6.66E-03	2.71E-01	2.13E+00	1.35E+02	3.00E+02	7.16E-07	7.84E-07	9.34E-07	1.02E-06	9.42E-07	1.03E-06	6.46E-07	7.08E-07	5.58E-07	6.12E-07	1.59E-02	
Etilbenceno	7.50E-02	7.80E-06	3.31E-03	8.73E-03	3.55E-01	2.56E+00	3.63E+02	1.10E+03	4.82E-07	5.29E-07	6.30E-07	6.90E-07	6.35E-07	6.95E-07	4.36E-07	4.77E-07	3.76E-07	4.12E-07	4.49E-03	
Xileno	7.20E-02	8.50E-06	3.18E-03	6.27E-03	2.55E-01	2.38E+00	2.40E+02	2.40E+02	4.89E-07	5.36E-07	6.39E-07	7.00E-07	6.44E-07	7.05E-07	4.42E-07	4.84E-07	3.82E-07	4.18E-07	1.97E-02	

MEMORIA DE CÁLCULO DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD

A2.2. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de abasto

En la página A9 se presentan los datos empleados para la evaluación de riesgo en la zona de abasto y en las páginas A10 – A21 los cálculos de dosis de exposición en esta zona para diferentes usos de suelo (residencial, comercial/industrial y trabajadores de la construcción) y diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de partículas y vapores, contacto dérmico e ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados provenientes del suelo afectado).

En las páginas A22 y A23, se muestran los cálculos de riesgo y cocientes de peligrosidad para los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición.

ZONA DE ABASTO

$$Faj = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}}$$

Parámetros de exposición

SUELO		INHALACIÓN		DÉRMICO		AGUA		
NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	
2.00E-04	1.00E-04	2.00E+01	2.00E+01	1.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	2.00E+00	TC
6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	DE
1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	PC
1.23E-04		1.66E+01		8.29E-01		1.66E+00		Faj

FE1	3.50E+02	TMcancerigenos	2.56E+04	TCsuelo	1.00E-04
FE2	2.50E+02	TMnocancerigenos	1.10E+04	TCaire	2.00E+01
FE3	1.80E+02	TMnocancerigenosCO	3.65E+02	TCagua	2.00E+00

DE in	3.00E+01	PC	7.00E+01	A	3.16E+03
DE tc	1.00E+00			AD	5.00E-01
				ABP	1.00E-03
				MS	1.00E+00

Parámetros fisicoquímicos de los contaminantes

Sustancia	Clase	Concentración	FV res	FV com	FEP	ABP	FL
Arsénico	A	2.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	1.00E-03	1.74E-05
Bario	D	1.33E+02	0.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	1.00E-03	1.23E-05
Cromo	A	9.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	1.00E-03	2.61E-05
Plomo	B2	1.20E+01	0.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	1.00E-03	
Acetona	D	1.74E-01	3.32E-07	3.64E-07	5.13E-12	5.00E-01	4.09E-01
Acenafteno	D	1.84E+00	7.85E-08	8.60E-08	5.13E-12	5.00E-02	1.11E-03
Antraceno	D	6.70E-01	3.38E-08	3.70E-08	5.13E-12	5.00E-02	3.57E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	2.90E-10	3.18E-10	5.13E-12	5.00E-02	3.62E-06
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.73E-10	4.08E-10	5.13E-12	5.00E-02	9.09E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.16E-09	3.46E-09	5.13E-12	5.00E-02	9.09E-06
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	1.79E-10	1.96E-10	5.13E-12	5.00E-02	9.09E-07
Criseno	B2	1.62E+00	2.73E-10	2.99E-10	5.13E-12	5.00E-02	2.50E-05
Fluoranteno	D	2.29E+00	5.58E-08	6.12E-08	5.13E-12	5.00E-02	1.32E-04
Fluoreno	D	2.25E+00	1.57E-08	1.72E-08	5.13E-12	5.00E-02	6.84E-04
Naftaleno	D	2.13E+00	5.63E-08	6.17E-08	5.13E-12	5.00E-02	2.49E-03
Fenantreno	D	4.51E+00	9.03E-09	9.89E-09	5.13E-12	5.00E-02	3.57E-04
Pireno	D	7.57E+00	1.71E-09	1.87E-09	5.13E-12	5.00E-02	1.32E-04
Benceno	A	7.20E-02	1.11E-06	1.22E-06	5.13E-12	5.00E-01	5.21E-02
Tolueno	D	2.47E-01	9.42E-07	1.03E-06	5.13E-12	5.00E-01	1.59E-02
Etilbenceno	D	8.63E-01	6.35E-07	6.95E-07	5.13E-12	5.00E-01	4.49E-03
Xileno	D	8.21E-01	6.44E-07	7.05E-07	5.13E-12	5.00E-01	1.97E-02

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj}}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	3.37E-06
Bario	D	1.33E+02	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	5.22E-04
Cromo	A	9.00E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.51E-05
Plomo	B2	1.20E+01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	2.02E-05
Acetona	D	1.74E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	6.83E-07
Acenafeno	D	1.84E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	7.23E-06
Antraceno	D	6.70E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	2.63E-06
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.73E-06
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.85E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.68E-06
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.49E-06
Criseno	B2	1.62E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	2.73E-06
Fluoranteno	D	2.29E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	8.99E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	8.84E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	8.36E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	1.77E-05
Pireno	D	7.57E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	2.97E-05
Benceno	A	7.20E-02	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.21E-07
Tolueno	D	2.47E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	9.70E-07
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	3.39E-06
Xileno	D	8.21E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	3.22E-06

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INHALACIÓN								
$DExp_{in} = \frac{C \times FE \times F_{ajinhala\acute{o}n} \times (FV + FEP)}{TM}$								
Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	FV	FEP	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	5.13E-12	2.56E+04	2.33E-12
Bario	D	1.33E+02	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	5.13E-12	1.10E+04	3.61E-10
Cromo	A	9.00E+00	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	5.13E-12	2.56E+04	1.05E-11
Plomo	B2	1.20E+01	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	5.13E-12	2.56E+04	1.40E-11
Acetona	D	1.74E-01	3.50E+02	1.66E+01	3.32E-07	5.13E-12	1.10E+04	3.06E-08
Acenafteno	D	1.84E+00	3.50E+02	1.66E+01	7.85E-08	5.13E-12	1.10E+04	7.65E-08
Antraceno	D	6.70E-01	3.50E+02	1.66E+01	3.38E-08	5.13E-12	1.10E+04	1.20E-08
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	3.50E+02	1.66E+01	2.90E-10	5.13E-12	2.56E+04	6.91E-11
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.50E+02	1.66E+01	3.73E-10	5.13E-12	2.56E+04	9.43E-11
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.50E+02	1.66E+01	3.16E-09	5.13E-12	2.56E+04	7.16E-10
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	3.50E+02	1.66E+01	1.79E-10	5.13E-12	2.56E+04	3.69E-11
Criseno	B2	1.62E+00	3.50E+02	1.66E+01	2.73E-10	5.13E-12	2.56E+04	1.02E-10
Fluoranteno	D	2.29E+00	3.50E+02	1.66E+01	5.58E-08	5.13E-12	1.10E+04	6.77E-08
Fluoreno	D	2.25E+00	3.50E+02	1.66E+01	1.57E-08	5.13E-12	1.10E+04	1.87E-08
Naftaleno	D	2.13E+00	3.50E+02	1.66E+01	5.63E-08	5.13E-12	1.10E+04	6.36E-08
Fenantreno	D	4.51E+00	3.50E+02	1.66E+01	9.03E-09	5.13E-12	1.10E+04	2.16E-08
Pireno	D	7.57E+00	3.50E+02	1.66E+01	1.71E-09	5.13E-12	1.10E+04	6.87E-09
Benceno	A	7.20E-02	3.50E+02	1.66E+01	1.11E-06	5.13E-12	2.56E+04	1.82E-08
Tolueno	D	2.47E-01	3.50E+02	1.66E+01	9.42E-07	5.13E-12	1.10E+04	1.23E-07
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.50E+02	1.66E+01	6.35E-07	5.13E-12	1.10E+04	2.90E-07
Xileno	D	8.21E-01	3.50E+02	1.66E+01	6.44E-07	5.13E-12	1.10E+04	2.80E-07

USO DE SUELO RESIDENCIAL

CONTACTO DÉRMICO

$$I_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{aj\text{d}\acute{e}r\text{m}\text{ic}\text{o}}}{TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	Faj	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	3.59E-08
Bario	D	1.33E+02	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	5.57E-06
Cromo	A	9.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	1.61E-07
Plomo	B2	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	2.15E-07
Acetona	D	1.74E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	3.64E-06
Acenafteno	D	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	3.85E-06
Antraceno	D	6.70E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.40E-06
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	9.24E-07
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	9.86E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	8.94E-07
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	7.92E-07
Criseno	B2	1.62E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	1.45E-06
Fluoranteno	D	2.29E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	4.79E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	4.71E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	4.46E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	9.44E-06
Pireno	D	7.57E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.58E-05
Benceno	A	7.20E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	6.46E-07
Tolueno	D	2.47E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	5.17E-06
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.81E-05
Xileno	D	8.21E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.72E-05

USO DE SUELO RESIDENCIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$D_{Exp\ agua} = \frac{C \times FE \times F_{aj\ agua}}{TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	FL	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	1.74E-05	7.92E-07
Bario	D	1.33E+02	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.23E-05	8.66E-05
Cromo	A	9.00E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	2.61E-05	5.33E-06
Plomo	B2	1.20E+01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	0.00E+00	0.00E+00
Acetona	D	1.74E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	4.09E-01	3.77E-03
Acenafteno	D	1.84E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.11E-03	1.08E-04
Antraceno	D	6.70E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	3.57E-04	1.27E-05
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	3.62E-06	8.47E-08
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	9.09E-06	2.27E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	9.09E-06	2.06E-07
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	9.09E-07	1.82E-08
Criseno	B2	1.62E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	2.50E-05	9.19E-07
Fluoranteno	D	2.29E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.32E-04	1.60E-05
Fluoreno	D	2.25E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	6.84E-04	8.15E-05
Naftaleno	D	2.13E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	2.49E-03	2.81E-04
Fenantreno	D	4.51E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	3.57E-04	8.53E-05
Pireno	D	7.57E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.32E-04	5.27E-05
Benceno	A	7.20E-02	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	5.21E-02	8.52E-05
Tolueno	D	2.47E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.59E-02	2.09E-04
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	4.49E-03	2.05E-04
Xileno	D	8.21E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.97E-02	8.58E-04

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$DE_{exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DE _{exp}
Arsénico	A	2.00E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	8.39E-07
Bario	D	1.33E+02	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.30E-04
Cromo	A	9.00E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.77E-06
Plomo	B2	1.20E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	5.03E-06
Acetona	D	1.74E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.70E-07
Acenafteno	D	1.84E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.80E-06
Antraceno	D	6.70E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	6.56E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	4.32E-07
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	4.61E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	4.18E-07
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.70E-07
Criseno	B2	1.62E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	6.79E-07
Fluoranteno	D	2.29E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.24E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.20E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.08E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.41E-06
Pireno	D	7.57E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	7.41E-06
Benceno	A	7.20E-02	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.02E-08
Tolueno	D	2.47E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.42E-07
Etilbenceno	D	8.63E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	8.44E-07
Xileno	D	8.21E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	8.03E-07

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INHALACIÓN

$$DE_{\text{Exp}_m} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DEsp
Arsénico	A	2.00E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	8.60E-13
Bario	D	1.33E+02	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.33E-10
Cromo	A	9.00E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	3.87E-12
Plomo	B2	1.20E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	5.16E-12
Acetona	D	1.74E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	3.64E-07	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.24E-08
Acenafteno	D	1.84E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	8.60E-08	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	3.10E-08
Antraceno	D	6.70E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	3.70E-08	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	4.86E-09
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	3.18E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.79E-11
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	4.08E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	3.81E-11
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	3.46E-09	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.90E-10
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.96E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.49E-11
Criseno	B2	1.62E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.99E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	4.13E-11
Fluoranteno	D	2.29E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	6.12E-08	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.74E-08
Fluoreno	D	2.25E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.72E-08	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	7.58E-09
Naftaleno	D	2.13E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	6.17E-08	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.57E-08
Fenantreno	D	4.51E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	9.89E-09	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	8.74E-09
Pireno	D	7.57E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.87E-09	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.78E-09
Benceno	A	7.20E-02	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.22E-06	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	7.37E-09
Tolueno	D	2.47E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.03E-06	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	4.99E-08
Etilbenceno	D	8.63E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	6.95E-07	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.17E-07
Xileno	D	8.21E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	7.05E-07	5.13E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.13E-07

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

CONTACTO DÉRMICO											
$DEX_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$											
Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	1.33E-08
Bario	D	1.33E+02	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.06E-06
Cromo	A	9.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	5.96E-08
Plomo	B2	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	7.95E-08
Acetona	D	1.74E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.35E-06
Acenafeno	D	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.42E-06
Antraceno	D	6.70E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.18E-07
azo(a)antrac	B2	1.03E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.41E-07
zo(b)fluoran	B2	1.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.64E-07
eo(k)fluoran	B2	9.97E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.30E-07
enzo(a)piret	B2	8.83E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	2.93E-07
Criseno	B2	1.62E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	5.37E-07
Fluorantenc	D	2.29E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.77E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.74E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.65E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.49E-06
Pireno	D	7.57E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.85E-06
Benceno	A	7.20E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	2.39E-07
Tolueno	D	2.47E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.91E-06
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	6.67E-06
Xileno	D	8.21E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	6.35E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$D_{Exp\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	Dexp
Arsénico	A	2.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.74E-05	2.93E-07
Bario	D	1.33E+02	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.23E-05	3.20E-05
Cromo	A	9.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.61E-05	1.97E-06
Plomo	B2	1.20E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	0.00E+00	0.00E+00
Acetona	D	1.74E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	4.09E-01	1.39E-03
Acenafeno	D	1.84E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.11E-03	3.99E-05
Antraceno	D	6.70E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	3.57E-04	4.68E-06
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.62E-06	3.13E-08
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	8.39E-08
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	7.60E-08
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-07	6.73E-09
Criseno	B2	1.62E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.50E-05	3.40E-07
Fluoranteno	D	2.29E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.32E-04	5.89E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	6.84E-04	3.01E-05
Naftaleno	D	2.13E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	2.49E-03	1.04E-04
Fenantreno	D	4.51E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	3.57E-04	3.15E-05
Pireno	D	7.57E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.32E-04	1.95E-05
Benceno	A	7.20E-02	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	5.21E-02	3.15E-05
Toluceno	D	2.47E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.59E-02	7.71E-05
Etilbenceno	D	8.63E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	4.49E-03	7.58E-05
Xileno	D	8.21E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.97E-02	3.17E-04

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	D _{Exp}
Arsénico	A	2.00E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.01E-08
Bario	D	1.33E+02	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	9.37E-05
Cromo	A	9.00E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.06E-08
Plomo	B2	1.20E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.21E-07
Acetona	D	1.74E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.23E-07
Acenafteno	D	1.84E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.30E-06
Antraceno	D	6.70E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.72E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.04E-08
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.11E-08
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.00E-08
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	8.89E-09
Criseno	B2	1.62E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.63E-08
Fluoranteno	D	2.29E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.61E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.59E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.50E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.18E-06
Pireno	D	7.57E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	5.33E-06
Benceno	A	7.20E-02	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	7.25E-10
Tolueno	D	2.47E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.74E-07
Etilbenceno	D	8.63E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	6.08E-07
Xileno	D	8.21E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	5.78E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INHALACIÓN

$$D_{Exp}_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.06E-14
Bario	D	1.33E+02	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	9.61E-11
Cromo	A	9.00E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	9.29E-14
Plomo	B2	1.20E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.24E-13
Acetona	D	1.74E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	3.64E-07	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	8.93E-09
Acenafteno	D	1.84E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	8.60E-08	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	2.23E-08
Antraceno	D	6.70E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	3.70E-08	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	3.50E-09
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	3.18E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	6.70E-13
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	4.08E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	9.15E-13
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	3.46E-09	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	6.95E-12
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.96E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	3.58E-13
Criseno	B2	1.62E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.99E-10	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	9.91E-13
Fluoranteno	D	2.29E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	6.12E-08	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.97E-08
Fluoreno	D	2.25E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.72E-08	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	5.46E-09
Naftaleno	D	2.13E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	6.17E-08	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.85E-08
Fenantreno	D	4.51E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	9.89E-09	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	6.29E-09
Pireno	D	7.57E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.87E-09	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	2.00E-09
Benceno	A	7.20E-02	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.22E-06	5.13E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.77E-10
Tolueno	D	2.47E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.03E-06	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	3.59E-08
Etilbenceno	D	8.63E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	6.95E-07	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	8.46E-08
Xileno	D	8.21E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	7.05E-07	5.13E-12	7.00E+01	3.65E+02	8.16E-08

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

CONTACTO DÉRMICO

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.18E-10
Bario	D	1.33E+02	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.48E-06
Cromo	A	9.00E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.43E-09
Plomo	B2	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.91E-09
Acetona	D	1.74E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	9.68E-07
Acenafteno	D	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.02E-06
Antraceno	D	6.70E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.73E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	8.19E-09
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	8.75E-09
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	7.93E-09
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	7.02E-09
Criseno	B2	1.62E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.29E-08
Fluoranteno	D	2.29E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.27E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.25E-06
Naftaleno	D	2.13E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.19E-06
Fenantreno	D	4.51E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.51E-06
Pireno	D	7.57E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.21E-06
Benceno	A	7.20E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	5.72E-09
Tolueno	D	2.47E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.37E-06
Etilbenceno	D	8.63E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.80E-06
Xileno	D	8.21E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.57E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$D_{Exp\text{ agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Arsénico	A	2.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.74E-05	7.02E-09
Bario	D	1.33E+02	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.23E-05	2.30E-05
Cromo	A	9.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.61E-05	4.73E-08
Plomo	B2	1.20E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	0.00E+00	0.00E+00
Acetona	D	1.74E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.09E-01	1.00E-03
Acenafieno	D	1.84E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.11E-03	2.87E-05
Antraceno	D	6.70E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.57E-04	3.37E-06
Benzo(a)antraceno	B2	1.03E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.62E-06	7.51E-10
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.10E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	2.01E-09
Benzo(k)fluoranteno	B2	9.97E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	1.82E-09
Benzo(a)pireno	B2	8.83E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-07	1.62E-10
Criseno	B2	1.62E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.50E-05	8.15E-09
Fluoranteno	D	2.29E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.32E-04	4.24E-06
Fluoreno	D	2.25E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	6.84E-04	2.17E-05
Naftaleno	D	2.13E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.49E-03	7.48E-05
Fenantreno	D	4.51E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.57E-04	2.27E-05
Pireno	D	7.57E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.32E-04	1.40E-05
Benceno	A	7.20E-02	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	5.21E-02	7.56E-07
Tolueno	D	2.47E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.59E-02	5.55E-05
Etilbenceno	D	8.63E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.49E-03	5.45E-05
Xileno	D	8.21E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.97E-02	2.28E-04

USO DE SUELO RESIDENCIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CPI	CFAGUA	R0	R R1	RAGUA
		ING	DER	INH	AG	RFD0	RFD1	SF0	SF1						
Artenico	A	3.4E-06	3.6E-08	2.3E-12	7.9E-07	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	5.E-06	4.E-11	1.E-06
Bario	D	5.2E-04	5.6E-06	3.6E-10	8.7E-05	7.00E-02	3.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	1.5E-05	1.6E-07	1.0E-11	5.3E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.30E+01	0.0	0.0	0.0	1.E-07	4.E-10	4.E-08
Plomo	B2	2.0E-05	2.2E-07	1.4E-11	0.0E+00										
Actinona	D	6.8E-07	3.6E-06	3.1E-08	3.8E-03	1.00E-01				0.0		0.0			
Acenafeno	D	7.2E-06	3.8E-06	7.7E-06	1.1E-04	6.00E-02				0.0		0.0			
Antraeno	D	2.6E-06	1.4E-06	1.2E-08	1.3E-05	3.00E-01				0.0		0.0			
Benzo(a)antraceno	B2	1.7E-06	9.2E-07	6.9E-11	8.5E-08		2.86E-01	7.30E-01	3.08E-01		0.0		2.E-06	2.E-11	6.E-08
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.9E-06	9.9E-07	9.4E-11	2.3E-07			7.30E-01	3.08E-01				2.E-06	3.E-11	2.E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	1.7E-06	8.9E-07	7.2E-10	2.1E-07	1.00E-01		7.30E-02	3.08E-02	0.0			2.E-07	2.E-11	2.E-08
Benzo(a)pireno	B2	1.5E-06	7.9E-07	3.7E-11	1.8E-08		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00	0.0			2.E-05	3.E-10	1.E-07
Criseno	B2	2.7E-06	1.5E-06	3.0E-10	9.2E-07			1.15E+00	1.15E+00				5.E-06	1.E-10	1.E-06
Fluoranteno	D	9.0E-06	4.8E-06	6.8E-08	1.6E-05	4.00E-02				0.0		0.0			
Fluorano	D	8.8E-06	4.7E-06	1.9E-08	8.2E-05	4.00E-02				0.0		0.0			
Naftaleno	D	8.4E-06	4.5E-06	6.4E-08	2.8E-04	2.00E-02	8.57E-44			0.0	0.0	0.0			
Fenantreno	D	1.8E-05	9.4E-06	2.2E-08	8.5E-05	3.00E-02				0.0		0.0			
Pireno	D	3.0E-05	1.6E-05	6.9E-09	5.3E-05	3.00E-02				0.0		0.0			
Benzo(a)pireno	A	1.2E-07	6.5E-07	3.8E-08	8.5E-05	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02	0.0	0.0	0.0	2.E-06	5.E-10	2.E-06
Tolueno	D	9.7E-07	5.2E-06	1.2E-07	2.1E-04	2.00E-01	1.14E-01			0.0		0.0			
Etilbenzeno	D	3.4E-06	1.8E-05	2.9E-07	2.1E-04	1.00E-01	2.86E-01			0.0		0.0			
Xileno	D	3.2E-06	1.7E-05	2.8E-07	8.6E-04	2.00E+00	8.57E-02			0.0		0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.1	3.E-05	1.E-09	5.E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CPI	CFAGUA	R0	R R1	RAGUA
		ING	DER	INH	AG	RFD0	RFD1	SF0	SF1						
Artenico	A	8.4E-07	1.3E-08	8.6E-13	2.9E-07	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	1.E-06	1.E-11	4.E-07
Bario	D	1.3E-04	2.1E-06	1.3E-10	3.2E-05	7.00E-02	3.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	3.8E-06	6.0E-08	3.9E-12	2.0E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.30E+01	0.0	0.0	0.0	3.E-06	2.E-10	1.E-06
Plomo	B2	5.0E-06	8.0E-08	5.2E-12	0.0E+00										
Actinona	D	1.7E-07	1.3E-06	1.2E-08	1.4E-03	1.00E-01				0.0		0.0			
Acenafeno	D	1.8E-06	1.4E-06	3.1E-08	4.0E-05	6.00E-02				0.0		0.0			
Antraeno	D	6.6E-07	5.2E-07	4.9E-09	4.7E-06	3.00E-01				0.0		0.0			
Benzo(a)antraceno	B2	4.3E-07	3.4E-07	2.8E-11	3.1E-08		2.86E-01	7.30E-01	3.08E-01		0.0		6.E-07	9.E-12	2.E-08
Benzo(b)fluoranteno	B2	4.6E-07	3.6E-07	3.8E-11	8.4E-08			7.30E-01	3.08E-01				6.E-07	1.E-11	6.E-08
Benzo(k)fluoranteno	B2	4.2E-07	3.3E-07	2.9E-10	7.6E-08	1.00E-01		7.30E-02	3.08E-02	0.0			5.E-08	9.E-12	6.E-09
Benzo(a)pireno	B2	3.7E-07	2.9E-07	1.5E-11	6.7E-09		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00	0.0			5.E-06	1.E-10	5.E-08
Criseno	B2	6.8E-07	5.4E-07	4.1E-11	3.4E-07			1.15E+00	1.15E+00				1.E-06	5.E-11	4.E-07
Fluoranteno	D	2.3E-06	1.8E-06	2.7E-08	5.9E-06	4.00E-02				0.0		0.0			
Fluorano	D	2.2E-06	1.7E-06	7.4E-09	3.0E-05	4.00E-02				0.0		0.0			
Naftaleno	D	2.1E-06	1.6E-06	2.6E-08	1.0E-04	2.00E-02	8.57E-44			0.0	0.0	0.0			
Fenantreno	D	4.4E-06	3.5E-06	8.7E-09	3.1E-05	3.00E-02				0.0		0.0			
Pireno	D	7.4E-06	5.9E-06	2.8E-09	1.9E-05	3.00E-02				0.0		0.0			
Benzo(a)pireno	A	3.0E-08	2.4E-07	7.4E-09	3.1E-05	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02	0.0	0.0	0.0	8.E-09	2.E-10	9.E-07
Tolueno	D	2.4E-07	1.9E-06	5.0E-08	7.7E-05	2.00E-01	1.14E-01			0.0		0.0			
Etilbenzeno	D	8.4E-07	6.7E-06	1.2E-07	7.6E-05	1.00E-01	2.86E-01			0.0		0.0			
Xileno	D	8.0E-07	6.3E-06	1.1E-07	3.2E-04	2.00E+00	8.57E-02			0.0		0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.0	9.E-06	6.E-10	2.E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sustancia	Clase	INGESTIÓN				DATOS				IP	IPAGUA	R0	R1	RAGUA	
		ING	DER	INH	AG	RFD0	RFD1	FP0	FP1						
Anémico	A	2 0E-08	3 2E 10	2 1E 14	7 0E-09	3 00E-04		1 50E+00	1 51E+01	0 0	0 0	3 E-08	3 E 13	1 E-08	
Bario	D	9 4E-05	1 5E-06	9 6E 11	2 3E-05	7 00E-02	1 40E-04			0 0	0 0				
Cromo	A	9 1E-08	1 4E-09	9 3E 14	4 7E-08	3 00E-03	4 29E-05	7 30E-03	4 20E+01	0 0	0 0	7 E-10	4 E 12	3 E 10	
Plomo	B2	1 2E-07	1 9E-09	1 2E 13	0 0E+00					0 0	0 0				
Acetona	D	1 2E-07	9 7E-07	8 9E-09	1 0E-03	1 00E-01				0 0	0 0				
Acetofeno	D	1 3E-06	1 0E-06	2 2E-08	2 9E-05	6 00E-02				0 0	0 0				
Antraeno	D	4 7E-07	3 7E-07	3 5E-09	3 4E-06	3 00E-01				0 0	0 0				
Benzo(a)antraceno	B2	1 0E-08	8 2E-09	6 7E 13	7 5E 10		2 86E-01	7 30E-01	3 08E-01		0 0	1 E-08	2 E 13	5 E 10	
Benzo(b)fluoranteno	B2	1 1E-08	8 7E-09	9 2E 13	2 0E-09		1 00E-01	7 30E-01	3 08E-01		0 0	1 E-08	3 E 13	1 E-09	
Benzo(k)fluoranteno	B2	1 0E-08	7 9E-09	7 0E 12	1 8E-09		1 00E-01	7 30E-02	3 08E-02		0 0	1 E-09	2 E 13	1 E 10	
Benzo(a)pireno	B2	8 9E-09	7 0E-09	3 6E 13	1 6E 10		3 14E+00	7 30E+00	7 32E+00		0 0	1 E-07	3 E 12	1 E-09	
Creseno	B2	1 6E-08	1 3E-08	9 9E 13	8 2E-09		1 15E+00	1 15E+00				3 E-08	1 E 12	9 E-09	
Fluoranteno	D	1 3E-06	1 3E-06	2 0E-08	4 2E-06	4 00E-02				0 0	0 0				
Fluoreno	D	1 6E-06	1 3E-06	5 5E-09	2 2E-05	4 00E-02				0 0	0 0				
Naftaleno	D	1 5E-06	1 2E-06	1 9E-08	7 5E-05	2 00E-02	8 57E-04			0 0	0 0				
Fenantreno	D	3 2E-06	2 5E-06	6 3E-09	2 3E-05	3 00E-02				0 0	0 0				
Pireno	D	5 3E-06	4 2E-06	2 0E-09	1 4E-05	3 00E-02				0 0	0 0				
Benceno	A	7 2E 10	5 7E-09	1 8E 10	7 6E 07	3 00E-03	1 70E-03	2 90E-02	2 90E-02	0 0	0 0	2 E-10	5 E 12	2 E-08	
Tolueno	D	1 7E-07	1 4E-06	3 6E-08	5 6E-05	2 00E-01	1 14E-01			0 0	0 0				
Etilbenceno	D	6 1E-07	4 8E-06	8 5E-08	5 5E-05	1 00E-01	2 86E-01			0 0	0 0				
Xileno	D	5 8E-07	4 6E-06	8 2E-08	2 3E-04	2 00E+00	8 57E-02			0 0	0 0				
								SUMA		0 0	0 0	0 0	2 E-07	1 E 11	5 E-08

A2.3. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de la laguna de “chapopote”

En la página A25 se presentan los datos empleados para la evaluación de riesgo a la salud en zona de la laguna de “chapopote”, en las páginas A26 – A37 los cálculos de dosis de exposición en esta zona para diferentes usos de suelo (residencial, comercial/industrial y trabajadores de la construcción) y diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de partículas y vapores, contacto dérmico e ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados provenientes del suelo afectado).

En las páginas A38 y A39, se muestran los cálculos de riesgo y cocientes de peligrosidad para los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición.

ZONA DE LAGUNA DE "CHAPOPOTE"

$$Faj = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}}$$

SUELO		INHALACIÓN		DÉRMICO		AGUA		
NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	
2.00E-04	1.00E-04	2.00E+01	2.00E+01	1.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	2.00E+00	TC
6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	6.00E+00	3.00E+01	DE
1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	1.50E+01	7.00E+01	PC
1.23E-04		1.66E+01		8.29E-01		1.66E+00		Faj

FE1	3.50E+02	TMcancerigenos	2.56E+04	TCsuelo	1.00E-04	A	3.16E+03
FE2	2.50E+02	TMnocancerigenos	1.10E+04	TCaire	2.00E+01	AD	5.00E-01
FE3	1.80E+02	TMnocancerigenosCO	3.65E+02	TCagua	2.00E+00	ABP	1.00E-03
						MS	1.00E+00
		DE in	3.00E+01	PC	7.00E+01		
		DE tc	1.00E+00				

Parámetros fisicoquímicos de los compuestos

Sustancia	Clase	Concentración	FV res	FV com	FEP	ABP	FL
Bario	D	1.68E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.52E-12	1.00E-03	1.23E-05
Acetona	D	4.73E-01	2.53E-07	2.77E-07	3.52E-12	5.00E-01	8.04E+00
Diclorometano	B	2.45E-01	0.00E+00	0.00E+00	3.52E-12	5.00E-01	2.49E-01
Acenafteno	D	1.20E+01	5.39E-08	5.90E-08	3.52E-12	5.00E-02	1.11E-03
Acenaftileno	D	4.32E+00	1.39E-08	1.52E-08	3.52E-12	5.00E-02	1.99E-03
Antraceno	D	5.16E+01	2.32E-08	2.54E-08	3.52E-12	5.00E-02	3.57E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	1.99E-10	2.18E-10	3.52E-12	5.00E-02	3.62E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	2.17E-09	2.37E-09	3.52E-12	5.00E-02	9.09E-06
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	2.02E-10	2.21E-10	3.52E-12	5.00E-02	3.12E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	1.23E-10	1.35E-10	3.52E-12	5.00E-02	9.09E-07
Criseno	B2	1.68E+01	1.87E-10	2.05E-10	3.52E-12	5.00E-02	2.50E-05
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	5.97E-11	6.54E-11	3.52E-12	5.00E-02	1.52E-06
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.83E-08	4.20E-08	3.52E-12	5.00E-02	1.32E-04
Fluoreno	D	1.44E+01	1.08E-08	1.18E-08	3.52E-12	5.00E-02	6.84E-04
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	1.27E-11	1.39E-11	3.52E-12	5.00E-02	3.12E-06
Naftaleno	D	1.62E+01	3.87E-08	4.24E-08	3.52E-12	5.00E-02	2.49E-03
Fenantreno	D	5.01E+01	6.20E-09	6.79E-09	3.52E-12	5.00E-02	3.57E-04
Pireno	D	4.40E+01	1.17E-09	1.28E-09	3.52E-12	5.00E-02	1.32E-04
Benceno	A	2.60E-02	7.64E-07	8.37E-07	3.52E-12	5.00E-01	5.21E-02
Tolueno	D	5.30E-02	6.46E-07	7.08E-07	3.52E-12	5.00E-01	1.59E-02
Etilbenceno	D	6.86E-01	4.36E-07	4.77E-07	3.52E-12	5.00E-01	4.49E-03
Xileno	D	2.33E+00	4.42E-07	4.84E-07	3.52E-12	5.00E-01	1.97E-02

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj}}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	6.60E-06
Acetona	D	4.73E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	1.86E-06
Diclorometano	B	2.45E-01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	4.12E-07
Acenafteno	D	1.20E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	4.71E-05
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	1.70E-05
Antraceno	D	5.16E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	2.03E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.75E-05
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	1.50E-05
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	3.01E-05
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	3.53E-06
Criseno	B2	1.68E+01	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	2.83E-05
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	3.10E-06
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	9.15E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	5.65E-05
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	4.78E-06
Naftaleno	D	1.62E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	6.36E-05
Fenantreno	D	5.01E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	1.97E-04
Pireno	D	4.40E+01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	1.73E-04
Benceno	A	2.60E-02	3.50E+02	1.23E-04	2.56E+04	4.38E-08
Tolueno	D	5.30E-02	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	2.08E-07
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	2.69E-06
Xileno	D	2.33E+00	3.50E+02	1.23E-04	1.10E+04	9.15E-06

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INHALACIÓN

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj} \times FV \times FEP}{TM} \times (FV + FEP)$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	FV	FEP	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	3.52E-12	1.10E+04	3.13E-12
Acetona	D	4.73E-01	3.50E+02	1.66E+01	2.53E-07	3.52E-12	1.10E+04	6.33E-08
Dictorometano	B	2.45E-01	3.50E+02	1.66E+01	0.00E+00	3.52E-12	2.56E+04	1.96E-13
Acenafteno	D	1.20E+01	3.50E+02	1.66E+01	5.39E-08	3.52E-12	1.10E+04	3.42E-07
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.50E+02	1.66E+01	1.39E-08	3.52E-12	1.10E+04	3.17E-08
Antraceno	D	5.16E+01	3.50E+02	1.66E+01	2.32E-08	3.52E-12	1.10E+04	6.34E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.50E+02	1.66E+01	1.99E-10	3.52E-12	2.56E+04	4.79E-10
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.50E+02	1.66E+01	2.17E-09	3.52E-12	2.56E+04	4.40E-09
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.50E+02	1.66E+01	2.02E-10	3.52E-12	1.10E+04	8.32E-10
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.50E+02	1.66E+01	1.23E-10	3.52E-12	2.56E+04	6.03E-11
Criseno	B2	1.68E+01	3.50E+02	1.66E+01	1.87E-10	3.52E-12	2.56E+04	7.27E-10
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.50E+02	1.66E+01	5.97E-11	3.52E-12	2.56E+04	2.64E-11
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.50E+02	1.66E+01	3.83E-08	3.52E-12	1.10E+04	4.73E-07
Fluoreno	D	1.44E+01	3.50E+02	1.66E+01	1.08E-08	3.52E-12	1.10E+04	8.22E-08
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.50E+02	1.66E+01	1.27E-11	3.52E-12	2.56E+04	1.04E-11
Naftaleno	D	1.62E+01	3.50E+02	1.66E+01	3.87E-08	3.52E-12	1.10E+04	3.32E-07
Fenantreno	D	5.01E+01	3.50E+02	1.66E+01	6.20E-09	3.52E-12	1.10E+04	1.65E-07
Pireno	D	4.40E+01	3.50E+02	1.66E+01	1.17E-09	3.52E-12	1.10E+04	2.74E-08
Benzeno	A	2.60E-02	3.50E+02	1.66E+01	7.64E-07	3.52E-12	2.56E+04	4.51E-09
Tolueno	D	5.30E-02	3.50E+02	1.66E+01	6.46E-07	3.52E-12	1.10E+04	1.81E-08
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.50E+02	1.66E+01	4.36E-07	3.52E-12	1.10E+04	1.58E-07
Xileno	D	2.33E+00	3.50E+02	1.66E+01	4.42E-07	3.52E-12	1.10E+04	5.45E-07

USO DE SUELO RESIDENCIAL

CONTACTO DÉRMICO

$$DE_{Exp\ CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{aj\ d\ r\ m\ c\ o}}{TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	Faj	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	7.03E-08
Acetona	D	4.73E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	9.90E-06
Diclorometano	B	2.45E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	2.20E-06
Acenafteno	D	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	2.51E-05
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	9.04E-06
Antraceno	D	5.16E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.08E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	9.33E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	8.01E-06
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.60E-05
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	1.88E-06
Criseno	B2	1.68E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	1.51E-05
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	1.65E-06
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	4.87E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	3.01E-05
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	2.55E-06
Naftaleno	D	1.62E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	3.39E-05
Fenantreno	D	5.01E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.05E-04
Pireno	D	4.40E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	9.21E-05
Benceno	A	2.60E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	2.56E+04	2.33E-07
Tolueno	D	5.30E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.11E-06
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	1.44E-05
Xileno	D	2.33E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	3.50E+02	8.29E-01	1.10E+04	4.87E-05

USO DE SUELO RESIDENCIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times Faj_{\text{agua}}}{TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	FL	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.23E-05	1.09E-06
Acetona	D	4.73E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	8.04E+00	2.01E-01
Diclorometano	B	2.45E-01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	2.49E-01	1.38E-03
Acenafteno	D	1.20E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.11E-03	7.05E-04
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.99E-03	4.56E-04
Antraceno	D	5.16E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	3.57E-04	9.75E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	3.62E-06	8.55E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	9.09E-06	1.84E-06
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	3.12E-06	1.27E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	9.09E-07	4.33E-08
Criseno	B2	1.68E+01	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	2.50E-05	9.53E-06
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	1.52E-06	6.33E-08
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.32E-04	1.62E-04
Fluoreno	D	1.44E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	6.84E-04	5.22E-04
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	3.12E-06	2.01E-07
Naftaleno	D	1.62E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	2.49E-03	2.14E-03
Fenantreno	D	5.01E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	3.57E-04	9.47E-04
Pireno	D	4.40E+01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.32E-04	3.07E-04
Benceno	A	2.60E-02	3.50E+02	1.66E+00	2.56E+04	5.21E-02	3.08E-05
Tolueno	D	5.30E-02	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.59E-02	4.48E-05
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	4.49E-03	1.63E-04
Xileno	D	2.33E+00	3.50E+02	1.66E+00	1.10E+04	1.97E-02	2.44E-03

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.64E-06
Acetona	D	4.73E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.63E-07
Diclorometano	B	2.45E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	1.03E-07
Acenafteno	D	1.20E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.17E-05
Acenaftileno	D	4.32E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.23E-06
Antraceno	D	5.16E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.05E-05
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	4.36E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.74E-06
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	7.50E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	8.81E-07
Criseno	B2	1.68E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	7.05E-06
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	7.72E-07
Fluoranteno	D	2.33E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.28E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.41E-05
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	1.19E-06
Naftaleno	D	1.62E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.59E-05
Fenantreno	D	5.01E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.90E-05
Pireno	D	4.40E+01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.31E-05
Benceno	A	2.60E-02	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	1.09E-08
Tolueno	D	5.30E-02	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.19E-08
Etilbenceno	D	6.86E-01	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	6.71E-07
Xileno	D	2.33E+00	1.00E-04	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.28E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INHALACIÓN										
$DE_{Exp\ in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$										
Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DE _{Exp}
Bario	D	1.68E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.16E-12
Acetona	D	4.73E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.77E-07	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.56E-08
Diclorometano	B	2.45E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	0.00E+00	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	7.23E-14
Acenafteno	D	1.20E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	5.90E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.39E-07
Acenaftileno	D	4.32E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.52E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.28E-08
Antraceno	D	5.16E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.54E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.57E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.18E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.93E-10
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.37E-09	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.78E-09
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.21E-10	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	3.36E-10
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.35E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.43E-11
Criseno	B2	1.68E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.05E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.94E-10
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	6.54E-11	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.06E-11
Fluoranteno	D	2.33E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	4.20E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.91E-07
Fluoreno	D	1.44E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.18E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	3.33E-08
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.39E-11	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	4.15E-12
Naftaleno	D	1.62E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	4.24E-08	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.34E-07
Fenantreno	D	5.01E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	6.79E-09	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	6.66E-08
Pireno	D	4.40E+01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	1.28E-09	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	1.11E-08
Benceno	A	2.60E-02	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	8.37E-07	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.83E-09
Tolueno	D	5.30E-02	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	7.08E-07	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	7.34E-09
Etilbenceno	D	6.86E-01	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	4.77E-07	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	6.41E-08
Xileno	D	2.33E+00	2.00E+01	2.50E+02	3.00E+01	4.84E-07	3.52E-12	7.00E+01	1.10E+04	2.21E-07

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

CONTACTO DÉRMICO

$$D_{Exp} CD = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	2.60E-08
Acetona	D	4.73E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.66E-06
Diclorometano	B	2.45E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	8.12E-07
Acenafteno	D	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	9.28E-06
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.34E-06
Antraceno	D	5.16E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.99E-05
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	3.45E-06
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	2.96E-06
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.92E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	6.96E-07
Criseno	B2	1.68E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	5.57E-06
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	6.10E-07
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.80E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.11E-05
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	9.41E-07
Naftaleno	D	1.62E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.25E-05
Fenantreno	D	5.01E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.87E-05
Pireno	D	4.40E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	3.40E-05
Benceno	A	2.60E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	2.56E+04	8.61E-08
Tolueno	D	5.30E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	4.10E-07
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	5.30E-06
Xileno	D	2.33E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	2.50E+02	3.00E+01	7.00E+01	1.10E+04	1.80E-05

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{agua} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Bario	D	1.68E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.23E-05	4.04E-07
Acetona	D	4.73E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	8.04E+00	7.44E-02
Diclorometano	B	2.45E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.49E-01	5.11E-04
Acenafteno	D	1.20E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.11E-03	2.60E-04
Acenaftileno	D	4.32E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.99E-03	1.68E-04
Antraceno	D	5.16E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	3.57E-04	3.60E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.62E-06	3.16E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	6.81E-07
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	3.12E-06	4.68E-07
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-07	1.60E-08
Criseno	B2	1.68E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.50E-05	3.52E-06
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.52E-06	2.34E-08
Fluoranteno	D	2.33E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.32E-04	6.00E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	6.84E-04	1.93E-04
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.12E-06	7.44E-08
Naftaleno	D	1.62E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	2.49E-03	7.90E-04
Fenantreno	D	5.01E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	3.57E-04	3.50E-04
Pireno	D	4.40E+01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.32E-04	1.13E-04
Benceno	A	2.60E-02	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	5.21E-02	1.14E-05
Tolueno	D	5.30E-02	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.59E-02	1.65E-05
Etilbenceno	D	6.86E-01	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	4.49E-03	6.02E-05
Xileno	D	2.33E+00	2.50E+02	3.00E+01	2.00E+00	7.00E+01	1.10E+04	1.97E-02	9.00E-04

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INGESTIÓN DE SUELO								
$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$								
Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	D _{Exp}
Bario	D	1.68E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.18E-06
Acetona	D	4.73E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.33E-07
Diclorometano	B	2.45E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.47E-09
Acenafteno	D	1.20E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	8.45E-06
Acenaftileno	D	4.32E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.04E-06
Antraceno	D	5.16E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.64E-05
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.05E-07
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	8.99E-08
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	5.40E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.11E-08
Criseno	B2	1.68E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.69E-07
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.85E-08
Fluoranteno	D	2.33E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.64E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.01E-05
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.86E-08
Naftaleno	D	1.62E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.14E-05
Fenantreno	D	5.01E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.53E-05
Pireno	D	4.40E+01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.10E-05
Benceno	A	2.60E-02	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.62E-10
Tolueno	D	5.30E-02	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.73E-08
Etilbenceno	D	6.86E-01	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.83E-07
Xileno	D	2.33E+00	1.00E-04	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.64E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INHALACIÓN										
$DExp_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$										
Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	8.33E-13
Acetona	D	4.73E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.77E-07	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.84E-08
Diclorometano	B	2.45E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	0.00E+00	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	1.74E-15
Acenafteno	D	1.20E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	5.90E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	9.98E-08
Acenaftileno	D	4.32E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.52E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	9.24E-09
Antraceno	D	5.16E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.54E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.85E-07
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.18E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	4.64E-12
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.37E-09	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	4.27E-11
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.21E-10	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	2.42E-10
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.35E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	5.84E-13
Criseno	B2	1.68E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.05E-10	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	7.06E-12
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	6.54E-11	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	2.55E-13
Fluoranteno	D	2.33E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	4.20E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.38E-07
Fluoreno	D	1.44E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.18E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	2.40E-08
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.39E-11	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	9.95E-14
Naftaleno	D	1.62E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	4.24E-08	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	9.67E-08
Fenantreno	D	5.01E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	6.79E-09	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	4.80E-08
Pireno	D	4.40E+01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	1.28E-09	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	7.98E-09
Benceno	A	2.60E-02	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	8.37E-07	3.52E-12	7.00E+01	2.56E+04	4.38E-11
Tolueno	D	5.30E-02	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	7.08E-07	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	5.29E-09
Etilbenceno	D	6.86E-01	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	4.77E-07	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	4.61E-08
Xileno	D	2.33E+00	2.00E+01	1.80E+02	1.00E+00	4.84E-07	3.52E-12	7.00E+01	3.65E+02	1.59E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

CONTACTO DÉRMICO

$$D_{Exp\ CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	1.68E+00	3.16E+03	5.00E-01	1.00E-03	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.87E-08
Acetona	D	4.73E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.63E-06
Diclorometano	B	2.45E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.95E-08
Acenafteno	D	1.20E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	6.68E-06
Acenaftileno	D	4.32E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.40E-06
Antraceno	D	5.16E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.87E-05
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	8.27E-08
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	7.10E-08
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.26E-06
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.67E-08
Criseno	B2	1.68E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.34E-07
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.46E-08
Fluoranteno	D	2.33E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.30E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	8.01E-06
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.26E-08
Naftaleno	D	1.62E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	9.02E-06
Fenantreno	D	5.01E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.79E-05
Pireno	D	4.40E+01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.45E-05
Benceno	A	2.60E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.07E-09
Tolueno	D	5.30E-02	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.95E-07
Etilbenceno	D	6.86E-01	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.82E-06
Xileno	D	2.33E+00	3.16E+03	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.80E+02	1.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.30E-05

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$D_{Exp\ agua} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Bario	D	1.68E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.23E-05	2.91E-07
Acetona	D	4.73E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	8.04E+00	5.36E-02
Diclorometano	B	2.45E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.49E-01	1.23E-05
Acenafteno	D	1.20E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.11E-03	1.87E-04
Acenaftileno	D	4.32E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.99E-03	1.21E-04
Antraceno	D	5.16E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.57E-04	2.59E-04
Benzo(a)antraceno	B2	1.04E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.62E-06	7.58E-09
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.93E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-06	1.63E-08
Benzo(ghi)perileno	D	7.66E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.12E-06	3.37E-07
Benzo(a)pireno	B2	2.10E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	9.09E-07	3.84E-10
Criseno	B2	1.68E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	2.50E-05	8.45E-08
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.84E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	1.52E-06	5.61E-10
Fluoranteno	D	2.33E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.32E-04	4.32E-05
Fluoreno	D	1.44E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	6.84E-04	1.39E-04
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.84E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	3.12E-06	1.79E-09
Naftaleno	D	1.62E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	2.49E-03	5.69E-04
Fenantreno	D	5.01E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	3.57E-04	2.52E-04
Pireno	D	4.40E+01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.32E-04	8.16E-05
Benceno	A	2.60E-02	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	2.56E+04	5.21E-02	2.73E-07
Tolueno	D	5.30E-02	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.59E-02	1.19E-05
Etilbenceno	D	6.86E-01	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	4.49E-03	4.34E-05
Xileno	D	2.33E+00	1.80E+02	1.00E+00	2.00E+00	7.00E+01	3.65E+02	1.97E-02	6.48E-04

CHAPOPOTE

USO DE SUELO RESIDENCIAL

Sustancia	Clase	ING	DOSIS DE EXPOSICIÓN			DATOS						R0	R1	RAGUA		
			DER	INH	AG	RfD	RfD1	SF0	SF1	CP0	CP1				CPAGUA	
Bario	D	6.80E-06	7.03E-08	3.13E-12	1.09E-06	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0				
Acetona	D	1.86E-06	9.90E-06	6.33E-08	2.01E-01	1.00E-01				0.0	0.0	2.0				
Diclorometano	B	4.12E-07	2.20E-06	1.96E-13	1.38E-03	6.00E-02		7.50E-03	1.65E-03	0.0	0.0	0.0	2.E-08	3.E-16	1.E-05	
Acetaldehído	D	4.71E-05	2.51E-05	3.42E-07	7.05E-04	6.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Acetofenón	D	1.70E-05	9.04E-06	3.17E-08	4.56E-04	4.00E-03				0.0	0.0	0.1				
Antraceno	D	2.03E-04	1.08E-04	6.34E-07	9.75E-04	3.00E-01				0.0	0.0	0.0				
Benzo(a)antraceno	B2	1.75E-05	9.33E-06	4.79E-10	8.55E-07		2.86E-01	7.30E-01	3.00E-01	0.0	0.0	0.0	2.E-05	1.E-10	6.E-07	
Benzo(b)fluoranteno	B2	1.50E-05	8.01E-06	4.40E-09	1.84E-06		1.00E-01	7.30E-02	3.00E-02	0.0	0.0	0.0	2.E-06	1.E-10	1.E-07	
Benzo(g)perileno	D	3.01E-05	1.60E-05	8.32E-10	1.27E-06	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Benzo(a)pireno	B2	3.53E-06	1.88E-06	6.03E-11	4.33E-08		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00	0.0	0.0	0.0	4.E-05	4.E-10	3.E-07	
Criseno	B2	2.83E-05	1.51E-05	7.27E-10	9.53E-06			1.15E+00	1.15E+00	0.0	0.0	0.0	5.E-05	8.E-10	1.E-05	
Dibenz(a,h)antraceno	B2	3.10E-06	1.65E-06	2.64E-11	6.33E-08		1.14E-01	7.30E+00		0.0	0.0	0.0	3.E-05		5.E-07	
Fluoranteno	D	9.15E-05	4.87E-05	4.73E-07	1.62E-04	4.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Fluoreno	D	5.65E-05	3.01E-05	8.22E-08	5.22E-04	4.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	4.78E-06	2.55E-06	1.04E-11	2.01E-07		3.14E-01	7.30E-01	3.00E-01	0.0	0.0	0.0	5.E-06	3.E-12	1.E-07	
Naftaleno	D	6.34E-05	3.39E-05	3.32E-07	2.14E-03	2.00E-02		8.57E-04		0.0	0.0	0.1				
Feoantreno	D	1.97E-04	1.05E-04	1.65E-07	9.47E-04	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Pireno	D	1.73E-04	9.21E-05	2.74E-08	3.87E-04	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Benzeno	A	4.34E-08	2.33E-07	4.51E-09	3.08E-05	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02	0.0	0.0	0.0	8.E-09	1.E-10	9.E-07	
Tolueno	D	2.08E-07	1.11E-06	1.81E-08	4.48E-05	2.00E-01	1.14E-01			0.0	0.0	0.0				
Etilbenzeno	D	2.69E-06	1.44E-05	1.54E-07	1.43E-04	1.60E-01	2.86E-01			0.0	0.0	0.0				
Xileno	D	9.15E-06	4.87E-05	5.45E-07	2.44E-03	2.00E+00	8.57E-02			0.0	0.0	0.0				
SUMA											0.0	0.0	2.3	2.E-04	2.E-09	2.E-05

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

Sustancia	Clase	ING	DOSIS DE EXPOSICIÓN			DATOS						R0	R1	RAGUA		
			DER	INH	AG	RfD	RfD1	SF0	SF1	CP0	CP1				CPAGUA	
Bario	D	1.64E-06	2.60E-08	1.16E-12	4.04E-07	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0				
Acetona	D	4.63E-07	3.66E-06	2.56E-08	7.44E-02	1.00E-01				0.0	0.0	0.7				
Diclorometano	B	1.83E-07	8.12E-07	7.23E-14	5.11E-04	6.00E-02		7.50E-03	1.65E-03	0.0	0.0	0.0	7.E-09	1.E-16	4.E-06	
Acetaldehído	D	1.17E-05	9.28E-06	1.39E-07	2.60E-04	6.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Acetofenón	D	4.23E-06	3.34E-06	1.28E-08	1.68E-04	4.00E-03				0.0	0.0	0.0				
Antraceno	D	5.05E-05	3.99E-05	2.57E-07	3.60E-04	3.00E-01				0.0	0.0	0.0				
Benzo(a)antraceno	B2	4.36E-06	3.45E-06	1.93E-10	3.16E-07		2.86E-01	7.30E-01	3.00E-01	0.0	0.0	0.0	6.E-06	6.E-11	2.E-07	
Benzo(b)fluoranteno	B2	3.74E-06	2.96E-06	1.78E-09	6.81E-07		1.00E-01	7.30E-02	3.00E-02	0.0	0.0	0.0	5.E-07	5.E-11	5.E-08	
Benzo(g)perileno	D	7.50E-06	5.92E-06	3.36E-10	4.68E-07	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Benzo(a)pireno	B2	8.81E-07	6.96E-07	2.43E-11	1.60E-08		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00	0.0	0.0	0.0	1.E-05	2.E-10	1.E-07	
Criseno	B2	7.05E-06	5.57E-06	2.94E-10	3.52E-06			1.15E+00	1.15E+00	0.0	0.0	0.0	1.E-05	3.E-10	4.E-06	
Dibenz(a,h)antraceno	B2	7.72E-07	6.10E-07	1.06E-11	2.34E-08		1.14E-01	7.30E+00		0.0	0.0	0.0	1.E-05		2.E-07	
Fluoranteno	D	2.28E-05	1.80E-05	1.91E-07	6.00E-05	4.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Fluoreno	D	1.41E-05	1.11E-05	3.33E-08	1.93E-04	4.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	1.19E-06	9.41E-07	4.15E-12	7.44E-08		3.14E-01	7.30E-01	3.00E-01	0.0	0.0	0.0	2.E-06	1.E-12	5.E-08	
Naftaleno	D	1.59E-05	1.25E-05	1.34E-07	7.90E-04	2.00E-02		8.57E-04		0.0	0.0	0.0				
Feoantreno	D	4.90E-05	3.87E-05	6.66E-08	3.50E-04	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Pireno	D	4.31E-05	3.40E-05	1.11E-08	1.13E-04	3.00E-02				0.0	0.0	0.0				
Benzeno	A	1.09E-08	8.61E-08	1.83E-09	1.14E-05	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02	0.0	0.0	0.0	3.E-09	5.E-11	3.E-07	
Tolueno	D	5.19E-08	4.10E-07	7.34E-09	1.65E-05	2.00E-01	1.14E-01			0.0	0.0	0.0				
Etilbenzeno	D	6.71E-07	5.30E-06	6.41E-08	6.02E-05	1.00E-01	2.86E-01			0.0	0.0	0.0				
Xileno	D	2.28E-06	1.80E-05	2.21E-07	9.00E-04	2.00E+00	8.57E-02			0.0	0.0	0.0				
SUMA											0.0	0.0	0.9	4.E-05	7.E-10	9.E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CPI	CPAGUA	R0	R R1	RAGUA
		ING	DER	INH	AG	RFD0	RFDI	SF0	SF1						
Bario	D	1.18E-06	1.87E-08	8.33E-13	2.91E-07	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Acetona	D	3.33E-07	2.63E-06	1.84E-08	5.36E-02	1.00E-01				0.0		0.5			
Diclorometano	B	2.47E-09	1.95E-08	1.74E-15	1.23E-05	6.00E-02		7.50E-03	1.65E-03	0.0		0.0	2.E-10	3.E-18	9.E-08
Acenafteño	D	8.45E-06	6.68E-06	9.98E-08	1.87E-04	6.00E-02				0.0		0.0			
Acenafteño	D	3.04E-06	2.40E-06	9.24E-09	1.21E-04	4.00E-03				0.0		0.0			
Antraceno	D	3.64E-05	2.87E-05	1.85E-07	2.59E-04	3.00E-01				0.0		0.0			
Benzo(a)antraceno	B2	1.05E-07	8.27E-08	4.64E-12	7.58E-09		2.86E-01	7.30E-01	3.08E-01		0.0		1.E-07	1.E-12	6.E-09
Benzo(k)fluoranteno	B2	8.99E-08	7.10E-08	4.27E-11	1.63E-08		1.00E-01	7.30E-02	3.08E-02		0.0		1.E-08	1.E-12	1.E-09
Benzo(g)perileno	D	5.40E-06	4.26E-06	2.42E-10	3.37E-07	3.00E-02				0.0		0.0			
Benzo(a)pireno	B2	2.11E-08	1.67E-08	5.84E-13	3.84E-10		3.14E+00	7.30E+00	7.32E+00		0.0		3.E-07	4.E-12	3.E-09
Craeno	B2	1.69E-07	1.34E-07	7.06E-12	8.45E-08			1.15E+00	1.15E+00		0.0		3.E-07	8.E-12	1.E-07
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	1.85E-08	1.46E-08	2.55E-13	5.61E-10		1.14E-01	7.30E+00			0.0		2.E-07		4.E-09
Fluoreno	D	1.64E-05	1.30E-05	1.38E-07	4.32E-05	4.00E-02				0.0		0.0			
Fluoreno	D	1.01E-05	8.01E-06	2.40E-08	1.39E-04	4.00E-02				0.0		0.0			
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2.86E-08	2.26E-08	9.95E-14	1.79E-09		3.14E-01	7.30E-01	3.08E-01		0.0		4.E-08	3.E-14	1.E-09
Naftaleno	D	1.14E-05	9.02E-06	9.67E-08	5.69E-04	2.00E-02	8.57E-04			0.0	0.0	0.0			
Fenastreno	D	3.53E-05	2.79E-05	4.80E-08	2.52E-04	3.00E-02				0.0		0.0			
Pireno	D	3.10E-05	2.45E-05	7.98E-09	8.16E-05	3.00E-02				0.0		0.0			
Benceno	A	2.62E-10	2.07E-09	4.38E-11	2.73E-07	3.00E-03	1.70E-03	2.90E-02	2.90E-02	0.0	0.0	0.0	7.E-11	1.E-12	8.E-09
Tolueno	D	3.73E-08	2.95E-07	5.29E-09	1.19E-05	2.00E-01	1.14E-01			0.0	0.0	0.0			
Etilbenceno	D	4.83E-07	3.82E-06	4.61E-08	4.34E-05	1.00E-01	2.86E-01			0.0	0.0	0.0			
Xileno	D	1.64E-06	1.30E-05	1.59E-07	6.48E-04	2.00E+00	8.57E-02			0.0	0.0	0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.6	1.E-06	2.E-11	2.E-07

A2.4. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de ejes y ruedas

En la página A41 se presentan los datos empleados para la evaluación de riesgo en la zona de ejes y ruedas, en las páginas A42 – A45 los cálculos de dosis de exposición en esta zona para diferentes usos de suelo (residencial, comercial/industrial y trabajadores de la construcción) y diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de partículas y vapores, contacto dérmico e ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados provenientes del suelo afectado).

En la página A46, se muestran los cálculos de riesgo y cocientes de peligrosidad para los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición.

ZONA DE EJES Y RUEDAS

$$Faj = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}}$$

Parámetros de exposición

	SUELO		INHALACIÓN		DÉRMICO		AGUA	
	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS
TC	0.0002	0.0001	20	20	1	1	2	2
DE	6	30	6	30	6	30	6	30
PC	15	70	15	70	15	70	15	70
Faj	0.000122857		16.57142857		0.828571429		1.657142857	

FE1	350
FE2	250
FE3	180

TMcancerígenos	25550
TMnocancerígenos	10950
TMnocancerígenosCO	365

DE in	30
DE tc	1

TCsuelo	0.0001
TCaire	20
TCagua	2

PC	70
----	----

A	3160
AD	0.5
ABP	0.001
MS	1

Parámetros fisicoquímicos de los compuestos

Sustancia	Clase	Concentració	FV res	FV com	FEP	ABP	FL
Arsénico	A	2	0	0	3.89712E-12	0.001	1.74404E-05
Bario	D	101	0	0	3.89712E-12	0.001	1.22936E-05
Cromo	A	8	0	0	3.89712E-12	0.001	2.60896E-05
Plomo	B2	8	0	0	3.89712E-12	0.001	

USO DE SUELO RESIDENCIAL**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj}}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	DExp
Arsénico	A	2	350	0.000122857	25550	3.36595E-06
Bario	D	101	350	0.000122857	10950	0.000396621
Cromo	A	8	350	0.000122857	25550	1.34638E-05
Plomo	B2	8	350	0.000122857	25550	1.34638E-05

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	0.0001	250	30	70	25550	8.38692E-07
Bario	D	101	0.0001	250	30	70	10950	9.88258E-05
Cromo	A	8	0.0001	250	30	70	25550	3.35477E-06
Plomo	B2	8	0.0001	250	30	70	25550	3.35477E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	0.0001	180	1	70	25550	2.01286E-08
Bario	D	101	0.0001	180	1	70	365	7.11546E-05
Cromo	A	8	0.0001	180	1	70	25550	8.05144E-08
Plomo	B2	8	0.0001	180	1	70	25550	8.05144E-08

USO DE SUELO RESIDENCIAL**INHALACIÓN**

$$DExp_{in} = \frac{C \times FE \times F_{aj, inhalación} \times (FV + FEP)}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	FV	FEP	TM	DExp
Arsénico	A	2	350	16.57142857	0	3.89712E-12	25550	1.76934E-12
Bario	D	101	350	16.57142857	0	3.89712E-12	10950	2.08487E-10
Cromo	A	8	350	16.57142857	0	3.89712E-12	25550	7.07735E-12
Plomo	B2	8	350	16.57142857	0	3.89712E-12	25550	7.07735E-12

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**INHALACIÓN**

$$DExp_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	20	250	30	0	3.89712E-12	70	25550	6.53696E-13
Bario	D	101	20	250	30	0	3.89712E-12	70	10950	7.70272E-11
Cromo	A	8	20	250	30	0	3.89712E-12	70	25550	2.61479E-12
Plomo	B2	8	20	250	30	0	3.89712E-12	70	25550	2.61479E-12

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN**INHALACIÓN**

$$DExp_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	20	180	1	0	3.89712E-12	70	25550	1.56887E-14
Bario	D	101	20	180	1	0	3.89712E-12	70	365	5.54596E-11
Cromo	A	8	20	180	1	0	3.89712E-12	70	25550	6.27549E-14
Plomo	B2	8	20	180	1	0	3.89712E-12	70	25550	6.27549E-14

USO DE SUELO RESIDENCIAL**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{ajd\acute{e}rmo}}{TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	Faj	TM	DExp
Arsénico	A	2	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	3.58669E-08
Bario	D	101	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	10950	4.22632E-06
Cromo	A	8	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	1.43468E-07
Plomo	B2	8	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	1.43468E-07

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	1.32513E-08
Bario	D	101	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	10950	1.56145E-06
Cromo	A	8	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	5.30053E-08
Plomo	B2	8	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	5.30053E-08

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentración	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	2	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	3.18032E-10
Bario	D	101	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	365	1.12424E-06
Cromo	A	8	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	1.27213E-09
Plomo	B2	8	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	1.27213E-09

USO DE SUELO RESIDENCIAL**LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA**

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times Faj_{\text{agua}}}{TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	FL	DExp
Arsénico	A	2	350	1.657142857	25550	1.74404E-05	7.91814E-07
Bario	D	101	350	1.657142857	10950	1.22936E-05	6.57681E-05
Cromo	A	8	350	1.657142857	25550	2.60896E-05	4.738E-06
Plomo	B2	8	350	1.657142857	25550	0	0

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA**

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Arsénico	A	2	250	30	2	70	25550	1.74404E-05	2.92542E-07
Bario	D	101	250	30	2	70	10950	1.22936E-05	2.42985E-05
Cromo	A	8	250	30	2	70	25550	2.60896E-05	1.75049E-06
Plomo	B2	8	250	30	2	70	25550	0	0

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN**LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA**

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Arsénico	A	2	180	1	2	70	25550	1.74404E-05	7.02101E-09
Bario	D	101	180	1	2	70	365	1.22936E-05	1.7495E-05
Cromo	A	8	180	1	2	70	25550	2.60896E-05	4.20118E-08
Plomo	B2	8	180	1	2	70	25550	0	0

EJES Y RUEDAS

USO DE SUELO RESIDENCIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP			R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	FP0	FP1	CP0	CPI	CPAGUA	R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	3.37E-06	3.59E-08	1.77E-12	7.92E-07	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	5.E-06	3.E-11	1.E-06
Bario	D	3.97E-04	4.23E-06	2.08E-10	6.58E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	1.35E-05	1.43E-07	7.08E-12	4.74E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	1.E-07	3.E-10	3.E-08
Ploomo	B2	1.35E-05	1.43E-07	7.08E-12	0.00E+00										
SUMA										0.0	0.0	0.0	5.E-06	3.E-10	1.E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP			R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	FP0	FP1	CP0	CPI	CPAGUA	R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	8.39E-07	1.33E-08	6.54E-13	2.93E-07	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	1.E-06	1.E-11	4.E-07
Bario	D	9.88E-05	1.56E-06	7.70E-11	2.43E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	3.35E-06	5.30E-08	2.61E-12	1.75E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	2.E-08	1.E-10	1.E-08
Ploomo	B2	3.35E-06	5.30E-08	2.61E-12	0.00E+00										
SUMA										0.0	0.0	0.0	1.E-06	1.E-10	5.E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP			R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	FP0	FP1	CP0	CPI	CPAGUA	R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	2.01E-08	3.18E-10	1.57E-14	7.02E-09	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	3.E-08	2.E-13	1.E-08
Bario	D	7.12E-05	1.12E-06	5.55E-11	1.75E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	8.05E-08	1.27E-09	6.28E-14	4.20E-08	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	6.E-10	3.E-12	3.E-10
Ploomo	B2	8.05E-08	1.27E-09	6.28E-14	0.00E+00										
SUMA										0.0	0.0	0.0	3.E-08	3.E-12	1.E-08

A2.5. Cálculos de dosis de exposición, cociente de peligrosidad y riesgo en la zona de pailería

En la página A48 se presentan los datos empleados para la evaluación de riesgo en la zona de pailería, en las páginas A49 – A52 los cálculos de dosis de exposición en esta zona para diferentes usos de suelo (residencial, comercial/industrial y trabajadores de la construcción) y diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de partículas y vapores, contacto dérmico e ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados provenientes del suelo afectado).

En la página A53, se muestran los cálculos de riesgo y cocientes de peligrosidad para los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición.

ZONA DE PAILERÍA

$$Faj = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}}$$

	SUELO		INHALACIÓN		DÉRMICO		AGUA		
	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	
TC	0.0002	0.0001		20	20	1	1	2	2
DE	6	30		6	30	6	30	6	30
PC	15	70		15	70	15	70	15	70
Faj	0.000122857		16.57142857		0.828571429		1.657142857		

FE1	350	TMcancerigenos	25550
FE2	250	TMnocancerigenos	10950
FE3	180	TMnocancerigenosCO	365

TCsuelo	0.0001
TCaire	20
TCagua	2

A	3160
AD	0.5
ABP	0.001
MS	1

DE in	30
DE tc	1

PC	70
----	----

Sustancia	Clase	Concentración	FV	FEP	ABP	FL
Bario	D	171	0	3.04152E-12	0.001	1.22936E-05
Cadmio	B1	3	0	3.04152E-12	0.001	6.67858E-06
Cromo	A	4	0	3.04152E-12	0.001	2.60896E-05

USO DE SUELO RESIDENCIAL**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj}}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	DExp
Bario	D	171	350	0.000122857	10950	0.000671507
Cadmio	B1	3	350	0.000122857	25550	5.04892E-06
Cromo	A	4	350	0.000122857	25550	6.7319E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	171	0.0001	250	30	70	10950	0.000167319
Cadmio	B1	3	0.0001	250	30	70	25550	1.25804E-06
Cromo	A	4	0.0001	250	30	70	25550	1.67738E-06

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN**INGESTIÓN DE SUELO**

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	171	0.0001	180	1	70	365	0.00012047
Cadmio	B1	3	0.0001	180	1	70	25550	3.01929E-08
Cromo	A	4	0.0001	180	1	70	25550	4.02572E-08

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INHALACIÓN

$$D_{Exp\ in} = \frac{C \times FE \times F_{ajinhalaci\ on} \times (FV + FEP)}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	FV	FEP	TM	DExp
Bario	D	171	350	16.57142857	0	3.04152E-12	10950	2.75487E-10
Cadmio	B1	3	350	16.57142857	0	3.04152E-12	25550	2.07133E-12
Cromo	A	4	350	16.57142857	0	3.04152E-12	25550	2.76177E-12

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INHALACIÓN

$$D_{Exp\ in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Bario	D	171	20	250	30	0	3.04152E-12	70	10950	1.01781E-10
Cadmio	B1	3	20	250	30	0	3.04152E-12	70	25550	7.65269E-13
Cromo	A	4	20	250	30	0	3.04152E-12	70	25550	1.02036E-12

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INHALACIÓN

$$D_{Exp\ in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Bario	D	171	20	180	1	0	3.04152E-12	70	365	7.32822E-11
Cadmio	B1	3	20	180	1	0	3.04152E-12	70	25550	1.83665E-14
Cromo	A	4	20	180	1	0	3.04152E-12	70	25550	2.44886E-14

USO DE SUELO RESIDENCIAL**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{ajd\acute{e}rmico}}{TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	Faj	TM	DExp
Bario	D	171	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	10950	7.15545E-06
Cadmio	B1	3	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	5.38004E-08
Cromo	A	4	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	7.17339E-08

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	171	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	10950	2.64364E-06
Cadmio	B1	3	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	1.9877E-08
Cromo	A	4	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	2.65027E-08

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCI3N**CONTACTO DÉRMICO**

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DExp
Bario	D	171	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	365	1.90342E-06
Cadmio	B1	3	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	4.77048E-10
Cromo	A	4	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	6.36064E-10

USO DE SUELO RESIDENCIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times Faj_{\text{agua}}}{TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	FL	DExp
Bario	D	171	350	1.657142857	10950	1.22936E-05	0.00011135
Cadmio	B1	3	350	1.657142857	25550	6.67858E-06	4.54823E-07
Cromo	A	4	350	1.657142857	25550	2.60896E-05	2.369E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Bario	D	171	250	30	2	70	10950	1.22936E-05	4.11391E-05
Cadmio	B1	3	250	30	2	70	25550	6.67858E-06	1.68038E-07
Cromo	A	4	250	30	2	70	25550	2.60896E-05	8.75246E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Bario	D	171	180	1	2	70	365	1.22936E-05	2.96202E-05
Cadmio	B1	3	180	1	2	70	25550	6.67858E-06	4.03291E-09
Cromo	A	4	180	1	2	70	25550	2.60896E-05	2.10059E-08

USO DE SUELO RESIDENCIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	RfD0	RfD1	SF0	SF1				R0	R1	RAGUA
Bario	D	6.72E-04	7.16E-06	2.75E-10	1.11E-04	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cadmio	B1	5.05E-06	5.38E-08	2.07E-12	4.55E-07	5.00E-04	6.29E+00		6.30E+00	0.0	0.0	0.0		1 E-11	
Cromo	A	6.73E-06	7.17E-08	2.76E-12	2.37E-06	3.00E-03	4.29E-05	0.0073	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	5 E-08	1 E-10	2 E-08
SUMA										0.0	0.0	0.0	5 E-08	1 E-10	2 E-08

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	RfD0	RfD1	SF0	SF1				R0	R1	RAGUA
Bario	D	1.67E-04	2.64E-06	1.02E-10	4.11E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cadmio	B1	1.26E-06	1.99E-08	7.65E-13	1.68E-07	5.00E-04	6.29E+00		6.30E+00	0.0	0.0	0.0		5 E-12	
Cromo	A	1.68E-06	2.65E-08	1.02E-12	8.75E-07	3.00E-03	4.29E-05	0.0073	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	1 E-08	4 E-11	6 E-09
SUMA										0.0	0.0	0.0	1 E-08	5 E-11	6 E-09

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sustancia	Clase	DOSIS DE EXPOSICIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	RfD0	RfD1	SF0	SF1				R0	R1	RAGUA
Bario	D	1.20E-04	1.90E-06	7.33E-11	2.96E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cadmio	B1	3.02E-08	4.77E-10	1.84E-14	4.03E-09	5.00E-04	6.29E+00		6.30E+00	0.0	0.0	0.0		1 E-13	
Cromo	A	4.03E-08	6.36E-10	2.45E-14	2.10E-08	3.00E-03	4.29E-05	0.0073	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	3 E-10	1 E-12	2 E-10
SUMA										0.0	0.0	0.0	3 E-10	1 E-12	2 E-10

A2.6. Cálculos de ingestión, índice de peligrosidad y riesgo en la zona de pintura, báscula y estensilado

En la página A55 se presentan los datos empleados para la evaluación de riesgo en la zona de pintura, báscula y estensilado; y en las páginas A56 – A59 los cálculos de dosis de exposición en esta zona para diferentes usos de suelo (residencial, comercial/industrial y trabajadores de la construcción) y diferentes vías de exposición (ingestión de suelo, inhalación de partículas y vapores, contacto dérmico e ingestión de agua subterránea contaminada por lixiviados provenientes del suelo afectado).

En la página A60, se muestran los cálculos de riesgo y cocientes de peligrosidad para los diferentes usos de suelo y las diferentes vías de exposición.

ZONA DE PINTURA, BÁSCULA Y ESTENSILADO

$$Faj = TC_{niños} \times \frac{DE_{niños}}{PC_{niños}} + TC_{adultos} \times \frac{DE_{adultos}}{PC_{adultos}}$$

Parámetros de exposición

	SUELO		INHALACIÓN		DÉRMICO		AGUA		
	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	NIÑOS	ADULTOS	
TC	0.0002	0.0001		20	20	1	1	2	2
DE	6	30		6	30	6	30	6	30
PC	15	70		15	70	15	70	15	70
Faj	0.000122857		16.57142857		0.828571429		1.657142857		

FE1	350
FE2	250
FE3	180

TMcancerigenos	25550
TMnocancerigenos	10950
TMnocancerigenosCO	365

TCsuelo	0.0001
TCaire	20
TCagua	2

A	3160
AD	0.5
ABP	0.001
MS	1

DE in	30
DE tc	1

PC	70
----	----

Parámetros fisicoquímicos de los compuestos

Sustancia	Clase	Concentración	FV res	FV com	FEP	ABP	FL
Arsénico	A	3	0	0	5.08806E-12	0.001	1.74404E-05
Bario	D	287	0	0	5.08806E-12	0.001	1.22936E-05
Cromo	A	10	0	0	5.08806E-12	0.001	2.60896E-05
Plomo	B2	9	0	0	5.08806E-12	0.001	
Acetona	D	0.121	3.29856E-07	3.61415E-07	5.08806E-12	0.5	0.409132696

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times FE \times F_{aj}}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	DExp
Arsénico	A	3	350	0.000122857	25550	5.04892E-06
Bario	D	287	350	0.000122857	10950	0.001127032
Cromo	A	10	350	0.000122857	25550	1.68297E-05
Plomo	B2	9	350	0.000122857	25550	1.51468E-05
Acetona	D	0.121	350	0.000122857	10950	4.7516E-07

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	3	0.0001	250	30	70	25550	1.25804E-06
Bario	D	287	0.0001	250	30	70	10950	0.000280822
Cromo	A	10	0.0001	250	30	70	25550	4.19346E-06
Plomo	B2	9	0.0001	250	30	70	25550	3.77411E-06
Acetona	D	0.121	0.0001	250	30	70	10950	1.18395E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INGESTIÓN DE SUELO

$$D_{Exp} = \frac{C \times TC \times FE \times DE}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	PC	TM	DExp
Arsénico	A	3	0.0001	180	1	70	25550	3.01929E-08
Bario	D	287	0.0001	180	1	70	365	0.000202192
Cromo	A	10	0.0001	180	1	70	25550	1.00643E-07
Plomo	B2	9	0.0001	180	1	70	25550	9.05787E-08
Acetona	D	0.121	0.0001	180	1	70	365	8.52446E-08

USO DE SUELO RESIDENCIAL

INHALACIÓN

$$DExp_{in} = \frac{C \times FE \times F_{inhalación} \times (FV + FEP)}{TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	FV	FEP	TM	DExp
Arsénico	A	3	350	16.57142857	0	5.08806E-12	25550	3.46506E-12
Bario	D	287	350	16.57142857	0	5.08806E-12	10950	7.73478E-10
Cromo	A	10	350	16.57142857	0	5.08806E-12	25550	1.15502E-11
Plomo	B2	9	350	16.57142857	0	5.08806E-12	25550	1.03952E-11
Acetona	D	0.121	350	16.57142857	3.29856E-07	5.08806E-12	10950	2.11412E-08

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

INHALACIÓN

$$DExp_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Arsénico	A	3	20	250	30	0	5.08806E-12	70	25550	1.28019E-12
Bario	D	287	20	250	30	0	5.08806E-12	70	10950	2.85768E-10
Cromo	A	10	20	250	30	0	5.08806E-12	70	25550	4.26731E-12
Plomo	B2	9	20	250	30	0	5.08806E-12	70	25550	3.84058E-12
Acetona	D	0.121	20	250	30	3.61415E-07	5.08806E-12	70	10950	8.5581E-09

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

INHALACIÓN

$$DExp_{in} = \frac{C \times TC \times FE \times DE \times (FV + FEP)}{PC \times TM}$$

Sustancia	Clase	Concentración	TC	FE	DE	FV	FEP	PC	TM	DExp
Arsénico	A	3	20	180	1	0	5.08806E-12	70	25550	3.07247E-14
Bario	D	287	20	180	1	0	5.08806E-12	70	365	2.05753E-10
Cromo	A	10	20	180	1	0	5.08806E-12	70	25550	1.02416E-13
Plomo	B2	9	20	180	1	0	5.08806E-12	70	25550	9.2174E-14
Acetona	D	0.121	20	180	1	3.61415E-07	5.08806E-12	70	365	6.16183E-09

USO DE SUELO RESIDENCIAL

CONTACTO DÉRMICO

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times F_{aj\acute{d}rmo.}}{TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	Faj	TM	DEsp
Arsénico	A	3	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	5.38004E-08
Bario	D	287	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	10950	1.20094E-05
Cromo	A	10	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	1.79335E-07
Plomo	B2	9	3160	0.5	0.001	1	350	0.828571429	25550	1.61401E-07
Acetona	D	0.121	3160	0.5	0.5	1	350	0.828571429	10950	2.53161E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

CONTACTO DÉRMICO

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DEsp
Arsénico	A	3	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	1.9877E-08
Bario	D	287	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	10950	4.43699E-06
Cromo	A	10	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	6.62566E-08
Plomo	B2	9	3160	0.5	0.001	1	250	30	70	25550	5.9631E-08
Acetona	D	0.121	3160	0.5	0.5	1	250	30	70	10950	9.35323E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCI3N

CONTACTO DÉRMICO

$$DExp_{CD} = \frac{C \times A \times AD \times ABP \times MS \times FE \times DE}{PC \times TM} \times 10^{-6}$$

Sustancia	Clase	Concentraci3n	A	AD	ABP	MS	FE	DE	PC	TM	DEsp
Arsénico	A	3	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	4.77048E-10
Bario	D	287	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	365	3.19463E-06
Cromo	A	10	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	1.59016E-09
Plomo	B2	9	3160	0.5	0.001	1	180	1	70	25550	1.43114E-09
Acetona	D	0.121	3160	0.5	0.5	1	180	1	70	365	6.73432E-07

USO DE SUELO RESIDENCIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times Faj_{\text{agua}}}{TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	Faj	TM	FL	DExp
Arsénico	A	3	350	1.657142857	25550	1.74404E-05	1.18772E-06
Bario	D	287	350	1.657142857	10950	1.22936E-05	0.000186885
Cromo	A	10	350	1.657142857	25550	2.60896E-05	5.9225E-06
Plomo	B2	9	350	1.657142857	25550	0	0
Acetona	D	0.121	350	1.657142857	10950	0.409132696	0.002622186

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Arsénico	A	3	250	30	2	70	25550	1.74404E-05	4.38813E-07
Bario	D	287	250	30	2	70	10950	1.22936E-05	6.90464E-05
Cromo	A	10	250	30	2	70	25550	2.60896E-05	2.18812E-06
Plomo	B2	9	250	30	2	70	25550	0	0
Acetona	D	0.121	250	30	2	70	10950	0.409132696	0.000968788

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

LIXIVIACIÓN DEL SUELO AL AGUA SUBTERRÁNEA

$$DExp_{\text{agua}} = \frac{C \times FE \times DE \times TC}{PC \times TM} \times FL$$

Sustancia	Clase	Concentración	FE	DE	TC	PC	TM	FL	DExp
Arsénico	A	3	180	1	2	70	25550	1.74404E-05	1.05315E-08
Bario	D	287	180	1	2	70	365	1.22936E-05	4.97134E-05
Cromo	A	10	180	1	2	70	25550	2.60896E-05	5.25148E-08
Plomo	B2	9	180	1	2	70	25550	0	0
Acetona	D	0.121	180	1	2	70	365	0.409132696	0.000697527

PINTURA, BASC Y EST

USO DE SUELO RESIDENCIAL

Sustancia	Clase	INGESTIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	SP0	SF1				R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	5.05E-06	5.38E-08	3.47E-12	1.19E-06	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	8.E-06	5.E-11	2.E-06
Bario	D	1.13E-03	1.20E-05	7.73E-10	1.87E-04	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	1.68E-05	1.79E-07	1.16E-11	5.92E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	1.E-07	5.E-10	4.E-08
Plomo	B2	1.51E-05	1.61E-07	1.04E-11	0.00E+00										
Acetona	D	4.75E-07	2.53E-06	2.11E-08	2.62E-03	1.00E-01				0.0		0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.0	8.E-06	5.E-10	2.E-06

USO DE SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL

Sustancia	Clase	INGESTIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	SP0	SF1				R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	1.26E-06	1.99E-08	1.28E-12	4.39E-07	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	2.E-06	2.E-11	7.E-07
Bario	D	2.81E-04	4.44E-06	2.86E-10	6.90E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	4.19E-06	6.63E-08	4.27E-12	2.19E-06	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	3.E-08	2.E-10	2.E-08
Plomo	B2	3.77E-06	5.96E-08	3.84E-12	0.00E+00										
Acetona	D	1.18E-07	9.35E-07	8.56E-09	9.69E-04	1.00E-01				0.0		0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.0	2.E-06	2.E-10	7.E-07

TRABAJADOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sustancia	Clase	INGESTIÓN				DATOS				CP0	CP CP1	CPAGUA	R		
		ING	DER	INH	AG	R/D0	R/D1	SP0	SF1				R0	R1	RAGUA
Arsénico	A	3.02E-08	4.77E-10	3.07E-14	1.05E-08	3.00E-04		1.50E+00	1.51E+01	0.0		0.0	5.E-08	5.E-13	2.E-08
Bario	D	2.02E-04	3.19E-06	2.06E-10	4.97E-05	7.00E-02	1.40E-04			0.0	0.0	0.0			
Cromo	A	1.01E-07	1.59E-09	1.02E-13	5.25E-08	3.00E-03	4.29E-05	7.30E-03	4.20E+01	0.0	0.0	0.0	7.E-10	4.E-12	4.E-10
Plomo	B2	9.06E-08	1.43E-09	9.22E-14	0.00E+00										
Acetona	D	8.52E-08	6.73E-07	6.16E-09	6.98E-04	1.00E-01				0.0		0.0			
SUMA										0.0	0.0	0.0	5.E-08	5.E-12	2.E-08

Apéndice 3

CRITERIOS DE LIMPIEZA OBTENIDOS COMPARADOS CON CRITERIOS NACIONALES E INTERNACIONALES

En este apéndice se presentan tablas con los criterios obtenidos y con los criterios nacionales e internacionales.

Tabla A3.1 Criterios obtenidos y criterios interinos

Sustancia	Zona	Niveles de limpieza obtenidos con base en riesgo a la salud y uso de suelo (mg/kg)			a
		Residencial	Com/ind	Constructor	
Arsénico	Abasto	3.92E-01	1.57E+00	6.52E+01	200 ¹ 100 ² 1,500 ³
	Ejes	3.92E-01	1.57E+00	6.52E+01	
	Pintura	3.92E-01	1.57E+00	6.52E+01	
Bario	Abasto	1.76E+04	7.04E+04	9.78E+04	750 ¹ 150 ² 1,500 ³
	Chapopote	4.11E+04	1.64E+05	6.84E+06	
	Ejes	1.76E+04	7.04E+04	9.78E+04	
	Pailería	1.76E+04	7.04E+04	9.78E+04	
Cadmio	Pailería	2.94E+02	1.17E+03	4.89E+04	20 ¹ 20 ² 100 ³
Cromo	Abasto	8.02E+01	3.20E+02	1.33E+04	375 ¹ 75 ² 750 ³
	Ejes	8.03E+01	3.20E+02	1.33E+04	
	Pailería	8.03E+01	3.20E+02	1.34E+04	
	Pintura	8.02E+01	3.20E+02	1.33E+04	
Plomo					200 ¹ 100 ² 1,500 ³
Acetona	Abasto	4.61E+00	1.25E+01	1.73E+01	
	Chapopote	5.48E-01	1.48E+00	6.18E+01	
	Pintura	9.23E+00	1.25E+01	1.73E+01	
Diclorometano	Chapopote	2.36E-02	6.39E-02	2.66E+00	
Acenafteno	Abasto	1.02E+03	2.77E+03	3.84E+03	
	Chapopote	2.38E+03	6.45E+03	2.69E+05	
Acenaftileno	Chapopote	8.85E+01	2.39E+02	9.98E+03	
Antraceno	Abasto	1.59E+04	4.30E+04	5.97E+04	
	Chapopote	3.70E+04	1.00E+05	4.18E+06	
Benzo(a) antraceno	Abasto	5.31E-01	1.82E+00	7.60E+01	0.80 ¹
	Chapopote	5.31E-01	1.82E+00	7.60E+01	0.80 ² 8.0 ³

a) (PROFEPA, 1999; 2000); ¹ suelo de uso residencial y comercial; ² suelo de uso agrícola, forestal, recreativo y de conservación; ³ suelo de uso industrial

Tabla A3.1 (Continuación)

Sustancia	Zona	Niveles de limpieza obtenidos con base en riesgo a la salud y uso de suelo (mg/kg)			a
		Residencial	Com/ind	Constructor	
Benzo(b) fluoranteno	Abasto	5.31E-01	1.82E+00	7.60E+01	0.80 ¹ 0.80 ² 8.0 ³
Benzo(k) fluoranteno	Abasto	5.31E+00	1.82E+01	7.60E+02	8.0 ¹ 8.0 ² 80.0 ³
	Chapopote	5.31E+00	1.82E+01	7.60E+02	
Benzo(ghi) perileno	Chapopote	1.16E+04	4.00E+04	1.67E+06	
Benzo(a) pireno	Abasto	5.31E-02	1.82E-01	7.60E+00	0.08 ¹ 0.08 ² 0.8 ³
	Chapopote	5.31E-02	1.82E-01	7.60E+00	
Criseno	Abasto	3.37E-01	1.16E+00	4.83E+01	80 ¹ 80 ² 800 ³
	Chapopote	3.37E-01	1.16E+00	4.83E+01	
Fluoranteno	Abasto	5.74E+03	1.55E+04	2.16E+04	
	Chapopote	1.34E+04	3.63E+04	1.51E+06	
Fluoreno	Abasto	1.10E+03	2.99E+03	4.15E+03	
	Chapopote	2.58E+03	6.97E+03	2.91E+05	
Indeno (1,2,3-cd)pireno	Chapopote	5.31E-01	1.82E+00	7.60E+01	
Naftaleno	Abasto	1.51E+02	4.10E+02	5.69E+02	
	Chapopote	3.53E+02	9.56E+02	3.99E+04	
Fenantreno	Abasto	1.59E+03	4.30E+03	5.97E+03	
	Chapopote	3.70E+03	1.00E+04	4.18E+05	
Pireno	Abasto	4.31E+03	1.17E+04	1.62E+04	
	Chapopote	1.00E+04	2.72E+04	1.13E+06	
Benceno	Abasto	2.91E-02	7.89E-02	3.29E+00	20 ¹ 20 ² 50 ³
	Chapopote	2.91E-02	7.89E-02	3.29E+00	
Tolueno	Abasto	2.37E+02	6.41E+02	8.90E+02	40 ¹ 40 ² 100 ³
	Chapopote	5.52E+02	1.50E+03	6.23E+04	
Etilbenceno	Abasto	4.21E+02	1.14E+03	1.58E+03	
	Chapopote	9.82E+02	2.66E+03	1.11E+05	
Xileno	Abasto	1.91E+03	5.18E+03	7.19E+03	40 ¹ 40 ² 100 ³
	Chapopote	4.46E+03	1.21E+04	5.03E+05	

a) (PROFEPA, 1999; 2000); ¹ suelo de uso residencial y comercial; ² suelo de uso agrícola, forestal, recreativo y de conservación; ³ suelo de uso industrial

CRITERIOS DE LIMPIEZA OBTENIDOS COMPARADOS CON CRITERIOS NACIONALES E INTERNACIONALES

Tabla A3.2. Criterios de limpieza de referencias bibliográficas

Sustancia	Niveles de limpieza (mg/kg)				
	b	c	d	e	f
Arsénico	80		0.4 ¹ 380 ²	0.38 ¹ 2.4 ²	7.2 / <0.1-97
Bario	4000		5500 ¹ 350000 ²	5300 ¹ 100000 ²	580 / 10-5000
Cadmio	40		39 ¹ 920 ²	38 ¹ 850 ²	0.06 / 0.01-0.37
Cromo	400		390 ¹	30 ¹ 64 ²	54 / 1.0-2000
Plomo			400 ¹	400 ¹ 1000 ²	19 / <10-700
Acetona				2000 ¹ 8400 ²	
Diclorometano					
Acenafteno			47000 ¹	360 ¹ 360 ²	
Acenaftileno					
Antraceno			23000 ¹	19 ¹ 19 ²	
Benzo(a)antraceno		1E-4	0.9 ¹	0.61 ¹ 2.6 ²	
Benzo(b)fluoranteno			0.9 ¹	0.61 ¹ 2.6 ²	
Benzo(k)fluoranteno			9 ¹	6.1 ¹ 26 ²	
Benzo(ghi)perileno					
Benzo(a)pireno			0.09 ¹	0.061 ¹ 0.26 ²	
Criseno			88 ¹	24 ¹ 24 ²	
Fluoranteno			3100 ¹	2600 ¹ 27000 ²	
Fluoreno			3100 ¹	300 ¹ 300 ²	
Indeno(1,2,3-cd)pireno			0.9 ¹	0.61 ¹ 2.6 ²	
Naftaleno		10	3100 ¹	800 ¹ 800 ²	
Fenantreno					
Pireno			2300 ¹	2000 ¹ 20000 ²	
Benceno		0.005	22 ¹ 0.5 ²	1.4 ¹ 3.2 ²	
Tolueno	20000	10	16000 ¹ 520 ²	1900 ¹ 2800 ²	
Etilbenceno	8000		7800 ¹ 260 ²	690 ¹ 690 ²	
Xileno	200000		160000 ¹ 320 ²	990 ¹ 990 ²	

Tabla A3.2. (Continuación)

Sustancia	Niveles de limpieza				
	g	h	i	j	k
Arsénico	20 ¹	2.0	1.0/4.0 ¹	10/40	20/40
	30 ²		14/25/50 ²		100/200
	50 ³		20/30/50 ³		
Bario	200 ¹		-		200/400
	400 ²		-/1000/2000 ²		1000/2000
	2000 ³		200/400/2000 ³		
Cadmio	1 ¹		-	3/15	1 / 4
	5 ²		1-6/4/8 ²		10/20
	20 ³		1.5/5/20 ³		
Cromo	100 ¹	0.05	600/1000 ¹	25	150/300
	250 ²		-/10/10 ²		750/1500
	800 ³		100,250,800 ³		
Plomo	50 ¹	20	800/1000 ¹	500/2000	100/200
	150 ²		60/500/1000 ²		500/1000
	600 ³		50/200/600 ³		
Acetona					
Diclorometano					
Acenafteno					
Acenaftileno					
Antraceno	0.1 ¹		-		
	10 ²		-/-/-/0.004-0.005 ²		
	100 ³		-/10/100 ³		
Benzo(a)antraceno			-		
			-/1/10 ³		
Benzo(b)fluoranteno					
Benzo(k)fluoranteno					
Benzo(ghi)perileno					
Benzo(a)pireno	0.05 ¹	0.02	-		
	1 ²		-		
	10 ³		-/1/10 ³		
Criseno			-		
			-/-/-/470 ²		
			-/5/50 ³		
Fluoranteno	0.1 ¹		-		
	10 ²		-		
	100 ³		-/10/100 ³		
Fluoreno					
Indeno(1,2,3-cd)pireno			-		
			-/1/10 ³		
Naftaleno	0.1 ¹		-		
	5 ²		-/-/-/5400 ²		
	50 ³		-/5/50 ³		
Fenantreno	0.1 ¹		-		
	10 ²		-/-/-/1870 ²		
	100 ³		-/5/50 ³		
Pireno	0.1 ¹		-		
	10 ²		-		
	100 ³		-/10/100 ³		
Benceno	0.01 ¹	0.3	-		
	0.5 ²		-/-/-/0.04-0.3 ²		
	5 ³		-/0.5/5 ³		
Tolueno	0.05 ¹	0.3	-		
	3 ²		-		
	30 ³		-/3/30 ³		
Etilbenceno	0.05 ¹		-		
	5 ²		-		
	50 ³		-/5/50 ³		
Xileno	0.05 ¹		-		
	5 ²		-		
	50 ³		-/5/50 ³		

Tabla A3.2. (Continuación)

Sustancia	Niveles de limpieza (mg/kg)				
	l	m	n	o	p
Arsénico	2.87E+03	2.87E+03	2.87E+03	2.87E+03	2.58E+00
Bario	8.13E+04	5.69E+04	1.63E+05	1.63E+05	2.11E+05
Cadmio	1.50E+03	7.49E+02	7.49E+02	7.49E+02	2.70E+03
Cromo	1.92E+03	1.92E+03	3.83E+03	3.83E+03	6.90E+03
Plomo					
Acetona					1.49E+00
Diclorometano			2.01E-02	2.01E-02	1.73E-02
Acenafteno	1.80E+01				3.34E+02
Acenaftileno					0.00E+00
Antraceno					5.04E+03
Benzo(a)antraceno					2.54E+01
Benzo(b)fluoranteno					1.01E+01
Benzo(k)fluoranteno					1.01E+02
Benzo(ghi)perileno					
Benzo(a)pireno				2.20E+02	1.01E+01
Criseno					3.68E+02
Dibenzo(a,h)antraceno					
Fluoranteno	3.04E+02				1.14E+04
Fluoreno					3.51E+02
Indeno(1,2,3-cd)pireno					2.94E+01
Naftaleno					9.63E+01
Fenantreno					
Pireno					8.36E+03
Benceno	1.92E-01			9.59E-02	7.48E-03
Tolueno	8.97E+02		6.27E+02	6.27E+01	4.51E+01
Etilbenceno	3.12E+02		8.92E+02	1.56E+02	2.90E+02
Xileno				5.07E+02	7.09E+01

- b) Niveles de acción bajo la acción correctiva RCRA (Buonicore, 1996)
- c) Límites de concentración residual para constituyentes no metálicos (Buonicore, 1996)
- d) Niveles de limpieza de suelo propuesto por el Superfondo: ¹ ingestión de suelo, ² inhalación de vapores y partículas provenientes del suelo (Buonicore, 1996)
- e) Metas preliminares de rehabilitación EPA Región IX: ¹ uso de suelo residencial, ² uso de suelo industria (Buonicore, 1996)
- f) Concentraciones de fondo de elementos en suelos (valor promedio/ intervalo de valores) (Buonicore, 1996).
- g) Criterio contaminantes indicado usado por Holanda: ¹ A: concentraciones de fondo, ² B: contaminación moderada, ³ C: Valores que requieren limpieza (Buonicore, 1996)

- h) Concentraciones máximas permisibles de contaminantes en suelo en la Unión Soviética (Buonicore, 1996)
- i) Criterios de limpieza en Canadá: ¹ Alberta(suelo ácido/suelo básico), ² Ontario (uso de suelo agrícola/uso de suelo residencial o parques/uso de suelo comercial o industrial/sitios de refinería), ³ Quebec (niveles de fondo/contaminación moderada/niveles severos) (Buonicore, 1996)
- j) Concentraciones límite para compuestos inorgánicos seleccionados, para el Reino Unido ((Buonicore, 1996)
- k) Criterios para contaminantes del suelo en Francia (Buonicore, 1996)
- l) CCE-CCA-001/89 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el diario oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989. Dividido entre el valor del factor de lixiviación para convertir mg/l en mg/kg
- m) NOM- 127-SSA-1-1994. Norma oficial mexicana, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Parte 4. Límites permisibles de calidad del agua. Dividido entre el valor del factor de lixiviación para convertir mg/l en mg/kg
- n) Niveles de acción bajo la acción correctiva del RCRA (Buonicore, 1996). Dividido entre el valor del factor de lixiviación para convertir mg/l en mg/kg
- o) Estándares corrientes y propuestos por la USEPA para agua potable (Buonicore, 1996). Dividido entre el valor del factor de lixiviación para convertir mg/l en mg/kg
- p) Niveles de limpieza propuestos para el sitio del superfondo (superfund) (Buonicore, 1996). Dividido entre el valor del factor de lixiviación para convertir mg/l en mg/kg.

Tabla A3.3 Niveles de limpieza elegidos para los Talleres

Sustancia	Concentración		Nivel de limpieza elegido de acuerdo al uso de suelo (mg/kg)	
	Zona	(mg/kg)	Residencial	Comercial/ industrial
Arsénico	Abasto	2	3.92E-01	1.57E+00
	Ejes	2	3.92E-01	1.57E+00
	Pintura	3	3.92E-01	1.57E+00
Bario	Abasto	133	1.76E+04	7.04E+04
	Chapopote	1,68	4.11E+04	1.64E+05
	Ejes	101	1.76E+04	7.04E+04
	Pailería	171	1.76E+04	7.04E+04
	Pintura	287	1.76E+04	7.04E+04
Cadmio	Pailería	3	2.94E+02	1.17E+03
Cromo	Abasto	9	8.02E+01	3.20E+02
	Ejes	8	8.03E+01	3.20E+02
	Pailería	4	8.03E+01	3.20E+02
	Pintura	10	8.02E+01	3.20E+02
Plomo*	Abasto	12	200	1,500
	Ejes	8	200	1 500
	Pintura	9	200	1 500
Acetona	Abasto	0.17	4.61E+00	1.25E+01
	Chapopote	0.47	5.48E-01	1.48E+00
	Pintura	0.12	9.23E+00	1.25E+01
Diclorometano	Chapopote	0.25	2.36E-02	6.39E-02
Acenafteno	Abasto	1.84	1.02E+03	2.77E+03
	Chapopote	12	2.38E+03	6.45E+03
Acenaftileno	Chapopote	4.32	8.85E+01	2.39E+02
Antraceno	Abasto	0.67	1.59E+04	4.30E+04
	Chapopote	51.6	3.70E+04	1.00E+05
Benzo(a)antraceno	Abasto	1.03	5.31E-01	1.82E+00
	Chapopote	10.4	5.31E-01	1.82E+00
Benzo(b) fluoranteno	Abasto	1.1	5.31E-01	1.82E+00
Benzo(k) fluoranteno	Abasto	1.00	5.31E+00	1.82E+01
	Chapopote	8.93	5.31E+00	1.82E+01
Benzo(ghi)perileno	Chapopote	7.66	1.16E+04	4.00E+04
Benzo(a)pireno	Abasto	0.88	5.31E-02	1.82E-01
	Chapopote	2.1	5.31E-02	1.82E-01
Criseno	Abasto	1.62	3.37E-01	1.16E+00
	Chapopote	16.8	3.37E-01	1.16E+00

Tabla A3.3 (Continuación)

Sustancia	Concentración		Criterio de limpieza elegido de acuerdo al uso de suelo (mg/kg)	
	Zona	(mg/kg)	Residencial	Comercial/ industrial
Fluoranteno	Abasto	2.29	5.74E+03	1.55E+04
	Chapopote	23.3	1.34E+04	3.63E+04
Fluoreno	Abasto	2.25	1.10E+03	2.99E+03
	Chapopote	14.4	2.58E+03	6.97E+03
Indeno(1,2,3-cd) pireno	Chapopote	2.84	5.31E-01	1.82E+00
Naftaleno	Abasto	2.13	1.51E+02	4.10E+02
	Chapopote	16.2	3.53E+02	9.56E+02
Fenantreno	Abasto	4.51	1.59E+03	4.30E+03
	Chapopote	50.1	3.70E+03	1.00E+04
Pireno	Abasto	7.57	4.31E+03	1.17E+04
	Chapopote	44	1.00E+04	2.72E+04
Benceno	Abasto	0.07	2.91E-02	7.89E-02
	Chapopote	0.03	2.91E-02	7.89E-02
Tolueno	Abasto	0.25	2.37E+02	6.41E+02
	Chapopote	0.05	5.52E+02	1.50E+03
Etilbenceno	Abasto	0.86	4.21E+02	1.14E+03
	Chapopote	0.69	9.82E+02	2.66E+03
Xileno	Abasto	0.82	1.91E+03	5.18E+03
	Chapopote	2.33	4.46E+03	1.21E+04

Las concentraciones elegidas se basan en la evaluación de riesgo a la salud excepto * que proviene de PROFEPA (2000).