

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA UNIDAD  
PROFESIONAL TICOMAN**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO E INVESTIGACIÓN**

**ÁREA DISCIPLINARIA: RIESGO GEOLOGICO**

## **“ESPECIACIÓN DE METALES PESADOS CONTAMINANTES EN LOS SUELOS Y ACUÍFERO DEL RÍO DE LOS REMEDIOS”**

**Tesis que para obtener el grado de Maestro en  
Geociencias y Administración de los Recursos Naturales**

**Presenta:**

**JANETTE HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

**Directores:**

**M. en C. RODRIGO MONDRAGÓN GUZMAN**

**M. en C. FRANCISCO ESTRADA GODOY**

**México, D.F. Enero de 2012.**



SP-14-B/S

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 09 del mes de Noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA, U. Ticomán para examinar la tesis titulada: "Especiación de Metales Pesados Contaminantes en los Suelos y Acuifero del Río de los Remedios"

Presentada por el alumno:

Hernández  
Apellido paterno

Hernández  
Apellido materno

Janette

Nombre(s)

Con registro: 

B	0	9	1	4	3	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis:

Fco. Estrada G.  
M. en C. Francisco Estrada Godoy

Dr. Cayetano Miguel García Reyes

Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández

Dr. Arturo Ortiz Uvilla

M. en C. Leobardo Salazar Peña

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Ing. Julio E. Morales de la Cruz





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 16 del mes Enero del año 2012, el (la) que suscribe C. Janette Hernández Hernández, alumno (a) del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, con número de registro B091431, adscrito a SEPI ESIA, Ticomán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán y del M. en C. Francisco Estrada Godoy y cede los derechos del trabajo intitulado "Especiación de Metales Pesados en los Suelos y Acuífero del Río de los Remedios", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [janette\\_hdez3@hotmail.com](mailto:janette_hdez3@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Janette Hernández Hernández

Nombre y firma



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido llegar a la conclusión de este proyecto.

Al Instituto Politécnico Nacional por ser parte de su vida Académica.

Al M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán por el interés prestado a esta tesis.

Al M. en C. Francisco Estrada Godoy por sus aportaciones y correcciones.

Al comité revisor:

Dr. Cayetano Miguel García Reyes

M. en C. Leobardo Salazar Peña

Dr. Arturo Ortiz Ubilla

Dr. Luis Enrique Ortíz Hernández

A la E.S.I.A. Ticomán por todos los buenos momentos y las enseñanzas sobre todo en campo.

A todos mis profesores, por compartir sus conocimientos y experiencia no solo laboral sino de vida.

Al Ing. Juan Ortíz Contla por sus valiosos aportes y observaciones para el mejoramiento de este trabajo.

A la Familia Ortíz Arellano por su hospitalidad, cariño y apoyo, para terminar con esta tesis.



## DEDICATORIA

A mi hija **Anna Rebecca** por tu amor y por impulsarme a alcanzar todas mis metas

A mis **padres** por darme la vida, por su amor y ejemplo.

A **mami** por estar aquí hasta que concluya con mis proyectos.

A mis **hermanos** Ingrid, Gretell, Anabel, Ariel, Jorge, David, (y aunque no llevamos la misma sangre Jesús, Héctor, y Cristopher), por su apoyo y por creer en mi.

A toda mi **familia** a los que están y los que ya se fueron, en especial a mi tía Gris.

A mis **amigos** de la Maestría Nohemi, Ingrid, Fausto y Daniel, por su cariño y aliento en los buenos y malos momentos. Así como a mis compañeros por las aventuras y gratos momentos vividos.

A **Illinois**



## INDICE

<b>Acta de revisión de tesis</b>	2
<b>Carta de cesión de derechos</b>	3
<b>Agradecimientos</b>	4
<b>Dedicatoria</b>	5
<b>Resumen</b>	9
<b>Abstract</b>	9
<b>Introducción</b>	10
<b>Justificación</b>	11
<b>Hipótesis</b>	12
<b>Objetivo general</b>	12
Objetivos Particulares	12
<b>Antecedentes</b>	13
<b>CAPITULO 1. CARACTERISTICAS AMBIENTALES DEL SUELO</b>	
1.1 El suelo como componente ambiental	16
1.1.2. El suelo como sustrato del desarrollo vegetal	19
1.1.3. El suelo como entidad geológica	19
1.1.4. El suelo como manto estructural	19
1.1.5. El suelo como manto transmisor de agua	20
1.1.6. El suelo como componente del ecosistema	20
1.1.7. El suelo como componente de los sistemas superficiales terrestres	20
1.2 Formación del Suelo	21
1.2.1 Relación entre las propiedades del suelo y los factores formadores.	22
1.3 Composición del Suelo	23
1.3.1 Fracción mineral.	23
1.3.2 Fracción orgánica.	24
1.3.3 Fracción acuosa o de solución.	24
1.4 Aguas Subterráneas	25
1.4.1 Depuración	25
1.5 Elementos Traza	26
<b>CAPITULO 2. LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO</b>	



Introducción	29
2.1 Tipos de Contaminación: Contaminación Local y Contaminación Difusa	30
2.1.1 Contaminación Local.	32
2.1.2 Contaminación Difusa.	32
2.1.3 La movilidad de los contaminantes y los parámetros geodáficos	32
2.2 Principales Fuentes de Contaminación	33
2.2.1 Contaminación por Metales Pesados	36
2.2.2 Propiedades de los Metales	36
2.2.3 Principales Fuentes de Contaminación por Metales Pesados.	37
2.2.3.1 Deposición atmosférica.	38
2.2.3.2 Combustión de combustibles fósiles.	40
2.2.3.3 Industrias metalúrgicas.	40
2.2.3.4 Industria microelectrónica.	41
2.2.3.5 Industrias químicas.	41
2.2.3.6 Eliminación de residuos.	41
2.3 Contaminación de Suelos por Metales Pesados	42
2.3.1 Elementos Metálicos en Suelos	44
2.4 Movilización de Metales Pesados en el Suelo.	46
2.4.1 Movilización natural de metales pesados.	49
2.5 Mecanismos de Toxicidad de los Metales Pesados	50
2.5.1 Efectos de EPT sobre algunas funciones biológicas	50
2.6 Comunidades microbianas del suelo	52
2.7 Síntesis de la Biogeoquímica De As, Cd, Hg, Pn y Zn.	52
2.7.1 Arsénico	52
2.7.2 Cadmio.	54
2.7.3 Mercurio	55
2.7.4 Plomo.	56
2.7.5 Cinc.	58

### **CAPITULO 3. CARACTERISTICAS DEL AREA DE ESTUDIO**

3.1 Características generales del Río de los Remedios.	60
3.2 Geología	61
3.3 Clima	61
3.4 Hidrografía	63
3.5 Suelos	64
3.5.1 Leptosoles	65
3.5.1.1 Descripción resumida de Leptosoles	65
3.5.1.2 Distribución regional de Leptosoles	66
3.6 Flora y Fauna	67
3.7 Orografía	67
3.8 Población	69
<b>CAPITULO 4. MATERIALES Y METODOS</b>	<b>70</b>



4.1 Muestreo y Caracterización del Sitio	71
4.1.1 Tipo de muestreo seleccionado	72
4.2 Planeación de un Muestreo	72
4.2.1 Materiales e instrumentos para el muestreo	73
4.2.2 Profundidad de muestras	75
4.2.3 Preparación de las muestras	76
4.3 Estrategia experimental	77
4.3.1 Desglose de actividades y acotaciones técnicas	77
4.4 Análisis de las propiedades y características del suelo.	80
4.4.1 Procedimientos para valorar la contaminación de un suelo	81
4.4.2 Medición del potencial hidrogeno (pH)	87
4.4.3 Conductividad eléctrica	87
4.4.4 Capacidad de intercambio catiónico	87
4.4.5 Análisis del contenido total de metales pesados en suelos.	88
4.4.5.1 Selección de los métodos de digestión	90
4.4.6 Reactivos y limpieza del material	90
4.5 Análisis del contenido extraíble de metales pesados en suelos.	91
4.5.1 Selección del extractante para la extracción secuencial	92
4.5.2 Método para la extracción de metales pesados en suelos	93
4.5.3 Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica.	93

## **CAPITULO 5. RESULTADOS**

5.1 Sitio 1	
5.1.1 Descripción	95
5.1.2 Conformación del Sitio	95
5.1.3 Vegetación	96
5.1.4 Fuentes de Perturbación	97
5.2 Sitio 2	
5.2.1 Conformación del Sitio	98
5.3.2 Vegetación	98
5.3.3 Fuentes de Perturbación	99
5.3 Sitio 3	99
5.3.1 Descripción	99
5.3.2 Conformación del Sitio	99
5.3.3 Vegetación	100
5.3.4 Fuentes de Perturbación	100
5.4 Análisis de las muestras	101
	102

<b>CONCLUSIONES</b>	108
---------------------	-----

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	109
---------------------	-----





## RESUMEN

En las grandes ciudades, la industrialización y el crecimiento poblacional tiene efectos adversos en el medio ambiente los componentes de este (ríos, lagos, flora y fauna). Para determinar el impacto de las fuentes antropogénicas es necesario conocer las características ambientales del medio a analizar.

El objetivo general de este trabajo fué cuantificar los metales pesados (As, Cd, Ni, Cu, Pb, Cr, Zn, Cn, Hg) en el suelo y agua del río de los Remedios al Norte de la Ciudad de México, para así determinar el origen de los contaminantes tomando en cuenta las empresas/industrias que se encuentran al margen del cause del río.

Se procedió a hacer recorridos para determinar los mejores puntos para la toma de muestras, posteriormente se hizo el muestreo de acuerdo a las normas oficiales mexicanas. El análisis de las muestras se hizo en el laboratorio del Colegio de Postgraduados.

Los resultados arrojados por el laboratorio confirmo la hipótesis es decir, la carga contaminante arrojada al río coincide con el giro de la empresa al margen del río. Y esto se concluyo por la comparación de los valores de un punto al siguiente del muestreo.

## ABSTRACT

In the big cities, the industrialization and the population growth it has adverse effects in the environment the components of this one (rivers, lakes, flora and fauna). To determine the impact of the sources antropogénicas is necessary to know the environmental characteristics of the way to analyzing. The general aim of this work was to quantify the heavy metals (AS, Cd, Ni, Cu, Pb, Cr, Zn, Cn, Hg) in the soil and water of the river of the Remedies to the north of the Mexico City, this way to determine the origin of the pollutants bearing in mind the companies / industries that they find to the margin of cause of the river.

One proceeded to do tours to determine the best points for the capture of samples, later the sampling agreement was done to the official Mexican procedure. The analysis of the samples was done in the laboratory of the Postgraduates' College. The results thrown by the laboratory I confirm the hypothesis it is to say, the pollutant load thrown to the river coincides with the draft of the company to the margin of the river. And this I conclude for the comparison of the values of a point the following one of the sampling.



## INTRODUCCIÓN

El suelo junto con el agua, el aire y la luz solar, son el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres; alberga una gran diversidad de organismos y microorganismos, constituye un recurso natural de gran importancia, que desempeña funciones en la superficie terrestre como reactor natural y hábitat de organismos, así como soporte de infraestructura y fuente de materiales no renovables (Sposito 1989, UNESUR 2004).

El suelo además es un elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos del agua y los biogeoquímicos. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos, promueve fenómenos de evotranspiración o transpiración del aire a través de la superficie, pero a su vez, algunos de los compuestos que el suelo es capaz de retener o transformar en su matriz, pueden representar un riesgo a la salud del ecosistema y por ende al ser humano. Una fracción importante de esos compuestos son los denominados metales pesados, que en función de sus características, abundancia y ubicación, llegan a entrañar un serio problema para el medio ambiente circundante.

La Ciudad de México se caracteriza no solo por ser la capital del país y una de las ciudades más grandes del mundo sino además por ser una de las más contaminadas a nivel mundial.

Son indiscutibles las muestras con que el medio natural expresa su deterioro. El análisis de metales pesados es una actividad importante cuando se quiere valorar el riesgo potencial ambiental y de salud. Sin embargo, es ampliamente aceptado que la determinación del contenido total no da una valoración apropiada del impacto ambiental causado. Por lo tanto, es necesario realizar estudios de especiación para obtener información más detallada sobre su biodisponibilidad.

La especiación de metales pesados (As, Cd, Cn, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) nos dice cuáles son los principales agentes contaminantes, como han evolucionado y cuánto tiempo llevan. Los metales pesados están asociados principalmente a la fracción mineral y a la materia orgánica y consecuentemente muestran muy baja biodisponibilidad.

Las características bióticas, físicas y químicas del sistema suelo son sin duda un punto de partida obligado para comprender la dinámica de un contaminante que en él ocurre.



## JUSTIFICACIÓN

Es bien sabido que verter aguas residuales de origen industrial sobre el cauce de un río tiene un alto impacto negativo casi irreversible en la flora y fauna del lugar así como en los suelos y el agua del mismo. En México se localizan una gran cantidad de sitios contaminados con metales pesados; las principales razones ligadas son la producción industrial y de desechos industriales.

En México a pesar de las políticas de “Industrias limpias” y de que existe una Procuraduría Federal especializada en Proteger al Ambiente poco se ha podido hacer para proteger a los ríos, bosques, selvas, desiertos, y en particular a los suelos que es la base de todos estos ecosistemas, de los abusos de las industrias que buscan solo el enriquecimiento sin pensar el daño que causan al medio ambiente.

Las industrias de la Ciudad de México no son la excepción, al no haber confinamientos de residuos industriales o peligrosos certificados o autorizados en la Ciudad de México, se manda a otros lugares. En el Distrito Federal solo existe la recolección de estos. Por esta razón, para facilidad y ahorro de las industrias es mejor verter sus aguas residuales al cauce del río más cercano, en este caso al norte del Distrito Federal al Río de los Remedios.

Uno de los principales problemas de la contaminación de los ríos es que al mismo tiempo se contamina el acuífero, y al momento de extraer el agua para el consumo humano, contiene sustancias tóxicas así como metales pesados, que hacen que no se pueda consumir, tal cual se extrae.

El binomio reaprovechamiento – descontaminación, plantea la posibilidad de un manejo integral de estas sustancias, en donde haya evidentemente más de un sector o interés beneficiado, sin obviar en la parte netamente ambiental que por sí misma es ya un beneficio de carácter común y por ende irrefutable.



## **HIPÓTESIS**

Si las aguas residuales vertidas sobre el Río de los Remedios son de origen industrial, tendrán un alto contenido de Metales Pesados, los cuales son los principales causantes de la contaminación y deterioro de los suelos al margen del río así como del acuífero.

## **OBJETIVO GENERAL**

Identificar los tipos de metales pesados que contaminan los suelos del Río de los Remedios según su origen y su relación con el acuífero cercano al río.

### **Objetivos Particulares**

Identificar los tipos de Metales Pesados presentes en los Suelos del margen del Río de los Remedios

Reconocer los tipos de contaminación presentes en el cauce del Río de los Remedios

Determinar el origen de los Metales contaminantes de los suelos, por la identificación de las industrias que vierten sus aguas residuales al cauce del Río

Relacionar el tipo de Metales así como su proporción presentes en los Suelos, con las Industrias al margen del Río de los remedios.



## ANTECEDENTES

El río de los Remedios es una de las pocas corrientes fluviales todavía existentes de la ciudad de México; este río, junto con otros, forma parte de la cuenca del río Moctezuma en la región hidrológica del Pánuco. Según datos de la Comisión Nacional del Agua; mezcla sus aguas con las del gran canal de desagüe que proviene del Distrito Federal en un distribuidor, a partir del cual, el gran canal continúa hacia el norte y el río de los Remedios hacia el oriente.

El río de marras, junto con el canal de Sales y arroyos intermitentes, funcionan como colectores y presentan un alto grado de contaminación al pasar por zonas habitacionales e industriales, por lo que la calidad del agua se va deteriorando paulatinamente, en virtud de las numerosas descargas residuales que se incorporan en su trayecto y que contienen una concentración importante de sustancias nocivas como metales pesados, solventes, ácidos, grasas y aceites, entre otros.

El caótico proceso de urbanización de la zona metropolitana del valle de México ha implicado graves problemas para el ambiente, lo que se manifiesta en la persistente expansión urbana que invade terrenos, aun de zonas federales. Por esto, el papel de los productores de suelo urbano, tales como promotores inmobiliarios, de asentamientos irregulares y las propias industrias, ha sido el ejercer diversas clases de presiones sobre el Río de Los Remedios, incrementando las aguas y los desechos que transitan por su cauce.

Los problemas que presentaba el Río de Los Remedios en el tramo desde el Gran Canal del Desagüe hasta el Dren General del Valle no sólo eran de funcionamiento hidráulico y calidad del agua; entre ellos figuraban, en un sitio destacado, los vinculados con la salud pública de los habitantes asentados en sus proximidades.

Mientras que muchas ciudades del mundo han centrado su desarrollo en los ríos que forman parte de su territorio y en la actualidad obtienen diversos beneficios de aquellos, en México los utilizamos como sitio para tirar desechos de todo tipo.

Los ríos son los medios y las rutas por las cuales los productos de la erosión continental son transportados a los océanos del mundo; excepto en las áreas más áridas, en el resto cae más agua en forma de precipitación pluvial que la que se libera por evaporación y transpiración de la superficie de la tierra a la atmósfera. De este modo hay un exceso de agua, el cual debe fluir al océano. Los ríos, entonces, son las rutas por las cuales este exceso de agua fluye hasta el último nivel de base.



El exceso de precipitación sobre la evaporación y la transpiración provee el caudal de ríos y manantiales, recarga los mantos acuíferos, y constituye el suministro mediante el cual el hombre obtiene agua para sus necesidades (Leopold, 1962).

El panorama que se observaba en el 2003, antes de la rectificación, correspondía no a la de un río sino a la de un tiradero a cielo abierto en donde además de basura, podíamos observar desde animales muertos, llantas, desperdicios de batería de vehículos automotores, desechos de carrocerías, grandes cantidades de envases plásticos, etc., lo que propiciaba la proliferación de fauna nociva, como ratas, jaurías de perros transmisores de la rabia, moscas, mosquitos, etc.

En junio de 2003, ante la necesidad de recuperar el área hidráulica para contar con un óptimo funcionamiento del cauce y sanear el río en el tramo localizado entre el Gran Canal del Desagüe y el Dren General del Valle, la Coordinación General de los Proyectos de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México procedió a la rectificación del cauce.

Sin duda, el principio de complejidad de Edgar Morin (1984) y lo que Rolando García (1994) ha denominado el estudio de los sistemas complejos se aplican a la rectificación del Río de Los Remedios, ya que con el principio de complejidad se trata de superar el conocimiento en mundo separados, donde ni la ingeniería tiene conciencia del carácter ecológico, físico y biológico de los fenómenos humanos, ni las ciencias de la naturaleza tienen conciencia de su inscripción en una cultura, una sociedad, una historia. Ambas ignoran las presiones que orientan el caótico desarrollo urbano.

La problemática ambiental o ecológica en la parte oriente de la zona metropolitana del valle de México constituye hoy lo que quizá sea el mayor reto, no sólo porque demanda urgentemente nuevos enfoques capaces de ofrecer información confiable y completa para resolver numerosos problemas, sino especialmente porque éstos representan un potencial riesgo a la salud.

El gran reto sigue siendo la poca conciencia de preservación de un ambiente limpio, ya que los pobladores asentados en la cercanía del río persisten en la práctica de tirar la basura en el cauce. Durante la temporada de lluvias, y debido a su cercanía a un canal de aguas negras, cuando hay lluvias fuertes el agua rebasa la barra guía electrificada, por lo que el servicio tiene que ser suspendido.

El agua subterránea es uno de los recursos naturales más importantes. Constituye a nivel mundial una gran proporción del agua utilizada y representa aproximadamente el 20% en México, el 50% en Estados Unidos, cerca del 30% en Canadá y



aproximadamente el 70% en Europa. En México se aprovechan 340 zonas geohidrológicas, de las que se extraen aproximadamente 30 mil millones de m<sup>3</sup> al año, utilizándose 63% para riego, 19% para satisfacer las necesidades de agua de 55 millones de habitantes, 13% para abastecer a la industria y el 5% lo aprovecha la población rural.

En lo referente a sistemas de agua subterránea ha prevalecido la idea errónea de que los acuíferos se encuentran protegidos de manera natural de las diversas fuentes de contaminación. Sin embargo, a partir de la década de los años setenta se ha registrado, a una tasa alarmante, la presencia de contaminantes de origen industrial, municipal y agrícola en agua subterránea.

La producción y el uso de compuestos químicos sintéticos se ha incrementado en forma considerable en lo que va del siglo, en particular a partir de la década de los años cuarenta.

La alteración en la calidad del agua extraída de pozos de abastecimiento es una manera de notar el impacto en agua subterránea. Sin embargo, en los pozos de extracción o abastecimiento se diluye el contaminante, por lo que no es la mejor manera de detectar el problema en sus primeras etapas. En otros casos, es posible que el contaminante esté presente, pero en concentraciones menores que el límite de detección y cuando éste se llega a detectar, el problema alcanzó grandes dimensiones. En algunos otros casos aun cuando se elimine la fuente de contaminación, el compuesto queda en el suelo y se libera lentamente, lo cual provoca la formación de una pluma contaminante.

Es importante entender la manera como ciertos contaminantes penetran, migran y se dispersan en los sistemas de agua subterránea, en especial, si se tiene en mente que cuando es factible la recuperación de un acuífero contaminado, ésta es extremadamente costosa y representa un proceso de largo plazo.

Conocer a los minerales constituyentes del suelo es fundamental para definir las funciones de este, tales como capacidad de absorción, capacidad amortiguadora, propiedades para transporte de iones en solución.

Las formas de asociación de los minerales y contaminantes, la formación de nuevos minerales y las reacciones químicas de superficie son estudiadas mediante estas ciencias y/o técnicas auxiliares y al final permiten hacer pronósticos confiables sobre el comportamiento del suelo así como sus limitantes de uso y el riesgo que implican al ambiente (Galán y Romero, 2004).



## CAPITULO 1

### *CARACTERISTICAS AMBIENTALES DEL SUELO*

#### **1.1 El Suelo como Componente Ambiental.**

El suelo es un cuerpo natural que varía de modo continuo en el espacio y en el tiempo, ésta variabilidad está condicionada por la de otros recursos naturales (clima, organismos, relieve, litología, etc.) (Zapata, 2006).

El suelo constituye un recurso natural de gran importancia, que desempeña funciones en la superficie terrestre como reactor natural y hábitat de organismos, así como soporte de infraestructura y fuente de materiales no renovables (Sposito 1989), además de ser el hábitat de organismos y reserva genética. El suelo constituye, junto con el agua, el aire y la luz solar, el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres, alberga una gran diversidad de organismos y microorganismos. Es el soporte físico de infraestructura; por sus características físicas, químicas y mecánicas, el suelo posee propiedades de soporte para el desarrollo de actividades forestales, recreativas y agropecuarias, además de socio-económicas como vivienda, industria y carreteras, entre otras (Volke, et al., 2005).

También es una fuente de materiales no renovables; éste es un yacimiento de materias primas, como minerales no metálicos de interés para la construcción (piedra, mármol, caliza, yeso, arena), minerales metálicos (blenda, galena, siderita, pirita) y combustibles fósiles como el petróleo. La definición de suelo ha tenido diferentes matices, según quien trate de hacerla y según la época en que la haga. Además la palabra suelo también ha tenido acepciones tan simples como:

- El suelo es, desde el punto de vista del agricultor, el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949).
- Para un geólogo podría ser el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso.
- Para un constructor, el suelo es el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas.
- Para un ecólogo es uno de los componentes del ecosistema que estudia.
- Para un químico, es el laboratorio donde se producen reacciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa.





- Un antropólogo o un arqueólogo podrán ver el suelo como un tipo de registro del pasado (Jaramillo, 2002).

En términos concretos el suelo es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que tiende a desarrollarse en la superficie de las rocas emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos (meteorización).

Ante la variedad de acepciones utilizadas para un mismo término, era necesario crear definiciones que precisaran la aplicación del mismo. Entonces surgieron dos conceptos, que con el paso del tiempo se convirtieron en ciencias, estos son:

- Pedología, en donde se considera el suelo como un cuerpo natural cuyas propiedades interesan para establecer su origen y su clasificación, sin importar sus posibilidades de uso.
- Edafología, en donde el suelo es tomado como el soporte para las plantas, es decir, se estudia desde un punto de vista netamente práctico, orientado a obtener los mejores rendimientos agropecuarios posibles. (Lyttleton y Buckman, 1944).

El glosario de términos de suelos de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984) también establece dos definiciones para el término suelo:

- Es el material no consolidado en la superficie de la tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres.
- Es el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales: Material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un lapso de tiempo y generando un producto: el suelo, que difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas (Jaramillo, 2002-1).

Para analizar este proceso evolutivo, se puede acudir al auxilio de distintos modelos conceptuales del sistema suelo. En cierta medida, estos deberían corresponder a distintas concepciones de la estructura y dinámica de los suelos. Para Ibañez citado por Zapata (2006) otros estos modelos de definición de suelo son: 1) cuerpo natural; 2) substrato para el desarrollo vegetal; 3) entidad geológica; 4) material estructural; 5) manto transmisor de agua; 6) componente del ecosistema; 7) modelo holístico de la geoderma (suelo + regolito); 8) componente auto-organizado de los sistemas superficiales terrestres.



### **1.1.2. El suelo como sustrato del desarrollo vegetal**

Para Simonson (1985) éste modelo es el más antiguo porque de hecho precede al nacimiento de la propia Pedología, tradicionalmente se ha utilizado como la principal herramienta para la interpretación de los levantamientos de suelos en el campo agronómico; pretende analizar, mejorar, organizar y predecir el desarrollo vegetal (cultivos, pastos, bosques), conceptuando sobre la aptitud y manejo de los suelos frente a diversos usos (dosis de fertilizantes, irrigación, etc.). Las propiedades de suelos más relevantes para este modelo (medidas directamente o inferidas mediante funciones de edafotransferencia, etc.) son: agua útil, nutrimentos asimilables, conductividad del calor, posibilidad de expansión del sistema radical etc.

También se presta cierta atención tanto a la actividad biológica (en cuanto a la afectación de la disponibilidad de nutrimentos), como a los problemas de toxicidad, naturales o producidos por la intervención humana. Los estudios de fertilidad de suelos, ensayos en parcelas experimentales, etc., son esenciales para el modelo (Zapata, 2006).

### **1.1.3. El suelo como entidad geológica**

Con el paso del tiempo, esta representación de suelo, es decir la alteración del material litológico y la constitución de regolitos y perfiles de meteorización, evolucionó en el terreno de la Geología, y de esta manera se asoció a disciplinas como la Geomorfología y la geoquímica del paisaje. La escala temporal adecuada para el estudio de los procesos implicados cubre desde uno o más millones de años.

### **1.1.4. El suelo como manto estructural**

Su uso es relativamente reciente, es un modelo correspondiente a la interpretación de datos de los levantamientos de suelos. La aplicación de este tipo de representación ha sido llevada a cabo esencialmente por ingenieros y especialistas en geotecnia. Aunque los cartógrafos de suelos y otros pedólogos han realizado contribuciones al análisis de las relaciones Suelo-Geomorfología y del estudio de las propiedades mecánicas de los suelos. Este modelo utiliza como propiedades edáficas relevantes: la resistencia, la plasticidad, la consistencia, la infiltración, la compactación, la porosidad de los suelos, etc. La escala de tiempo para el estudio de los procesos implicados en este modelo varía de varias semanas a cientos de años.



### **1.1.5. El suelo como manto transmisor de agua**

Este modelo considera al suelo como un elemento del ciclo hidrológico (absorción, almacenamiento y transmisión de agua en el paisaje). Las propiedades físicas del suelo y sus relaciones con el sustrato, clima y vegetación son sus principales objetivos. Las funciones de pedotransferencia de propiedades físicas son usadas, frecuentemente, para estimar algunos de los parámetros de los modelos. La escala temporal adecuada para el análisis de los procesos considerados oscila desde unas pocas semanas a cientos de años (Zapata, 2006).

El suelo es un elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos del agua y los biogeoquímicos. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos. El suelo, además, promueve fenómenos de evotranspiración o transpiración del aire a través de la superficie (Volke, et al., 2005).

### **1.1.6. El suelo como componente del ecosistema**

El objetivo de la perspectiva eco-pedológica es la comprensión del suelo como un subsistema de los ecosistemas terrestres. Aborda el estudio del suelo y sus interacciones con los restantes elementos de los ecosistemas. Sin embargo, el suelo, en si mismo, también puede ser considerado como un ecosistema.

Esta representación se ha centrado principalmente sobre los ciclos de nutrientes, las biocenosis edáficas, los flujos de energía y materia y las redes tróficas. Se diferencia de los modelos anteriores por su interés sobre los aspectos biológicos y bioquímicos de los suelos, incorporando diversos conceptos originados en el ámbito de la Ecología. La escala temporal adecuada para el estudio de los procesos implicados es grande, de un día a millones de años. Debe tenerse en cuenta que, el suelo, es uno de los subsistemas de los ecosistemas terrestres cuya estructura y funcionalidad son menos conocidas. Así mismo una buena parte de sus propiedades son transitorias, es decir cambian rápidamente en el espacio y en el tiempo (Zapata, 2006).

### **1.1.7. El suelo como componente de los sistemas superficiales terrestres**

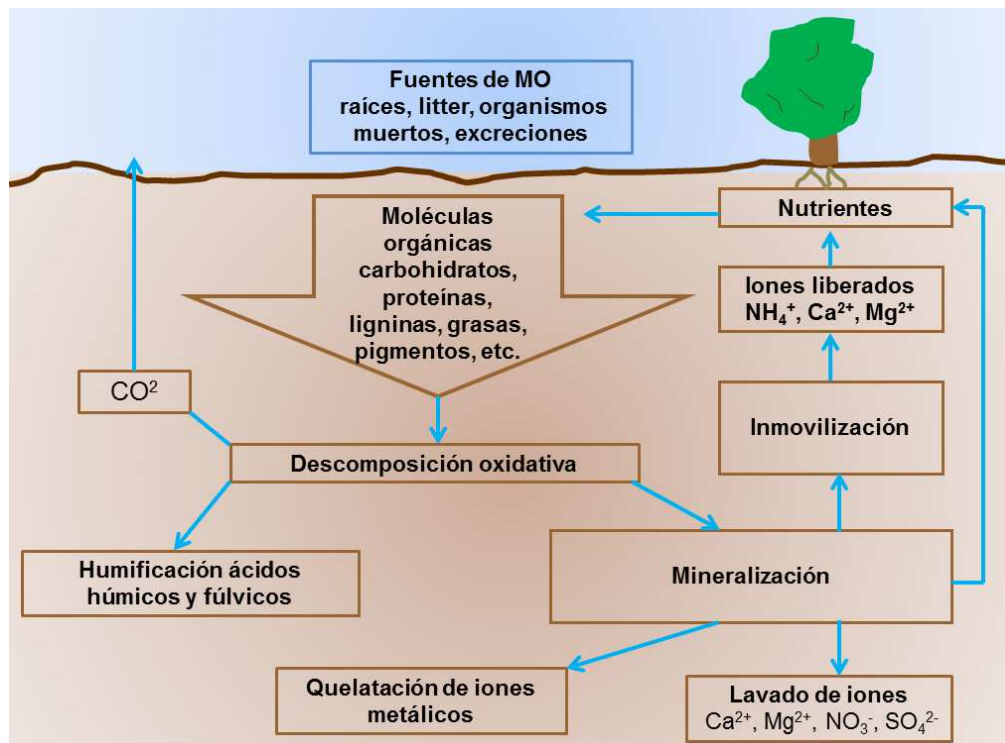
El concepto de geosistema o geoecosistema como sinónimo de sistema superficial terrestre pretende abarcar a todas aquellas estructuras naturales que componen, e interactúan, en la superficie terrestre. De hecho, amplía la visión tradicional de la teoría ecológica al contemplar, con el mismo rigor y peso específico, las estructuras

bióticas y abióticas del paisaje. Los geosistemas pueden ser entendidos como entidades dinámicas que responden tanto a sus propios cambios internos como del medio (externos), y cuyos componentes se encuentran estrechamente interrelacionados, organizándose jerárquicamente en el espacio y el tiempo.

## 1.2 Formación del Suelo

La transformación de roca en suelo se designa como formación del suelo. La roca podría ser gneis, caliza, esquistos, arena, turba, etc. Los pedólogos prefieren usar la expresión “material parental” o material del “suelo” en vez de roca. La relación entre material parental y formación del suelo puede expresarse la siguiente manera:

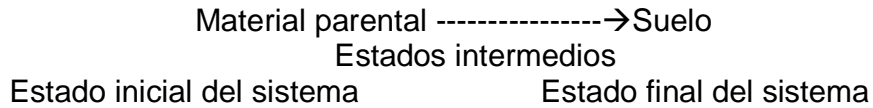
Material parental -----> Suelo  
Formación del suelo



**Figura 1.1** Transformación de los restos orgánicos en el perfil del suelo. Procesos de descomposición, mineralización y humificación.

La siguiente formula introduce un nuevo factor o variable, el “tiempo”. Las propiedades del suelo cambian hacia una dirección definida, llegando a un nuevo estado de equilibrio. Cuando se halla alcanzado ese estado de equilibrio, el proceso de transformación, de formación del suelo, ha sido completado, y la roca ha llegado a ser un suelo maduro.

Es común, designar los estados intermedios, estados inestables, como suelos inmaduros. Se pueden definir las fases de formación del suelo de la siguiente manera:

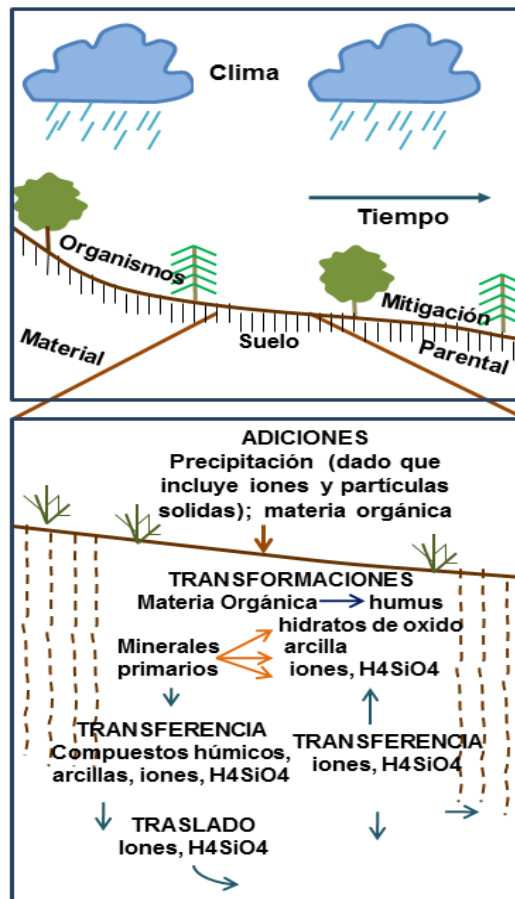


En esta configuración, el suelo es tratado como un sistema dinámico. Se enfatiza que los cambios de las propiedades del suelo están en función del tiempo.

### 1.2.1 Relación entre las propiedades del suelo y los factores formadores.

Una vez que los factores formadores del sistema suelo están totalmente definidos, todos los valores “s” tienen que depender de  $cl'$ ,  $o'$ ,  $r'$ ,  $p$  y  $t$ ; una dependencia que puede ser expresada como:

$$S = f (cl', o', r', p, t)$$



**Figura 1.2** Ilustración esquemática mostrando la relación de los cinco factores externos (o medioambientales) de la formación del suelo (de Jenny, 1941), al proceso interno de la génesis del suelo (basado en Birkeland, 1999).

Esta ecuación define que la magnitud de cualquiera de las propiedades de tipo “s” como pH, contenido de arcilla, porosidad, densidad, carbonatos, etc., está determinada por los factores formadores del suelo listados dentro del paréntesis. La letra f indica que es “función de” o “depende de” (Zapata, 2006).

### 1.3 Composición del suelo

El suelo es una mezcla compleja de materiales inorgánicos (fracción mineral, formada principalmente de arcillas, limo y arena), materia orgánica, agua/aire y organismos vivos. A continuación se describen brevemente cada una de estas fracciones (Sposito1989, Miller 1994).

#### 1.3.1 Fracción mineral.

Fracción mineral. Los componentes minerales constituyen la mayor parte de la estructura de un suelo (Fig 1.3). En orden de abundancia, los elementos más comúnmente encontrados en los minerales son: O > Si > Al > Fe > C > Ca > K > Na > Mg > Ti. Los minerales se dividen en primarios y secundarios; los primeros se encuentran constituidos principalmente por O y Si y forman silicatos de estructuras Si-O (grava y arena). Los minerales secundarios, provenientes de procesos de disolución y precipitación, son de suma importancia debido a su superficie de reacción, y a que sirven como depósitos de agua, nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere la parte activa de un suelo (arcillas) (Volke, et al., 2005).

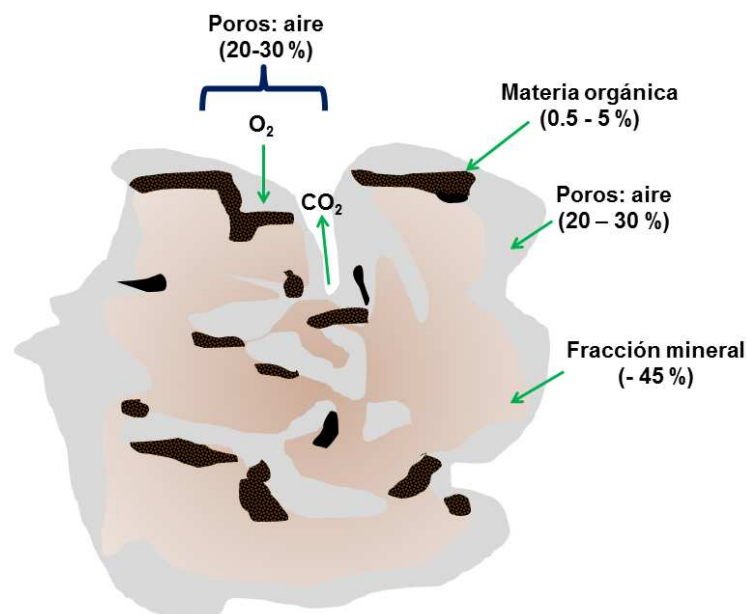


Figura 1.3 Esquema general de las fracciones que componen un suelo



Los suelos se clasifican, en función a su tamaño de partícula, en cuatro principales componentes: arcilla (tamaño de partícula menor a 0.002 mm), limo (0.002-0.05 mm), arena (0.05-2 mm) y grava (partículas mayores a 2 mm). Las cantidades relativas de cada tipo de partícula mineral determinan la textura de un suelo y tienen un impacto directo sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Miller 1994, Van Deuren et al. 2002).

### **1.3.2 Fracción orgánica.**

La materia orgánica del suelo, se define como la fracción orgánica que posee el suelo, excluyendo los residuos vegetales y animales sin descomponer. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, además de cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus. La fracción orgánica en un suelo puede ser muy variable: un suelo árido puede contener cerca de 0.5%, mientras que una turba puede tener alrededor de 95%; sin embargo, la mayoría de los suelos, en general, tiene un contenido de materia orgánica entre 0.5 y 5% (Volke et al., 2005).

La materia orgánica fresca (MF) es un componente importante para suministrarle alimentación y energía a la meso y macrofauna del suelo. La materia orgánica no húmica (MNH) es la principal fuente de energía y de carbono para los microorganismos del suelo. Sin embargo, desde el punto de vista físico-químico, es la materia orgánica húmica o humus (MH) la fracción orgánica más importante del suelo pues, al adquirir ésta propiedades coloidales le trasmite al suelo propiedades únicas (Jaramillo, 2002).

Si se piensa de manera práctica en la explotación sostenible del suelo, la materia orgánica puede considerarse como el principal componente sólido que posee este recurso natural, ya que de alguna manera se relaciona con casi todas las propiedades del mismo.

### **1.3.3 Fracción acuosa o de solución.**

Los espacios, o poros, que hay entre partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) del suelo, contienen diversas cantidades de dos componentes inorgánicos clave: el agua y el aire. El agua es el principal componente líquido de los suelos y contiene sustancias minerales, oxígeno ( $O_2$ ) y bióxido de carbono ( $CO_2$ ) en disolución, mientras que la fase gaseosa en los suelos está constituida por aire. Dependiendo



del contenido de humedad del suelo, los poros se encontrarán ocupados por agua o por aire (Fig. 1.3) (Volke et al., 2005).

En general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas (Sposito 1989).

## 1.4 Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son una de las principales fuentes de suministro para uso doméstico y para el riego en muchas partes del mundo. En muchos lugares en los que las precipitaciones son escasas e irregulares pero el clima es muy apto para la agricultura son un recurso vital y una gran fuente de riqueza, ya que permiten cultivar, productos muy apreciados en los mercados internacionales.

Las aguas subterráneas suele ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

En muchas ocasiones la situación se agrava por el reconocimiento tardío de que se está deteriorando el acuífero, porque como el agua subterránea no “es visible” el problema puede tardar en hacerse evidente.

### 1.4.1 Depuración

Los acuíferos tienen una cierta capacidad de autodepuración, mayor o menor según el tipo de roca y otras características. Las sustancias contaminantes, al ir el agua avanzando entre las partículas del subsuelo se filtran y dispersan y también son neutralizadas, oxidadas, reducidas o sufren otros procesos químicos o biológicos que las degradan. De esta manera el agua va “limpiándose”.

Cuando la estructura geológica del terreno facilita una zona amplia de aireación, los procesos de depuración son más eficaces. También es muy favorable la abundancia de arcillas y de materia orgánica. En cambio en los depósitos aluviales o las zonas





kársticas la purificación del agua es mucho más difícil y este tipo de acuíferos son mucho más sensibles a la contaminación.

Es muy importante, de todas formas, tener en cuenta que las posibilidades de depuración en el acuífero son limitadas y que el mejor método de protección es, por tanto, la prevención. No contaminar, controlar los focos de contaminación para conocer bien sus efectos y evitar que las sustancias contaminantes lleguen al acuífero son los mejores métodos para poder seguir disfrutando de ellos sin problemas.

Cuando un acuífero está contaminado y hay que limpiarlo el proceso es muy difícil y muy caro. Se han usado procedimientos que extraen el agua, la depuran y la vuelven a inyectar en el terreno, pero no siempre son eficaces y consumen una gran cantidad de energía y dinero.

### 1.5 Elementos Traza

Un elemento traza es un elemento presente a un nivel  $<0.1\%$  en materiales naturales como la litosfera; si las concentraciones son lo suficientemente elevadas, pueden ser tóxicos para los organismos vivos (Adriano, 1986). Los elementos traza incluyen los metales traza, metales pesados, metaloides (un elemento que tiene tanto propiedades metálicas como no metálicas, e.g., As y B), micronutrientes (elementos químicos necesarios en pequeñas cantidades para el crecimiento de la planta, i.e.,  $<50 \text{ mg g}^{-1}$  en la planta), y los traza inorgánicos (Twardowska, et al., 2006).

Los metales pesados son los elementos que tienen densidades mayores a  $5.0 \text{ g cm}^{-3}$ . Ejemplos de estos son Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, y Ni. La fuente de los elementos traza es el material parental (rocas), fertilizantes comerciales, materiales de encalado, biosólidos, aguas de riego, residuos de la quema del carbón, industria metalúrgica, emisiones de automóviles y otras.

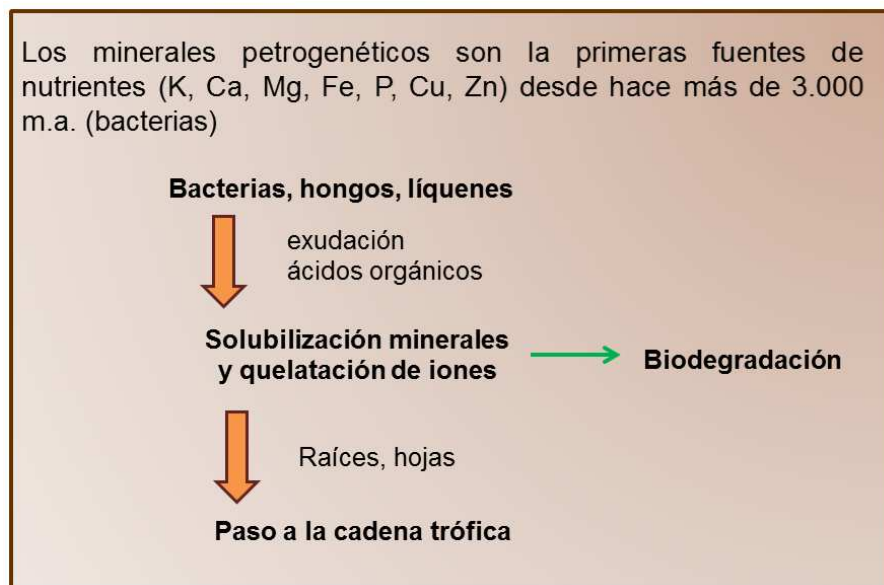
Un metaloide que cada vez preocupa más en el medio ambiente es el arsénico (As), el arsénico es un conocido cancerígeno humano. Beber agua contaminada con As ha sido ligado al cáncer, diabetes, y problemas cardiovasculares. La fuente de As en agua potable, particularmente As inorgánico, a menudo es de la intemperización de minerales en rocas y sólidos. El As total en rangos de suelo es de 0.1 a 97 ppm con una concentración media de 7 ppm para la superficie del suelo (Dragun, 1991). El arsénico se da principalmente en dos estados de oxidación, As(III) y As(V).

La liberación de cationes de una roca por meteorización (Fig. 1.4) depende de muchos parámetros, como antes se indicó, clima, topografía, capacidad de drenaje de la roca (permeabilidad), tiempo y particularmente la actividad biológica.



**Figura 1.4** Movilidad de elementos traza y si incorporación a los suelos FUENTE:

El papel de los microorganismos en la degradación de los minerales es muy importante, de hecho participan en los ciclos geoquímicos de los principales nutrientes y de muchos elementos traza en la mayor parte (Figura 1.5).



**Figura 1.5** El papel fundamental de los microorganismos en la transformación y degradación de los minerales FUENTE:



La geodisponibilidad de los elementos de las rocas y su aportación al suelo es insignificante en relación con las derivadas de las acciones antropogénicas. Los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de la edafización de una roca se concentran, pero en general sin rebasar los umbrales de toxicidad, y aunque así fuera, estos metales se encuentran en formas estables y por tanto disponibles.

De los distintos tipos de rocas, las ultrabásicas, como las periodititas, presentan altos contenidos de metales pesados (Cr, Ni, Cu y Mn). Las menores concentraciones de metales pesados se encuentran en rocas ígneas ácidas y en las sedimentarias (areniscas y calizas). Los porcentajes más altos de metales traza en los suelos, heredados de la roca madre, se dan para Cr, Mn y Ni, mientras que Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades y son mínimos los contenidos en As, Cd y Hg. Las principales concentraciones anómalas de metales pesados provienen fundamentalmente de las menas metálicas (sulfuros, óxidos). La explotación y extracción de metales produce anualmente millones de toneladas de residuos, la mayoría con pirita y otros sulfuros, cuya oxidación libera grandes cantidades de metales pesados al ambiente, y en particular a los suelos. En estas áreas las capas superiores de los suelos presentan concentraciones elevadas de Cu, Ni, As, Se, Cd, Fe, etc.,

## CAPITULO 2

### *LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO*

#### **Introducción**

El suelo es un recurso vital, éste es el soporte físico sobre el que se asientan la mayoría de los seres vivos. También es la fuente primordial de materias primas y constituye uno de los elementos básicos del medio natural. Desde hace siglos la humanidad ha utilizado el suelo para desarrollarse y conseguir mejorar sus condiciones de vida. Sobre él se realizan todos los procesos de producción del hombre, como la agricultura, la industria, las infraestructuras urbanas, etc. Además, el suelo es un componente muy específico de la biosfera porque actúa como amortiguador natural controlando el transporte de elementos y sustancias químicas a



la atmósfera, la hidrosfera y la biota. Por tanto, el mantenimiento de las funciones ecológicas del suelo es responsabilidad de la humanidad (abata-Pendias, A. y Pendias, H., 1992d). Éste constituye uno de los medios receptores de la contaminación más sensibles y vulnerables

Antes de la década de los 70 se hablaba de la contaminación del aire y del agua, pero al suelo se le consideraba con una capacidad de autodepuración casi infinita. La sensibilidad mundial comenzó a cambiar a partir de la declaración de la “Carta Europea de Suelos” desarrollada por la Comunidad Europea en 1972, la cual define al suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad sobre el que viven hombres, animales y plantas, lo califica como un recurso limitado fácilmente destruible y manifiesta que debe ser protegido contra la erosión, la contaminación, el daño que puede causar el desarrollo urbano, y las prácticas agrícolas y silvícolas, para acabar afirmando que los Gobiernos y personas con autoridad deben impulsar medidas específicas para planificar y administrar los recursos del suelo. Pero fue en el año 1992, en la Cumbre de Río, donde se reconoció la importancia de la protección de los suelos y de sus usos potenciales en el contexto de un desarrollo sostenible, en particular contra la contaminación procedente de acciones o actividades de origen antrópico (Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, 2005). (Solano, 2005)

La contaminación del suelo está asociada con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables. Por tanto, la contaminación del suelo consiste en la introducción de elementos extraños al sistema suelo o la existencia de un nivel inusual de uno propio que, por sí mismo o por su efecto sobre los restantes componentes, genera un efecto nocivo para los organismos del suelo, sus consumidores, o es susceptible de transmitirse a otros sistemas (Martínez Sánchez et al., 2005).

El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede resultar difícil establecer a partir de qué momento, un mismo elemento deja de ser beneficioso o estoico, para pasar a tener la calificación de contaminante (Solano, 2005).

Los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema (Genou et al., 1992; Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C., 1994) son:

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo. Se ve afectado el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro.



- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento de los microorganismos del suelo, o bien alteración de su diversidad, lo que hace aumentar la fragilidad del sistema.
- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos, con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos en la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Disminución de las funciones de soporte de actividades de ocio. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.

## 2.1 Tipos de Contaminación: Contaminación Local y Contaminación Difusa

El sitio de origen de los contaminantes se denomina *fuentes*, esta puede ser potencial o activa dependiendo si está o no generando lixiviados. La sola presencia de elementos o sustancias contaminantes en una fuente no implica que estos estén migrando hacia el acuífero. Una fuente inactiva, como un relleno sanitario, es potencial, ya que pueden darse las condiciones para que posteriormente si pueda generar lixiviados.

A menudo se distingue entre la contaminación edáfica proveniente de fuentes claramente delimitadas (contaminación local o puntual) y la causada por fuentes difusas (Martínez Sánchez et al., 2005). Las fuentes también se catalogan por su geometría, éstas pueden ser lineales, puntuales o difusas.

Se diferencian las fuentes por su temporalidad si constantemente producen solutos se les denomina continuas. Si la producción está supeditada a la presencia de excesos de humedad que favorezcan infiltraciones serán intermitentes. Cuando ocurre una contingencia (accidentes químicos, derrames) que produce percolaciones, se produce una entrada única al sistema acuífero, entonces se dice que la fuente es un pulso.

Las fuentes de contaminación que pueden afectar los sistemas de agua subterránea pueden ser "*puntuales y no puntuales*". Se consideran *fuentes puntuales* a las fábricas, refinerías, tintorerías, gasolineras, aeropuertos, tiraderos de basura, tanques enterrados, así como derrames que suceden al transportar compuestos químicos, entre otras. Como ejemplos de fuentes *no puntuales* -difusas- se consideran la aplicación de plaguicidas en zonas agrícolas, los canales de drenaje, los sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos, entre otros.

En general se estima que la mayoría de los contaminantes se encuentran en forma líquida y que migran en fase acuosa interactuando a su paso con las partículas del suelo. Es necesario considerar que para algunos compuestos volátiles la migración en forma de vapor es igual o más importante que el desplazamiento en forma líquida. Además existen una gran cantidad de desechos en estado sólido, que al descomponerse e infiltrarse el agua de lluvia a través de ellos, producen lixiviados.

Dado que existen procesos antropogénicos y naturales las fuentes también se clasifican por su origen de la misma manera. El origen es importante dadas las implicaciones que tiene en los mecanismos de transporte y de ser el caso, en los programas de remediación.

<b>Actividad</b>	Activa o potencial
<b>Origen</b>	Natural o antropogénico
<b>Geometría</b>	Lineal, puntual o difusa
<b>Temporalidad</b>	Constante, intermitente, pulso

**Cuadro 2.1** Clasificación de Fuentes

La cantidad de contaminante, *carga*, es un aspecto fundamental en la caracterización de las fuentes, ésta no solo depende de la cantidad de material que contiene el elemento sino de la concentración del mismo. Un gran volumen con una muy baja concentración puede equivaler a poco volumen con muy alta concentración. La relevancia de la carga se incrementa cuando se hace referencia a la toxicidad del contaminante y a sus valores normativos.

### **2.1.1 Contaminación Local.**

La contaminación local o puntual (lugares o instalaciones contaminados) aparece en las zonas que rodean a la fuente contaminante, en las que existe una relación directa con el origen de la contaminación. Va unida generalmente a la minería, las instalaciones industriales, los vertederos y otras instalaciones, tanto en funcionamiento como tras su cierre. Dichas prácticas pueden suponer un riesgo tanto para el suelo como para el agua (Martínez Sánchez et al., 2005).

La contaminación local es un problema reciente. Aunque las zonas más extensas y afectadas se concentran alrededor de regiones muy industrializadas, existen terrenos contaminados por todo el continente y suele afectar a zonas de alta densidad urbana y con larga tradición de industrias pesadas. También son importantes las fugas de lixiviados de antiguos vertederos (Solano, 2005).



**Figura 2.1** Contaminación local y difusa del suelo. Fuente: AEMA, 2002.

### 2.1.2 Contaminación Difusa.

Generalmente la contaminación difusa es generada por el transporte de sustancias contaminantes, tanto solubles como particuladas, a lo largo de amplias zonas con frecuencia alejadas de la fuente de origen. Pueden ser metales pesados, sustancias acidificantes, sobrecarga de nutrientes (eutrofización), etc. Si se exceptúa la acidificación, no existe una contaminación difusa que afecte de manera extendida a todos los suelos, ésta se encuentra asociada a algunos usos del suelo. Así, en determinadas zonas restringidas, la contaminación puede ser elevada (en las zonas urbanas y en los complejos industriales), originada tanto por fuentes difusas (transporte por carretera) como por otras localizadas (vertederos). En zonas agrícolas, el principal problema puede ser la contaminación difusa (Martínez Sánchez et al., 2005).

Los costos de la contaminación difusa del suelo no se manifiestan tanto en lo relacionado directamente con el suelo como en las consecuencias de la menor capacidad de amortiguamiento del suelo. Aunque todavía no se ha estimado el costo exacto, se sabe que la eliminación de compuestos orgánicos, plaguicidas, nutrientes y metales pesados presentes en el agua resulta muy costosa (Solano, 2005).

### 2.1.3 La movilidad de los contaminantes y los parámetros geodáficos



La movilidad de un metal depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo tales como pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de la arcilla, etc. Así, no todos los cationes de cambio están igualmente disponibles, sino que depende del mineral o minerales de los que están formando parte como complejo de cambio. No será igual si se encuentran en una esméctica o en una illita. Cuando el metal está precipitado, no se comportará igual si lo hace como carbonato, sulfato o fosfato. Tampoco será lo mismo que el metal se encuentre formando parte de un sulfuro (relativamente oxidable y solubilizable) que de un silicato (prácticamente resistente en todos los medios).

En general, la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Por eso la presencia de altas concentraciones en el horizonte superior decrece drásticamente en profundidad cuando la concentración es antrópica. Esto sucede precisamente porque la disponibilidad de un elemento depende también de las características del suelo en donde se encuentra. Los parámetros geodáficos llegan a ser esenciales para valorar la sensibilidad de los suelos a la agresión de los contaminantes; en concreto:

- a) pH. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto As, Mo, Se, y Cr, que son más móviles a pH alcalino.
- b) Textura. Los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el acuífero.
- c) Mineralogía de arcillas. Cada mineral de la arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa de un filosilicato, mayores son sus posibilidades de adsorber metales (Cuadro 2.2)

**Cuadro 2.2** Área superficial típica de minerales del suelo (Bourg, 1995).

Minerales del suelo	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
Caolinita	7-30
Illita	65-100
Montmorillonita	700-800
Óxidos de manganeso	30-300
Geotita	40-80
Carbonatos / arenas	0,5-5



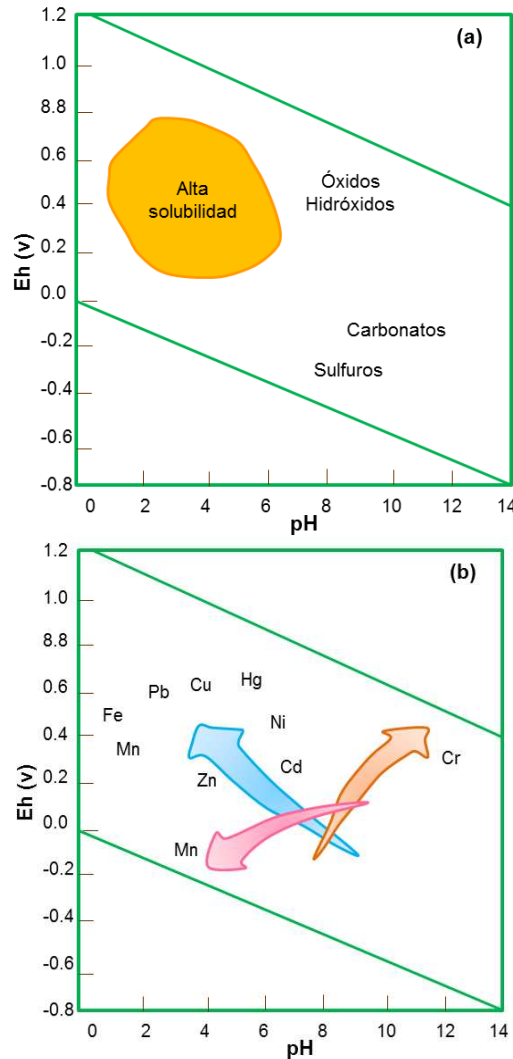
Este poder de adsorción será máximo en el punto de carga cero superficial, cuando su competencia con los  $H^+$  es mínima, lo que se consigue a diferentes pH según el mineral (Sposito, 1989) (Cuadro 2.3). Sin embargo la importancia de los minerales de la arcilla como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes más competitivos (Galán, 2000).

**Cuadro 2.3** Punto cero de carga (PZC) superficial (Sposito, 1989)

Mineral	pH
Cuarzo/sílice	2-3
Caolinita	4.0-4.5
Geotita	7.0-8.0
Hematita	8.0-8.5
Gibbsita	9.0-9.5
Humus	4.0-4.5

- d) Materia orgánica. Reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que queden estabilizados, como el caso del Cu, o formen quelatos también muy estables, como puede pasar con el Pb y Zn. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia de la toxicidad.
- e) Capacidad de cambio. El poder de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menos valencia, menos frecuentemente quedan retenidos. Respecto a los minerales de la arcilla, la retención es mínima para los minerales del grupo caolín, baja para las illitas, alta para las esméctitas y máxima para las vermiculitas.
- f) Condiciones redox. El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Eh-pH (Fig. 2.2) se utilizan para mostrar la estabilidad de los compuestos metálicos y proporcionan un método fácil para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un cambio de las condiciones ambientales.
- g) Carbonatos. La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los altos pH, y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados. El Cd y otros metales tienden a quedar adsorbidos por los carbonatos.
- h) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula, tienen una alta capacidad

sorcitiva para metales divalentes, especialmente Cu y Pb y en menos extensión Zn, Co, Cr, Mo, Ni, y también As.



**Figura 2.2** Solubilidad de metales pesados en función del pH y del Eh (Föstener, 1987)

**NOTA** Figura 2.2: En ausencia de materia orgánica disuelta o sólida. (a) los principales minerales controlan la solubilidad de los metales pesados; (b) tendencia de incremento de la solubilidad.

## 2.2 Principales Fuentes de Contaminación

El impacto de la minería sobre el ambiente y la salud se relaciona con la composición del mineral, el tipo de explotación, el proceso de beneficio, la escala de las operaciones y las características del entorno (Volke, 2005).

Otras fuentes, que generan la contaminación por metales y metaloides (Csuros y Csuros 2002) y que no siempre se toman en cuenta son:



- Drenaje pluvial: en muchas ocasiones el drenaje pluvial de las ciudades puede contener muchos metales, dependiendo del tipo de camino y material de construcción de los mismos, de la cantidad de tráfico, planeación urbanística y uso de suelo.
- Descargas y drenajes industriales: en México, existe normatividad que regula las descargas de industrias; sin embargo, ciertas industrias pueden generar residuos con concentraciones mayores de metales por las características de sus procesos.
- Drenaje doméstico: transporta metales desechados por el metabolismo y lixiviados de los materiales de construcción de las tuberías (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Bo y As). Los tratamientos convencionales para aguas residuales, remueven hasta 50% de los metales contenidos, dejando una carga considerable de metales en el agua tratada, además de concentrar los metales removidos en los lodos de tratamiento.
- Rellenos sanitarios: el lixiviado que se produce en los rellenos sanitarios normalmente contiene metales como Cu, Zn, Pb y Hg.
- Quema de combustibles fósiles: es la principal fuente de metales hacia la atmósfera y fuente potencial de contaminación de cuerpos superficiales de agua.

### 2.2.1 Contaminación por Metales Pesados

Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a  $5 \text{ g/cm}^3$  cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados (García, I. y Dorronsoro, C., 2005).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital; pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn.



- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos; son, entre otros: Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl (Solano, 2005-5).

La movilidad de los contaminantes depende de varios factores, uno de los más importantes es su *solubilidad*. A medida que la solubilidad se incrementa es más probable que pueda migrar hacia sistemas acuíferos. Si existe agua en la fuente, el *soluta* se incorporará a ésta y se podrá desplazar desde la fuente. Si no hay humedad suficiente en la fuente, los contaminantes no se solubilizan y por lo tanto no podrán moverse. De allí que puedan ser más "riesgosas" fuentes con material líquido que sólido.

En el caso de los metales pesados, el grado de disolución se cuantifica por su producto de solubilidad,  $K_{ps}$  (indica la solubilidad de un compuesto iónico), el cual presenta valores bajos para cuando los elementos se encuentran en forma de compuestos inorgánicos. Las condiciones REDOX y el pH son los principales factores que controlan el grado de disolución de estos elementos en el agua subterránea.

## 2.2.2 Propiedades de los Metales

Los elementos de la tabla periódica se encuentran divididos por una marcada línea, en metales (izquierda) y no metales (derecha). La mayoría de los elementos que limitan con esta línea divisoria son metaloides o semi-metales. Los metales son sustancias con características de brillo y que son buenos conductores de calor y electricidad; con excepción del mercurio, todos los metales son sólidos a temperatura ambiente. Son más o menos maleables (formación de láminas) y dúctiles (formación de alambres). La mayoría posee propiedades de dureza, con excepción de los alcalinos, que son muy suaves. Químicamente, estos tienden a perder electrones para formar iones positivos (cationes) (Csuros y Csuros 2002).

Según Csuros y Csuros citados por Volke (2005) un no metal es un elemento que no exhibe las características de un metal, la mayoría de los no metales son gases o sólidos. Los metaloides o semi metales son elementos que presentan propiedades de ambos grupos. En muchos aspectos, los metaloides se comportan como no metales, química y físicamente; sin embargo, en su propiedad física más importante, la conductividad eléctrica, se parecen a los metales. Los metaloides tienden a ser semiconductores, pero conducen la electricidad en menor grado que los metales. En el cuadro 2.4 se muestran las diferencias entre las características de los metales y no metales.

Aunque el término metal pesado es usado comúnmente en materia de contaminación ambiental, su uso en éste y otros contextos ha causado confusión. Dentro de esta clasificación hay elementos (no metales) con propiedades químicas diferentes. El término también se define con base en otras propiedades fisicoquímicas (peso y número atómico, reacción con otros elementos) y toxicológicas, por lo que resulta inconsistente.

**Cuadro 2.4** Principales características de los metales y no metales.

METALES	NO METALES
<b>Propiedades físicas</b>	
Buenos conductores de electricidad	Malos conductores de electricidad
Dúctiles	No dúctiles
Maleables y lustrosos	No maleables
Sólidos	Sólidos, líquidos o gases
Puntos de fusión altos	Puntos de fusión bajos
Buenos conductores de calor	Malos conductores de calor
<b>Propiedades químicas</b>	
Reaccionan con ácidos	No reaccionan con ácidos
Forman óxidos básicos: reacciona con ácidos	Forman óxidos ácidos; reacciona con bases
Forman cationes	Forman aniones
Forman Haluros iónicos	Forman haluros covalentes

Fuente: Csuros y Csuros 2002.

### 2.2.3 Principales Fuentes de Contaminación por Metales Pesados.

En los suelos, los metales son una parte de los minerales del suelo o también se encuentran como complejos particulados de diferentes formas (Novotny, V., 1995). Los metales pesados pueden acumularse en el suelo tanto a partir de procesos naturales como a partir del desarrollo de un amplio grupo de actividades antrópicas. Uno de los procesos naturales es la intemperización de la roca a partir de la cual se formó el suelo y los minerales; por otro lado las fuentes antrópicas van desde la agricultura (fertilizantes, abonos animales, plaguicidas, etc.), la metalurgia (minería, fundición, manufactura metálica, etc.), la producción de energía (gasolinas con plomo, manufactura de pilas, plantas de energía, etc.), y la microelectrónica hasta los depósitos de residuos (Volke, 2005).

Las principales fuentes antropogénicas de metales pesados en suelos, además de las comentadas anteriormente relacionadas con la minería, pueden ser:



- Actividades agrícolas: riego, fertilizantes inorgánicos, pesticidas, estiércol, enmiendas calizas y, sobre todo, lodos residuales de depuradoras.
- Generación de energía eléctrica: la combustión de carbón es una de las principales fuentes de depositación de metales en el suelo. Las centrales térmicas que usan petróleo pueden ser fuentes de Pb, Ni y V.

**Cuadro 2.5** Disponibilidad relativa de los metales retenidos en el suelo por las plantas.

Forma de metal en el suelo	Movilidad-Disponibilidad relativa
Iones simples o complejos en solución	Fácil
Cationes de cambio	Media
Metales quelatados por compuestos orgánicos	Menos disponibles
Metales adsorbidos sobre partículas del suelo	Menos disponibles
Compuestos metálicos precipitados sobre partículas del suelos	Disponibles cuando se disuelve el compuesto
Metales asociados o incorporados a una matriz biológica	Disponibles cuando se descompone
Metal asociado o formando parte de la estructura de un mineral	Disponibles cuando se meteoriza/destruye el mineral

La contaminación por metales pesados a menudo se originan de la manufactura y el uso de distintos productos sintéticos (e.g., pesticidas, pinturas, y baterías), pero estos químicos también se pueden encontrar naturalmente.

### 2.2.3.1 Deposición atmosférica.

En los países industriales, la deposición atmosférica suele ser una importante fuente de metales para los suelos. De hecho en muchas regiones constituye la principal fuente de entrada de metales en suelos agrícolas y plantas (Haygarth y Jones, 1992) por la deposición superficial sobre las hojas o la cantidad y translocación de los metales transportados por el aire, que entran en los ecosistemas en forma particulada (Adriano, D.C., 2001e).

### 2.2.3.2 Combustión de combustibles fósiles.



La quema de combustibles fósiles da como resultado la dispersión de un amplio número de metales pesados, como son Pb, Cd, Cr, Zn, As, Sb, Se, Ba, Cu, Mn, U y V, sobre una gran área, aunque no todos esos elementos están presentes en concentraciones importantes en todos los tipos de gasolina y petróleo. La combustión de gasolinas con plomo ha sido la mayor fuente de este metal en el medioambiente y ha afectado a una gran proporción de suelos de la superficie terrestre (Alloway, B. J., 1995b).

### **2.2.3.3 Industrias metalúrgicas.**

Las principales industrias contaminantes son las fábricas de hierro y acero, que emiten metales asociados a las menas de Fe y Ni. La fabricación de baterías produce cantidades considerables de Pb. las industrias de productos químicos, fármacos, pigmentos y tintes, el curtido de pieles, etc. producen distintos tipos de contaminantes. En general las áreas altamente industrializadas incluyen As, Cd, Cr, Hg, Fe, Ni, Pb y Zn.

Las industrias metalúrgicas contribuyen a la contaminación del suelo de distintas formas (Solano, 2005):

- Por emisión de aerosoles y polvo que son transportados por el aire y eventualmente depositados sobre los suelos y vegetación;
- Por efluentes líquidos que pueden contaminar los suelos en periodos de inundación.
- Por la creación de vertederos de residuos en los que los metales pueden ser corroídos y lixiviados al suelo.

Muchos metales pesados se utilizan en aleaciones y aceros, por ello tanto la manufactura de esos materiales, como su fabricación o reciclaje pueden derivar en contaminación medioambiental (Alloway, B. J., 1995b).

### **2.2.3.4 Industria microelectrónica.**

Debido a que un amplio número de metales pesados, entre los que se incluyen: Cu, Zn, Ag, Au, Pb, Sn, Y, W, Cr, Se, Sm, Ir, In, Ga, Ge, Re, Tb, Co, Mo, Hg, Sb, As y Gd (MAFF, 1986), se utilizan en la manufactura de semiconductores, cables, contactos y otros componentes electrónicos puede existir contaminación medioambiental y del suelo procedente de dicha manufactura (Solano, 2005-5).



### **2.2.3.5 Industrias químicas.**

Otras fuentes importantes de contaminación de los suelos por metales pesados son las manufacturas y/o usos y eliminación de, entre otros, pilas, pinturas y pigmentos, catalizadores, polímeros estabilizantes, plásticos, productos médicos, aditivos en aceites y lubricantes, etc. (MAFF, 1986; Alloway, B. J., 1995b).

### **2.2.3.6 Eliminación de residuos.**

Aproximadamente el 10% de la basura está compuesta por metales, su enterramiento puede contaminar las aguas subterráneas, mientras que la incineración puede contaminar la atmósfera al libera metales volátiles y como consecuencia contaminar los suelos. Por otra parte, las basuras no controladas obviamente son una importante fuente de contaminantes para el suelo y las aguas superficiales.

La acumulación y eliminación de residuos domésticos, municipales e industriales puede llevar a la contaminación del suelo por metales pesados de distintas maneras (Alloway, B. J., 1995b).

El mismo autor menciona que los depósitos de residuos sólidos municipales sobre el suelo puede ocasionar la dispersión de metales pesados, como Cd, Cu, Pb, Sn y Zn en el suelo, aguas subterráneas y superficiales si el citado depósito no se efectúa de la forma correcta en un lugar preparado y destinado para tal fin. Por otra parte la incineración de residuos puede conducir a la emisión de aerosoles de metales (Cd, Pb) si no se dispone del equipo de control de contaminación adecuado.

## **2.3 Contaminación de Suelos por Metales Pesados**

La contaminación por metales pesados resulta por la eliminación de desechos con concentración de metales. Cuando los efectos adversos de grandes emisiones de metales pesados en los ecosistemas, se dan a notar por la severidad en la cual pueden ser interrumpidos los procesos microbiológicos del suelo y de los microorganismos por las elevadas concentraciones de metales pesados.

La contaminación extrema por metales en la cercanía de las fundidoras claramente causa efectos visibles como la acumulación de capas profundas de materia orgánica en la superficie del suelo a través de la inhibición de la actividad de los microorganismos del suelo y la fauna del suelo (Freedman and Hutchinson, 1980).





Cuando las medidas limitan las tasas de carga de metales de suelos debido al uso de lodos de drenaje en la agricultura, esos límites se enfocan en la protección contra los efectos negativos en los cultivos, en animales de pastoreo en tierras a las cuales los lodos de drenaje han sido aplicados para proteger al hombre de la exposición a los metales a través de la cadena alimenticia.

El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogenéticos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana ha incrementado el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables (García, I. y Dorronsoro, C., 2005), de hecho la entrada de metales pesados en el suelo ha aumentado desde que comenzó la industrialización (Han et al., 2003).

La contaminación del suelo por metales pesados es motivo de gran preocupación por su toxicidad. Las fuentes de metales pesados son el polvo del tráfico emitido a la atmósfera, residuos de lodos de drenaje y otros materiales de desecho descargados al suelo, minerales, principalmente fósforo, fertilizantes y algunos químicos para protección de plantas (Fergusson, 1990). Niveles elevados de metales pesados en suelos pueden llevar a su absorción por las plantas, la cual depende no solo de los contenidos de metales pesados en suelos si no también está determinado por el valor del pH del suelo, y contenidos de materia orgánica y arcilla, y está influenciada por la fertilización (Fytianos et al., 2001).

Los metales pesados, incluyendo al plomo, mercurio, cadmio, cromo, arsénico, y selenio, constituyen una de las principales categorías de contaminantes inorgánicos.

**Cuadro 2.6** Ejemplos adicionales de toxicidad en órganos objetivos.

Órgano	Toxico	Mecanismo	Toxicidad
<b>Corazón</b>	Fluorocarbonos (Freón)	-Sensibilidad del corazón a la epinefrina	Disminución de la frecuencia cardíaca, contractilidad y conducción
	Monóxido de carbono (CO)	-Interferencia con la energía metabólica	Infarto al miocardio, aumenta o disminuye la frecuencia cardíaca
	Cobalto (Co)	-Compite con el $Ca^{2+}$	Fallas de corazón
	Plomo (Pb)	-Mutaciones de espermatozoides	Disminución de la fertilidad masculina, aumento de abortos espontáneos en



<b>Testículos</b>	Desulfuró de carbono (CS <sub>2</sub> )	-El SNC afecta a la eyaculación	mujeres Disminuye el contenido de espermatozoides
<b>Ovario/ útero</b>	Humos de soldadura Hidrocarburos poliaromáticos (HPA)	- Se desconoce -Se desconoce	Aumento de abortos espontáneos
<b>Ojos</b>	Busulfan (agente quimioterapéuticos) Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	-Altera la mitosis en las células del cristalino -Produce atrofia óptica	Formación de cataratas Impedimento visual permanente, ceguera

**Cuadro 2.7 Metales tóxicos de interés**

Muy tóxicos y fácilmente disponibles				Contaminantes prioritarios según la EPA				Metales y no metales que aparecen en concentración superior a la normal por causas antrópicas	
As	Pd	Zn	Tl	Sb	Pb	Cr	Hg	Ag	Pb
Co	Ag	Sn	Pb	As	Hg	Cu	Tl	As	Sb
Bi	Cd	Se	Te	Be	Ni	Zn		Cu	Sn
Ni	Pt	Cu	Hg	Cd	Se			Hg	Zn
Sb								Ni	

Fuente: Swoáñez Calvo, M. 1999b.

### 2.3.1 Elementos Metálicos en Suelos

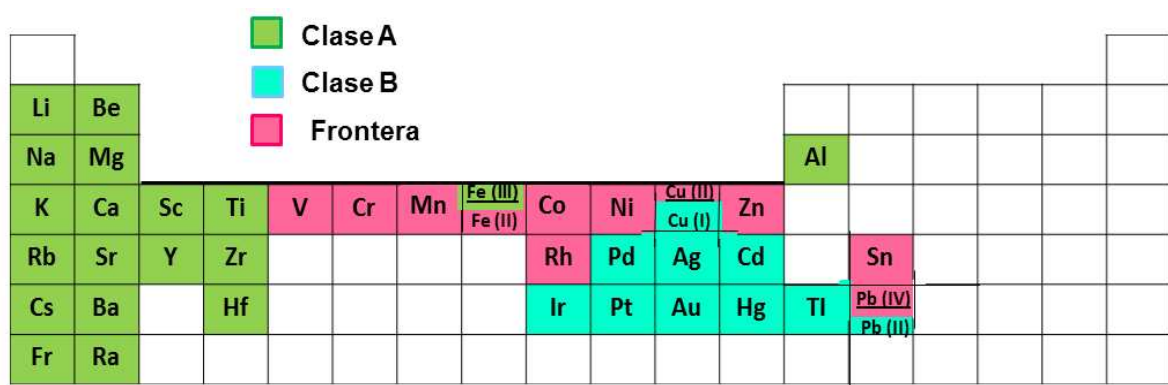
Los elementos metálicos se clasifican de acuerdo a dos características importantes respecto a su comportamiento biogeoquímico en suelos y sistemas acuáticos. El primero de estos es el potencial iónico (PI), el cual es la valencia del catión de un metal dividido por su radio iónico en nanómetros. Los cationes metálicos con  $PI < 30 \text{ nm}^{-1}$  tienden a encontrarse en soluciones acuosas circumneutrales (agua con un ph de 5.5 a 7.4) como especies químicas solvatadas (libres de cationes); los de  $30 < PI < 100 \text{ nm}^{-1}$  tienden a hidrolizarse fácilmente en aguas circumneutrales; y las  $PI > 100^{-1}$  tienden a encontrarse como oxianiones. Como ejemplos de estas tres clases, considere al  $\text{Na}^+$  ( $PI=9.8 \text{ nm}^{-1}$ ),  $\text{Al}^{3+}$  ( $PI=56 \text{ nm}^{-1}$ ), y  $\text{Cr}^{6+}$  ( $PI=231 \text{ nm}^{-1}$ ).

Metales trivalentes, por otro lado, siempre tienden a ser hidrolizados [e.g.,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , y  $\text{Mn}^{3+}$  ( $PI= 46 \text{ nm}^{-1}$ )], y tetravalente o metales con valencias más altas tienden a ser

oxianiones. Las especies de metales solubles en aguas circumneutrales son por lo tanto libres de cationes o libres de oxianiones, mientras que los metales que hidrolizan tienden a precipitar como óxidos insolubles o hidróxidos. Así, estando a la mitad del rango de PI (30-100 nm<sup>-1</sup>) es la firma de los elementos metálicos que se espera no sean solubles en un pH circumneutral.

La segunda característica importante de los elemento metálicos es su comportamiento de *Clase A* o *Clase B*. Un catión metálico es Clase A si (1) tiene baja polaridad (una medición fácil con la cual los electrones es un ion pueden sacar fuera de su núcleo) y (2) estos tienden a formar complejos más fuertes con ligandos que contienen O<sup>-</sup> [e.g., carboxilatos (COO<sup>-</sup>), fosfatos, o una molécula de agua] que con ligandos que contienen N<sup>-</sup> o S<sup>-</sup>. Un metal es Clase B si tiene características opuestas. Si un metal no es Clase A ni Clase B, este es llamado límite.

Los metales de Clase B son los metales pesados Ag, Cd, Hg, y Pb, mientras que los metales límite son los metales transitorios Ti a Zn, junto Zr, Mo, y Sn, cada uno de ellos se puede comportar como Clase A o Clase B, dependiendo de su valencia y la vinculación con el medio ambiente local (estereoquímica). Todos los otros metales son Clase A. Los metales de Clase A tienden a formar fuertes complejos hidrofílicos (afinidad por el agua) con ligaduras en soluciones acuosas a través del enlace iónico o electrostático, mientras que los metales de Clase B tienden a formar fuertes complejos lipofílicos (afinidad por los lípidos) con ligaduras en soluciones acuosas a través de más enlaces covalentes.



**Figura 2.3** Metales clasificados como Clase A (Duros), Clase B (Suaves), y Frontera (metales intermedios).

**Nota:** El Cobre y el Plomo Pueden ser Clase B o Frontera, dependiendo si se encuentran en forma de Cu(I) o Cu(II) y Pb (II) o Pb (IV), respectivamente. El Hierro puede ser Clase A o Frontera, Si se encuentra como Fe (III) o Fe (II).



Si un metal tiende a hidrolizar en soluciones acuosas o tiene características de unión covalente, es muy probable que sea toxico, mientras que si tienden a ser solvatados en una solución acuosa y tiene características de unión iónicas o electrostáticas, no es tan probable que sea toxico. La toxicidad está asociada con cationes metálicos insolubles y con los que tienden a formar enlaces covalentes en complejos con ligaduras.

La primera propiedad evidentemente refleja baja abundancia en sistemas acuáticos y, por lo tanto, la no disponibilidad de un elemento metálico como evolución de la vida, mientras que la segunda propiedad es contraria a la relativamente frágil unión de los cationes metálicos que caracterizan a la mayoría de los procesos bioquímicos.

En efecto, los metales del límite se vuelven tóxicos cuando se desplazan a los metales de la Clase A de zonas de uniones esenciales en las biomoléculas, uniendo estas zonas más fuertemente, y los metales de Clase B siempre son tóxicos, simplemente porque pueden desplazar a los metales del límite (los cuales a menudo sirven como cofactores en enzimas) o zonas de uniones esenciales de metales de Clase A través de mecanismos de uniones tenaces. Las perturbaciones humanas de los ciclos biogeoquímicos de los metales han aumentado las concentraciones de metales tóxicos en el suelo y el agua (Twardowska, et al., 2006).

## **2.4 Movilización de Metales Pesados en el Suelo.**

Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos pero también pueden moverse en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli et al., 2004).

Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida (Solano, 2005-5). Dicha redistribución se caracteriza por una rápida retención inicial y posteriores reacciones lentas, dependiendo de las especies del metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo (Brummer et al., 1988; Han y Banin, 1999; Han et al., 2003).

La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y difiere de si su origen es natural o antrópico y, dentro de este

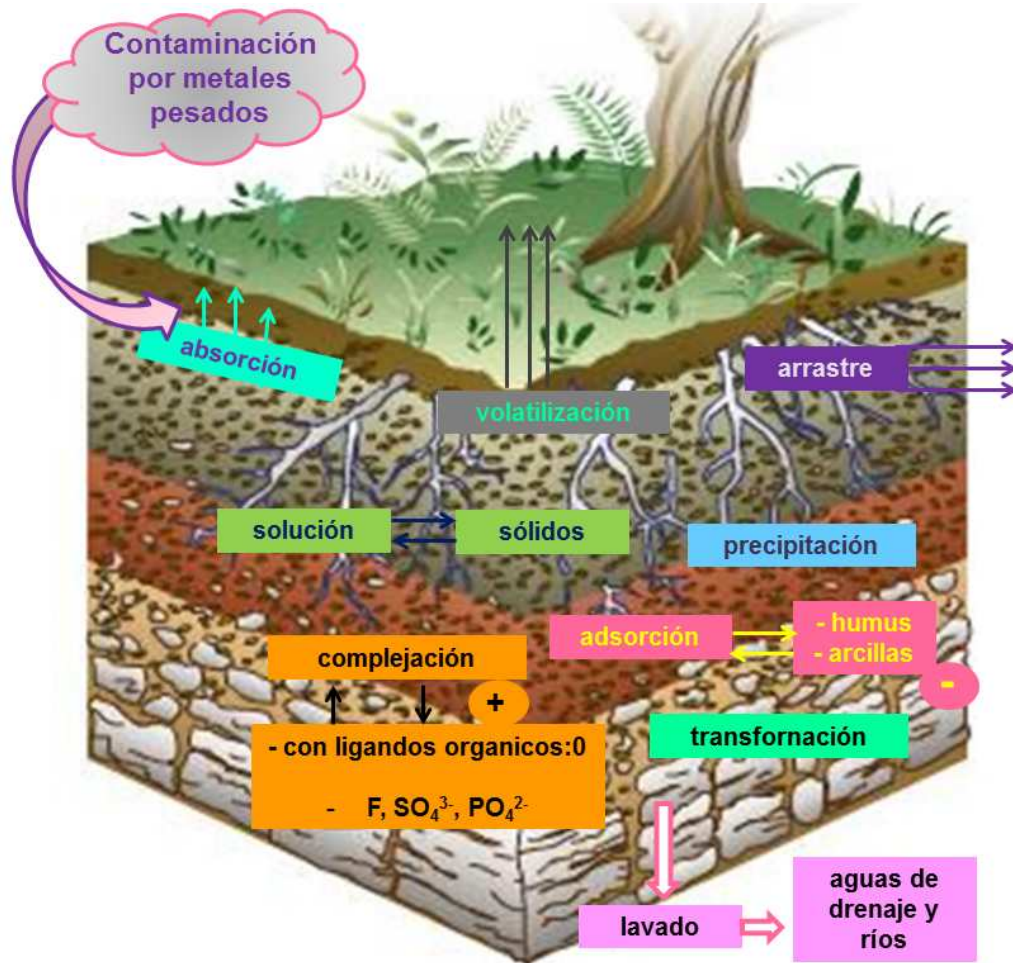


último, al tipo de fuente antrópica (Solano, 2005). Según Sauquillo, 2003 los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son:

- Características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, etc.
- Naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición.
- Condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad, etc.

La movilización es relativa a todos estos factores pero especialmente a aquellos que afectan a la transferencia desde fases sólidas a líquidas. Los mecanismos por los cuales los elementos traza de los suelos contaminados pueden ser movilizados son (Alloway, B. J., 1995c):

- Acidificación Resultado de la oxidación de sulfuros minerales y precipitados y de fertilizantes de  $\text{NH}^4$ , por la fijación biológica de nitrógeno, por precipitación atmosférica ácida ( $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ ) sobre los suelos, por descomposición de materia orgánica, por agotamiento de bases por lixiviación y por vertidos de contaminantes ácidos.
- Cambios en las condiciones redox. Condiciones oxidantes pueden causar la oxidación y disolución de sulfuros insolubles. A la inversa, condiciones reductoras pueden conducir a la disolución de óxidos y a la liberación de sus elementos traza coprecipitados en la solución. Fortísimas condiciones reductoras también darán lugar a la precipitación de sulfuros insolubles de elementos traza (Solano, 2005).
  - Complejación de especies metálicas con ligandos orgánicos. Los ligandos son constituyentes químicos que se combinan con los metales en un complejo químico (Novotny, V., 1995).
- Cambios en la composición iónica de la solución del suelo, que pueden tener un marcado efecto en la adsorción de elementos traza y su incorporación en complejos inorgánicos solubles e insolubles. Hay cuatro tipos de efectos: competición por los sitios de adsorción; formación de complejos solubles (con aniones como  $\text{Cl}_2^-$  y  $\text{SO}_4$ ); formación de compuestos insolubles como  $\text{Pb}(\text{PO})_5$   $4$   $3\text{Cl}$ ; efectos de fuerza iónica, de manera que incrementos en la fuerza iónica de la solución del suelo como resultado de la contaminación, aplicación de fertilizantes o salinidad puede conducir a una adsorción reducida y a la desorción de metales de lugares de la superficie.



**Figura 2.4** Dinámica de los metales pesados en el suelo. Fuente: Modificado de García, I. y Donrronsoro, C., 2005.

Debido a la toxicidad potencial directa sobre la biota y la amenaza indirecta sobre la salud humana por la contaminación de las aguas subterráneas y la acumulación de los mismos en los cultivos, existe un interés generalizado en cuanto al destino de los metales pesados en suelos contaminados (Martínez, C. E. y Motto, H. L., 2000).

En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías (García, I. y Dorronsoro, C., 2005):

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos (Solano, 2005-5).
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.



La toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema (Abollino et al., 2002).

Un factor importante en la movilidad, toxicidad y biodisponibilidad de los metales pesados es su especiación (Buatier et al., 2001): estado, fase/s o forma/s química/s en que se encuentra un determinado elemento en el suelo. El CBR (Community Bureau of Reference) de la Unión Europea define el análisis de especiación química en suelos y sedimentos como el proceso de identificación y cuantificación de las distintas especies, formas o fases definidas en las que un elemento existe en el material (Ure et al., 1993; Van Herreweghe et al., 2003).

Tradicionalmente el método empleado para llevar a cabo los estudios de movilización de metales pesados se basa en los estudios de especiación, a través de métodos de fraccionamiento operacional como son las extracciones químicas selectivas, simples y/o secuenciales, ya que la determinación directa es casi imposible (Van Herreweghe et al., 2003).

Las extracciones secuenciales determinan una especiación operacional definida, que depende de diferentes factores como la elección y orden de los agentes de extracción, la duración de la extracción, la razón sólido/líquido y la preparación y conservación de la muestra, hasta el punto de que incluso se han encontrado diferencias significativas en la especiación operacional cuando el mismo esquema ha sido aplicado por distintos analistas (Van Herreweghe et al., 2003).

#### **2.4.1 Movilización Natural de Metales Pesados.**

La movilidad natural de los metales pesados en los suelos es consecuencia de la actividad biológica, de las interacciones sólido-líquido y de la acción del agua (Bourg, 1995). Cuando el agente causante de la movilización de los metales es el agua, éstos pueden sufrir diferentes procesos de migración en forma soluble o lavado, y en forma particulada:

- Lavado ascendente, incluso precipitando en la superficie del suelo formando, generalmente, sales hidratadas, y/o
- Lavado descendente, pudiendo perderse del perfil, alcanzando la capa freática, si existe, y llegar a las aguas subterráneas, y/o
- Lavado lateral desde zonas topográficamente más altas hacia zonas topográficamente más bajas, y/o bien,
- Arrastre disuelto por las aguas de escorrentía, por la superficie del suelo.

- Arrastre particulado desde zonas topográficamente más altas hacia zonas más bajas

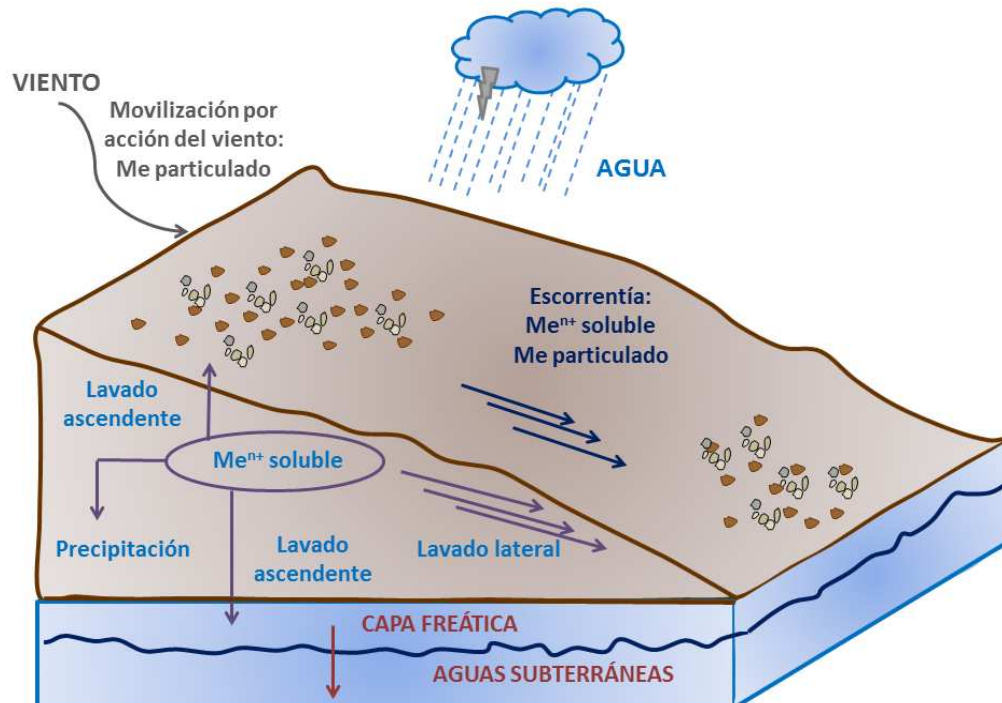


Figura 2.5 Movilización natural de metales pesados por acción del agua y del viento

La circulación de metales con las aguas está influenciada por el balance hídrico del agua en el suelo, donde interviene la cantidad de precipitación, evaporación, escorrentía e infiltración del agua, en función de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Es de resaltar la influencia que ejerce el pH del suelo, ya que la mayoría de los elementos traza, con la excepción de Mo, As y Se, son más móviles en condiciones de acidez creciente (Alloway, B. J., 1995c).

Por otra parte, los factores que condicionan la migración de los metales arrastrados por el agua en forma particulada son los relativos a la naturaleza y tamaño de las partículas y al flujo de agua. El viento también induce a la movilización o migración en forma particulada de los metales pesados que se encuentran en la superficie del suelo. En este caso, los factores que gobiernan el proceso son la naturaleza de las partículas que transporta y la intensidad del viento (Solano, 2005).

## 2.5 Mecanismos de Toxicidad de los Metales Pesados





Los metales pesados son tóxicos por sus propiedades iónicas. Se unen a muchos ligandos celulares y desplazan a los metales esenciales originales de sus zonas de ligaduras originales (Wittekind et al. 1996).

Los metales también pueden afectar la fosforilación oxidativa y la permeabilidad de la membrana, como se ha visto con el vanadio y el mercurio (Muller et al. 2001). Los microorganismos generalmente usan vías de transporte específicos para llevar los metales esenciales a través de la membrana celular al citoplasma. Los metales tóxicos también pueden atravesar las membranas vía difusión o a través de las vías diseñadas para otros metales (Konopka et al. 1999). Por ejemplo, el transporte del  $Cd^{2+}$  se da por la vía del sistema de transporte activo del  $Mn^{2+}$  en *Staphylococcus aureus*. Estas interacciones de metal-microorganismo dan como resultado la disminución del crecimiento microbiano, cambios morfológicos anormales, e inhibición de los procesos bioquímicos por separado (Akmal et al. 2005a).

Los efectos tóxicos de los metales pueden verse a nivel de comunidad. En respuesta a la toxicidad del metal, cifras totales de la comunidad y disminución de la diversidad. El suelo es un sistema vivo donde todas las actividades bioquímicas provienen de procesos encimáticos. Los metales pesados también tienen efectos negativos en las actividades encimáticas (Twardowska, et al., 2006).

### **2.5.1 Efectos de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos) sobre algunas funciones biológicas**

Para que un ión de alguno(s) de los elementos mencionados anteriormente tenga un efecto fisiológico o tóxico sobre un organismo, primero debe entrar a la célula. Los cationes metálicos divalentes ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  y  $Zn^{2+}$ ) son estructuralmente muy similares entre sí; todos ellos tienen diámetros iónicos entre 138 y 160 pm y una doble carga positiva. De esta manera, por su semejanza estructural, ciertos cationes metálicos divalentes pueden desplazar a otros con funciones fisiológicas importantes en la célula (Volke, 2005).

Los cationes de varios metales (Ca, Fe, Cu, Na, K, Mg, Zn, Mn y Cr) juegan un papel importante como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano. Elementos, como Al, Si, As y Ni también se encuentran en el cuerpo. Ciertos metales funcionan como “venenos” metabólicos, ya que pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos; algunos iones de estos elementos ( $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  y  $Ag^{+}$ ) forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica (Volke, 2005). Elementos como el Hg, As, Sn, Tl y Pb, pueden formar iones órgano-metálicos liposolubles



capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. Aún, elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración, como  $Zn^{2+}$  o  $Ni^{2+}$  y, especialmente  $Cu^{2+}$ , son tóxicos en concentraciones mayores (Nies 1999, Csuros y Csuros 2002).

Cationes tri- o tetra-valentes de otros metales (Sn, Ce, Ga, Zr y T), debido a su baja solubilidad, no poseen influencia biológica. Del resto de los metales, el Fe, Mo y Mn son elementos traza importantes con baja toxicidad; el Zn, Ni, Cu, V, Co, W y Cr son tóxicos con importancia biológica moderada; y elementos como As, Ag, Sb, Cd, Hg, Pb y U, no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y se consideran tóxicos (Nies 1999).

Como puede verse, algunos metales no implican peligro para los sistemas biológicos; en cambio, algunos no metales y metaloides, como el Se y el As, respectivamente, son potencialmente tóxicos, dependiendo de su concentración.

Si este tipo de elementos se encuentran biodisponibles y se movilizan hacia poblaciones cercanas, pueden ocasionar problemas de intoxicación. En este sentido, la forma química de un elemento, tiene influencia directa en su solubilidad, movilidad y toxicidad en el suelo; ésta, a su vez, depende de la fuente de contaminación y de la química del suelo en el sitio contaminado (Nies 1999). De esta manera, para poder evaluar la utilización de una alternativa de remediación para un sitio en particular, es indispensable llevar a cabo la caracterización del sitio con el objeto de determinar el tipo y concentración del (los) contaminante(s) presente(s) (Volke, 2005).

## 2.6 Comunidades microbianas del suelo

Las comunidades microbianas en el suelo son extremadamente diversas, con la estimación del sistema ecológico, la evidencia experimental ha demostrado que tal relación es escasa. La biomasa microbiana la cual representa el componente vivo de la materia orgánica del suelo generalmente es menor al 5% de la materia orgánica total del suelo (Dalal 1998), pero lleva a cabo muchas funciones críticas en el ecosistema suelo.

La biomasa microbiana es tanto una fuente como o un sumidero de nutrientes en el suelo. Esta participa en las transformaciones del C, N, P y S, y juega un papel importante en la degradación de los compuestos orgánicos. Esto también ayuda en la movilización de los metales pesados y participa en la formación de la estructura



del suelo, etc (Nannipieri et al. 2002). Como los microorganismos del suelo juegan un papel vital en mantener la productividad del suelo, cualquier cosa que interrumpa a estos microorganismos y sus funciones en el suelo debe esperarse que afecte a largo plazo la productividad y sustentabilidad e incluso la estabilidad del ecosistema. Hay hasta 13,000 especies de bacterias presentes por gramo de suelo, aunque la diversidad se asume que es para dar una mayor estabilidad (Twardowska, et al., 2006).

## 2.7 Síntesis de la Biogeoquímica De As, Cd, Hg, Pb y Zn.

La importancia de las características biogeoquímicas de los metales pesados reside en el papel que desempeñan al incorporarse en la cadena trófica y su influencia en la salud humana como último eslabón en dicha cadena. Por ello creemos conveniente incorporar una síntesis del papel que arsénico, cadmio, plomo y cinc pueden desempeñar a este respecto.

### 2.7.1 Arsénico

El arsénico se presenta en forma libre en pequeñas cantidades; en la corteza terrestre representa el  $1.8 \times 10^{-4}$  en peso. El mineral más corriente es la arsenopirita,  $\text{FeAsS}$ , (O'Neill, P., 1995) del que se obtiene el elemento por calentamiento. Es un constituyente natural de los minerales de plomo, cinc, oro y cobre, que puede liberarse durante el proceso de fundición de los mismos. Los gases y el material particulado de la minería y fundiciones pueden actuar como fuentes contaminantes de arsénico (Adriano, D.C., 2001a).

En los suelos está uniformemente distribuido en los tipos de rocas más importantes ya que tiene gran afinidad a formar o existir en muchos minerales. Aunque los minerales y compuestos de arsénico son fácilmente solubles, la migración de arsénico está muy limitada debido a la fuerte adsorción por arcillas, hidróxidos y materia orgánica (Kabata-Pendias, A., 2001).

Los estados de oxidación más comunes del arsénico son -3, 0, +3 y +5. De ellos  $\text{As}^0$  y  $\text{As}^{3+}$  son característicos de ambientes reductores. Los aniones complejos  $\text{AsO}_4^{2-}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{3-}$  son las formas móviles más comunes del arsénico, si bien la movilidad de éste en el suelo es proporcional a la cantidad de arsénico existente e inversamente proporcional al tiempo y a los contenidos en óxidos hidratados de hierro y aluminio (Solano, 2005).



Las reacciones del arsénico en los suelos están gobernadas por sus estados de oxidación. Su toxicidad depende de la concentración de arsénico soluble, siendo el arseniato sódico y el trióxido de arsénico los más tóxicos. Se acumula en el hígado, riñones, piel, pelo y uñas; se elimina por la orina. La ingestión de dosis crecientes habitúan el organismo al veneno y lo hacen más resistente.

El arsénico inorgánico es un cancerígeno para el hombre. Se ha observado una alta incidencia de cáncer de piel y, posiblemente otros cánceres, en poblaciones que consumen agua de bebida con altas concentraciones de arsénico. Un efecto adverso significativo es la enfermedad de los pies negros, cuya incidencia aumenta con la edad y la dosis. También se ha observado aumento de la incidencia de hiperpigmentación y queratosis (IHOBE, 1998).

Por vía inhalatoria el efecto crítico es el cáncer de pulmón. Se ha observado un incremento de la incidencia de cáncer de pulmón en varios grupos expuestos ocupacionalmente a compuestos de arsénico inorgánico (IHOBE, 1998).

Se estima que la producción mundial de arsénico al año oscila entre 75.000 y 100.000 toneladas, de las cuales Estados Unidos utiliza la mitad. Los compuestos de arsénico se utilizan principalmente en la agricultura y silvicultura como plaguicidas, herbicidas y silvicidas (Adriano, D.C., 2001a).

Se usa también en bronce, pirotecnia, en la industria microelectrónica y en la manufactura de semiconductores. Algunos de sus compuestos se han usado en la construcción de láseres ya que convierte la electricidad en luz coherente, en la industria del vidrio, colorantes, etc

### 2.7.2 Cadmio.

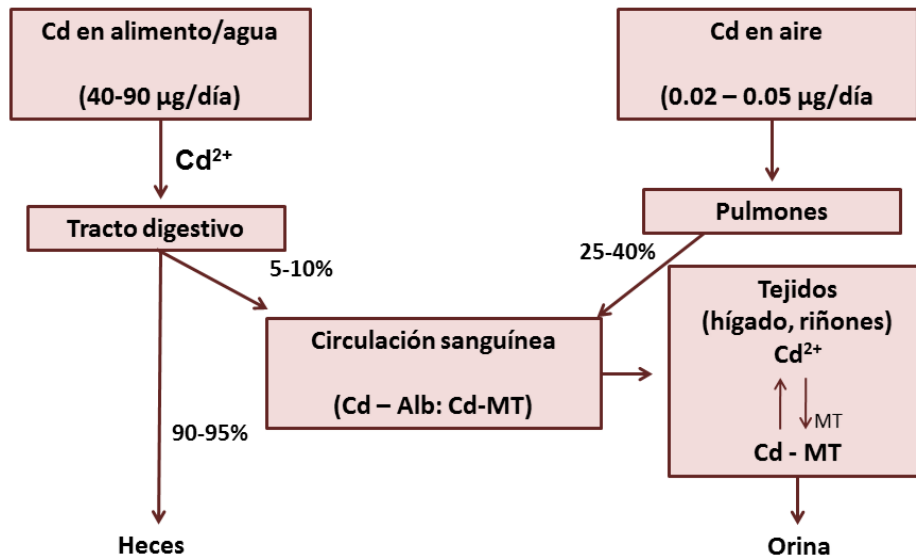
Representa el  $1.5 \times 10^{-5}$  % en peso de la corteza terrestre. No se encuentra nativo. Frecuentemente se presenta en pequeñas cantidades asociado a minerales de cinc, tales como la esfalerita (ZnS). Minerales propios son la greenockita o blenda de cadmio (CdS) (que es el único importante), la otavita ( $\text{CdCO}_3$ ) y la monteponita (CdO) (Jiménez, A. 2003b).

Alloway citado por Solano menciona que el nivel natural de cadmio en el suelo es generalmente  $<1$  ppm. Puede existir de forma natural en altas concentraciones cuando se encuentra asociado a minerales de cinc, o en áreas cercanas a depósitos de cadmio. Básicamente se recupera como subproducto de los procesos de fundición y refinamiento de concentrados de cinc en una proporción de  $3.0\text{-}3.5 \text{ kg} \cdot \text{tm}^{-1}$  de cinc. Se encuentra muy asociado con el cinc en su geoquímica ya que ambos elementos

tienen estructuras iónicas y electronegatividades similares y son fuertemente calcófilos, aunque el cadmio presenta una afinidad más fuerte que el cinc por el azufre.

La principal especie de cadmio en la solución del suelo es  $Cd^{2+}$  aunque también puede formar los siguientes iones complejos:  $CdCl^+$ ,  $CdOH^+$ ,  $CdHCO_3^+$ ,  $CdCl_3^-$ ,  $CdCl_4^{2-}$ ,  $Cd(OH)_3^-$  y  $Cd(OH)_4^{2-}$  junto con complejos orgánicos. En suelos contaminados las especies de cadmio soluble predominantes son el ion libre  $Cd^{2+}$  junto con otras especies neutras como  $CdSO_4$  o  $CdCl_2$ , presentes en cantidades crecientes donde el pH es mayor que 6.5. El cadmio no tiene función biológica esencial y tanto él como sus compuestos son muy tóxicos para plantas y animales (Solano, 2005).

El riñón es el blanco del cadmio y el efecto crítico es la proteinuria. La concentración crítica de cadmio en la corteza renal que produciría un 10% de prevalencia de proteinuria de bajo peso molecular en la población general es aproximadamente 200 mg/kg, la cual se alcanzaría tras una ingesta diaria de aproximadamente 75  $\mu g$  por persona durante 50 años. La tasa de absorción de cadmio varía con la fuente: 2.5 % para el procedente de los alimentos y 5% para el procedente del agua. Estudios de inhalación han demostrado un incremento altamente significativo del cáncer de pulmón en ratas dependiente de la dosis. También se ha observado en varios estudios un exceso de cáncer de pulmón entre trabajadores expuestos al cadmio (IHOBE, 1998).



**Figura 2.6** Metabolismo de Cd en humanos. Cd-Alb: Cd unido a la albúmina; Cd-MT: Cd unido a la metalotineína. Fuente Yu, 2001.

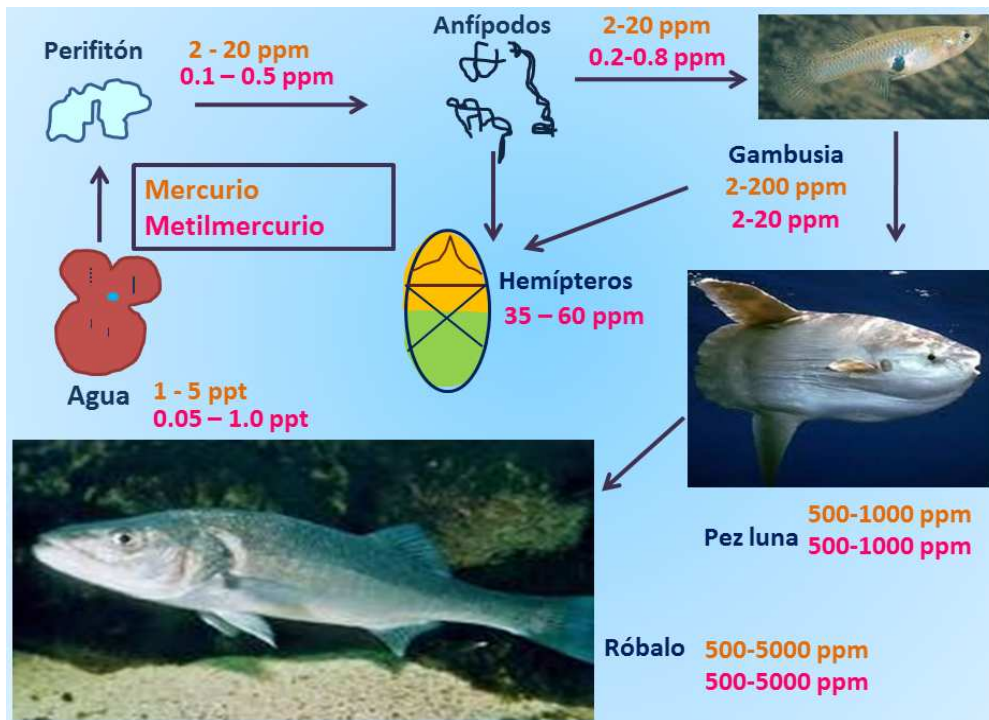


Casi todo el cadmio se obtiene como subproducto en el procesado de minerales de cinc, cobre y plomo. El cadmio es componente de algunas de las aleaciones de más bajo punto de fusión. Se emplea mucho en recubrimientos de acumuladores y rectificadores. También en muchos tipos de soldadura, baterías de níquel-cadmio recargables, reactores nucleares. Su óxido, hidróxido y cloruro se usa en galvanotecnia, su sulfuro como pigmento amarillo, los silicatos y boratos se emplean en los tubos de TV color, etc. (Jiménez, A. 2003b).

### 2.7.3 Mercurio

Es un metal de ocurrencia natural disperse a través del ecosistema. La contaminación del ambiente por mercurio es causada tanto por fuentes antrópicas como naturales. Las fuentes naturales incluyen la acción volcánica, erosión de sedimentos que contienen Hg, y emisiones de gases de la corteza terrestre (Twardowska, 2006). Además, el Hg se usa en la fabricación de joyería, pesticidas y otros procesos de manufactura. La luz emitida por descargas eléctricas a través de vapores de Hg es rica en rayos ultravioleta, y lámparas de este tipo envueltas en cuarzo fundido son ampliamente usadas como fuente de luz UV.

La mayor parte del Hg viene de las fuentes antropogénicas o de sus actividades incluyendo la minería, la combustión de combustibles fósiles (el contenido de Hg en el carbón es de aproximadamente 1ppm), transportando los minerales de Hg, el proceso de la pulpa y el papel, la incineración, uso de compuestos de Hg como la cobertura de semillas para la agricultura, y tubos de escape de fundidoras de metales (Yu, 2001). Además, los desechos de Hg se encuentran como bioproductos de plantas productoras de cloro, baterías usadas, bulbos de luz, y procesos de recubrimiento con oro. Los compuestos de mercurio son añadidos a las pinturas como conservadores.



**Figura 2.7** Biomagnificación del mercurio en la cadena alimenticia. (Cleckner et al, 1998)

El mercurio es una toxina nerviosa, y la principal preocupación para la salud es su efecto en el cerebro, particularmente en el crecimiento de fetos y niños. El mercurio puede dañar la reproducción en los mamíferos por interferir con la formación de los espermatozoides. También se ha visto que afecta neurológicamente y reproductivamente a las aves. En peces, estos efectos incluyen una disminución en el sentido del olfato, daña las branquias, causa ceguera, y modifica la habilidad para la absorción de nutrientes en los intestinos. Las plantas también pueden ser sensibles al mercurio, y altas concentraciones pueden llevar a reducir el crecimiento (Twardowska, 2006-7).

#### 2.7.4 Plomo.

Entre los metales pesados de número atómico mayor de 60, el plomo es el más abundante en la corteza de la tierra (Adriano, D.C., 2001d). Su concentración en suelos no contaminados no supera los 20 mg·kg<sup>-1</sup>.

Aunque hay más de 200 minerales de plomo, destaca la galena (PbS, 87% Pb en peso) que forma cristales cúbicos de gran tamaño, la anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y la cerusita (PbCO<sub>3</sub>). Otros minerales (sin valor económico) son, minio (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), piromorfita (Pb<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)Cl), boulangerita (Pb<sub>5</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>11</sub>), crocoíta (PbCrO<sub>4</sub>), wulfenita (PbMoO<sub>4</sub>), etc (Jiménez, A. 2003c). También se acumula con cinc y cadmio en depósitos minerales.

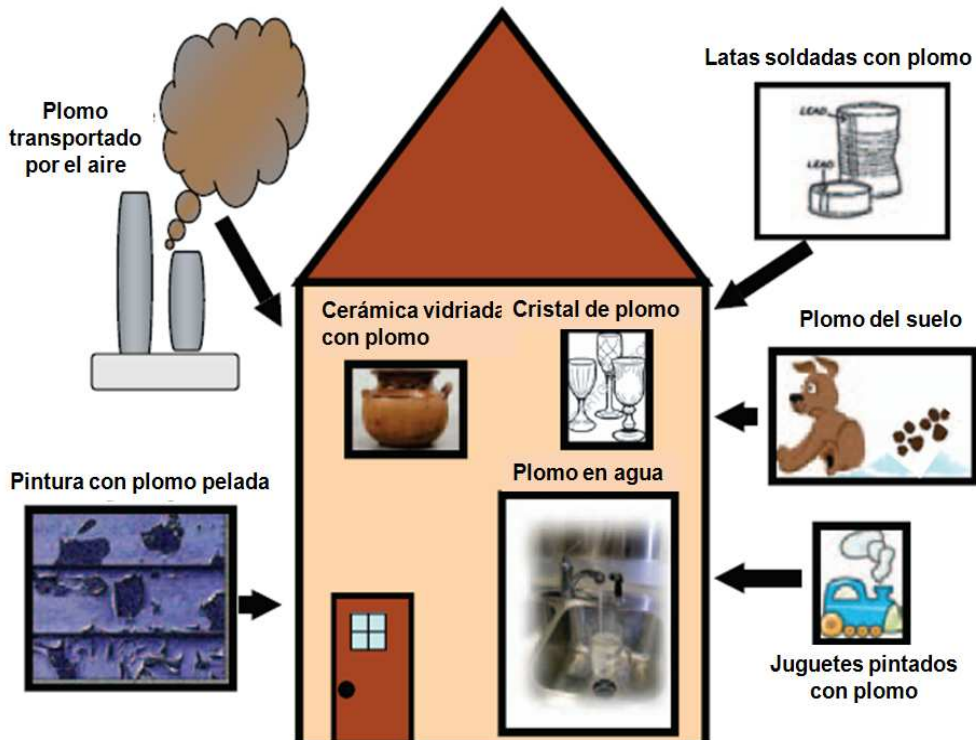


Figura 2.8 Fuentes de plomo en el ambiente.

El plomo es un tóxico cuya ingestión (en forma de vapor, humo o polvo) provoca saturnismo y que se acumula en los huesos. Niños de hasta 6 años (los niños absorben 4-5 veces más plomo que los adultos) y mujeres embarazadas son los grupos más susceptibles de sufrir los efectos del plomo (IHOBE, 1998).

Como otros metales pesados el plomo se une e inactiva los grupos  $-SH$  de proteínas, inhibe la biosíntesis del grupo hemo y puede sustituir al calcio en los huesos y en procesos bioquímicos (incluso pequeñas dosis de  $Pb$  pueden causar neurotoxicidad ya que sustituye al  $Ca^{2+}$  en las funciones nerviosas). Es tóxico para mamíferos y aves y se concentra en todos los organismos acuáticos. Se han observado problemas en la reproducción, una menor supervivencia y limitaciones en el crecimiento con niveles tan bajos como  $1,0-5,1 \mu m/l$  de  $Pb$  en agua (Alloway, B. J., 1995b).

**Cuadro 2.9** Respuestas toxicas al aumento de las concentraciones de plomo en sangre

EFECTOS EN LA SALUD	
CONCENTRACION DE PLOMO EN SANGRE ( $\mu g/l$ )	
Adultos	Niños
Atraviesa la placenta, toxico para el	





100	▼	Puede darse la hipertensión	desarrollo Deterioro del IQ Aumento de la protoporfirina eritrocitaria
200	▼		Empezando por el deterioro del nervio que conduce la velocidad
300	▼	Hipertensión sistólica, disminución de la audición	Deterioro de vitamina D en el metabolismo
400	▼	Infertilidad en hombres, efectos renales, neuropatía Fatiga, dolor de cabeza, dolor abdominal	Síntesis de la hemoglobina deteriorada
500	▼	Disminución de la síntesis del hemo, disminución de la hemoglobina, anemia, síntomas intestinales, dolor de cabeza, temblores Letargo, convulsiones	Dolor abdominal, neuropatía Encefalopatía, anemia, nefropatía, convulsiones
1000	▼	Encefalopatía	

Está clasificado como un posible cancerígeno en humanos. Si está suficientemente demostrada la cancerogenicidad en animales, (carcinoma renal en ratas y ratones y gliomas en ratas y cáncer de pulmón en ratones) (IHOBE, 1998).

Existen muchas fuentes de plomo y entre ellas podemos mencionar las fundiciones y actividades mineras, los abonos, las aguas residuales, tuberías, conductos, soldaduras y la contaminación procedente de los tubos de escape de los automóviles. El plomo también se usa en pinturas, vidrios, insecticidas, baterías (se emplea el metal y su óxido), municiones, recubrimiento de cables, etc.

### 2.7.5 Cinc.

El cinc ocupa el puesto número 24 entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre su contenido en la litosfera es de alrededor de  $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , estando ampliamente distribuido. La principal fuente de cinc son los minerales ZnS de los que él forma parte (esfalerita, wurtzita) y, en menor extensión de minerales como la smithsonita ( $\text{ZnCO}_3$ ), la willemita ( $\text{Zn}^2\text{SiO}_4$ ), la cincita ( $\text{ZnO}$ ), la cincosita ( $\text{ZnSO}_4$ ), la franklinita ( $\text{ZnFe}^2\text{O}_4$ ) o la hopeita ( $\text{Zn}^3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) (Lindsay, 1972; Kiekens, L., 1995).



El cinc es divalente en todos sus compuestos. El ion  $Zn^{2+}$  es incoloro y existe en forma hidratada en soluciones acuosas neutras y ácidas; sin embargo en solución alcalina precipita el hidróxido, pero en exceso de base dicho hidróxido se redissuelve para formar el ion zincato,  $Zn(OH)_4^{2-}$ . Debido a su naturaleza anfótera, el cinc forma gran variedad de sales; los cloratos, cloruros, sulfatos y nitratos son solubles en agua mientras que los óxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfuros son relativamente insolubles en agua; también forma complejos con cloruros, fosfatos, sulfatos, nitratos y también con compuestos húmicos. En suelos no contaminados la concentración de cinc total es 10-300 mg·Kg<sup>-1</sup> con un promedio de 50 mg·kg<sup>-1</sup> (Solano, 2005).

El mismo autor señala que el cinc puede ser considerado, junto con el cadmio, como un metal muy móvil y biodisponible (Kiekens, L., 1995) Entre otros factores que afectan a la movilidad y biodisponibilidad del cinc se encuentran el pH, la materia orgánica y el potencial redox. La solubilidad del cinc es baja, a pH ácido predomina la forma  $Zn^{2+}$  alcanzando concentraciones de 10<sup>-4</sup> M mientras que a pH alcalino esta concentración disminuye considerablemente (10<sup>-8</sup> M) ya que precipita como  $Zn(OH)_2$ . La movilidad del cinc decrece con el incremento de los valores de pH.

El cinc no presenta un gran interés desde el punto de vista toxicológico, la toxicidad del cinc generalmente está limitada a casos de sobredosis accidental o usos terapéuticos de altas dosis de cinc. Ingestas elevadas de cinc pueden alterar el balance del cobre, considerado importante porque deficiencias crónicas de cobre pueden producir efectos adversos al metabolismo del colesterol. También se ha asociado el descenso de los niveles de lipoproteínas de alta densidad como un efecto del cinc. (IHOBE, 1998).

El cinc se utiliza principalmente como baño protector sobre un gran número de metales para prevenir la corrosión y en aleaciones como el latón y el bronce. Los metales galvanizados tienen muchas aplicaciones en la construcción, transporte e industria. El cinc y sus compuestos son componentes de muchos artículos domésticos como utensilios, cosméticos, pomadas, antisépticos, astringentes, pinturas, barnices, linóleos y cauchos. También se utilizan en la manufactura de pergaminos, vidrio, llantas de automóviles, pantallas de televisión, pilas y aparatos eléctricos. Otros usos incluyen fertilizantes agrícolas, insecticidas, endurecedores en cementos y hormigones, en la imprenta y secado de prendas textiles, en la producción de adhesivos, como flujo en operaciones metalúrgicas y como conservador de la madera (Adriano, D.C., 2001f).

### CAPITULO 3

#### *CARACTERISTICAS DEL AREA DE ESTUDIO*



El área de estudio comprende los suelos y el cauce del Río de los Remedios. Este río se sitúa al norte de la Ciudad de México. Así pues, resulta interesante describir brevemente los rasgos geofísicos y humanos que caracterizan el ámbito de estudio elegido, así como las características particulares de las distintas zonas a lo largo del margen del río.

El Río de Los Remedios recibe las descargas reguladas del Vaso del Cristo y drena parte de la zona de Naucalpan, Atizapán, Tlalnepantla y el Distrito Federal. Durante la temporada de estiaje únicamente transitan aguas residuales, incrementando su gasto durante la temporada de lluvias debido a las aportaciones pluviales. Inicia en el Vaso del Cristo y recoge las aportaciones de los ríos Tlalnepantla y San Javier que no son capturadas por el Emisor del Poniente o el Emisor Central. Actualmente descarga en el Gran Canal a la altura del Km 9, y puede ser aliviado hacia el Interceptor Central del Sistema de Drenaje Profundo (Domínguez, 1997).

En su recorrido atraviesa zonas densamente pobladas de la Delegación Gustavo A. Madero, así como de la delegación Azcapotzalco, y los municipios de Tlalnepantla y Ecatepec, fluyendo a través de la complejidad de esta zona urbana donde la diversidad de las industrias establecidas vierten sus aguas residuales al cauce, le confiere características particulares.

### **3.1 Características generales del Río de los Remedios.**

El río de los Remedios se sitúa entre las coordenadas  $19^{\circ}30'39''$  N  $99^{\circ}12'48''$  O y  $19^{\circ}29'17''$  N -  $99^{\circ}0'53''$  O. Este se ubica en el Distrito Federal principalmente en la Delegación Gustavo A. Madero y en los municipios de Ecatepec y Tlalnepantla de Baz en el Estado de México. El cauce del río de los Remedios tiene una longitud total de 15.7 km, de los cuales 4.1 Km se encuentra en el distrito Federal y el resto en el Estado de México. El Río de los Remedios es un río importante que ayuda a drenar parte de las aguas negras del norte del D.F. y de una parte del Estado de México.

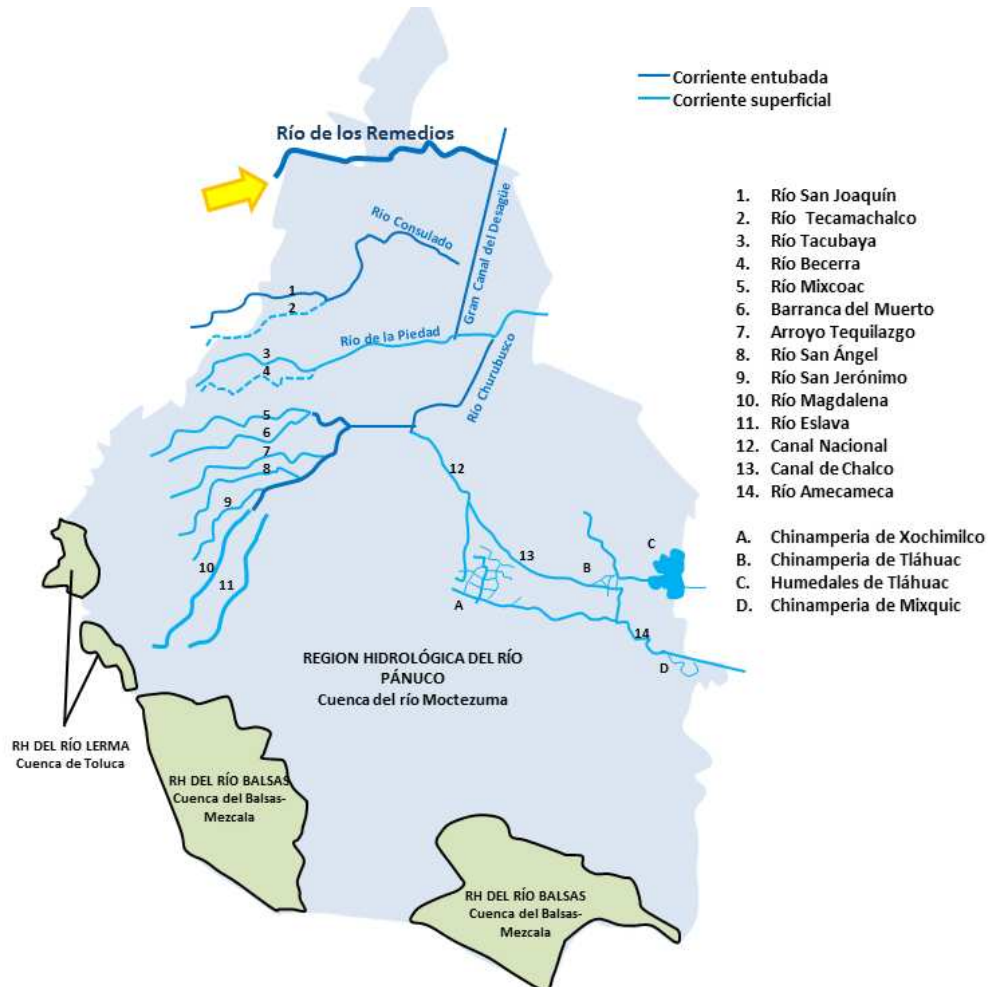


Figura 3.1 Ubicación del Río de los Remedios en el Distrito Federal.

### 3.2 Geología

El Distrito Federal está cubierto en su mayoría por roca ígnea extrusiva cubriendo más de 60 % del territorio de la ciudad. Estos afloramientos corresponden a dos periodos diferentes de la era cenozoica, concretamente al periodo cuaternario.

La mayor parte del cause del río se ubica dentro de la Sierra de Guadalupe. Existen afloramientos de toba, brecha y complejos volcánicos profundamente erosionados en algunas porciones de la base de la Sierra de Guadalupe y en cerros como Cuauhtepac y Gordo, considerados por Mooser (1956, 1975) como pertenecientes al Mioceno y cuya composición varía de andesita basáltica a traquiandesita y dacita.

Con respecto a la geología estructural de la Sierra de Guadalupe, Lozano (1968) considera la presencia de dos sistemas de fracturas: WNW-ESE y N30°-45°E. Se han reconocido principalmente tres sistemas de fallas. El más antiguo presenta una



orientación N-S, sobre el cual se observa una serie de fosas y pilares tectónicos y localmente se caracteriza por pequeñas zonas de cizalla, que indican un movimiento normal; este sistema está asociado con la actividad del CVTM y posiblemente sea el que originó la Sierra de Guadalupe. El segundo sistema de fallas tiene una orientación NE-SW (De Cserna *et al.*, 1988; Mooser, 1992) y las fallas más importantes pertenecientes a este sistema son las fallas de Tenayuca y Chiquihuite (Mooser, 1992), las cuales definen una de las estructuras más prominentes de este sistema que es la Fosa de Cuauhtepac (Mooser, 1975).

En los planos de falla se observan rasgos tales como: estrías con al menos dos generaciones de movimiento, brechamiento tectónico, harina de falla y estructuras sigmoidales (Servicio Geológico Metropolitano, 2003). El tercer sistema de fallas tiene una orientación E-W y afecta a rocas muy jóvenes, por lo que se considera el más reciente. Se caracteriza por la presencia de harina de falla, brechas y estructuras sigmoidales (ESIA, 2010).

Los depósitos de arcillas lacustres superficiales están compuestos principalmente de sedimentos y arena. Este relleno se encuentra por debajo de las arcillas lacustres, donde sus espesores en la zona norte del Distrito Federal alcanzan quinientos metros. Este material está interestraticado con depósitos de basalto, tanto del Pleistoceno como recientes, estos depósitos están compuestos por fragmentos de tamaño de la grava, arena, limo y arcilla, conteniendo localmente margas. Donde su formación es a causa de los procesos influenciados por condiciones climáticas y por una variedad de factores físicos, químicos y biológicos. En la Delegación Gustavo A. Madero pertenece al Cenozoico Cuaternario y suelo (31.6%).

Como se ilustra en la Figura 3.2 se puede observar el tipo de roca que cubre la zona por la que pasa el Río de los Remedios.

En 1968 Lozano reportó los fechamientos de dos rocas de la sierra, en Barrientos y en la fosa de Cuauhtepac, del orden de 14-15 Ma (Mioceno), determinados por K-Ar. La actividad volcánica debe haber iniciado inmediatamente al occidente con la formación de la fosa de Barrientos, donde están las elevaciones más erosionadas y las que Mooser y colaboradores consideraron del Mioceno tardío (Lugo-hubp, 1996).

La Sierra de Guadalupe se formó esencialmente por dos tipos de actividad volcánica. Una en que los procesos explosivos fueron de gran intensidad y representan las etapas iniciales de los edificios mayores, los cuales culminaron con procesos extrusivos. El otro tipo de derrames de lava (procesos efusivos), escasos y de corta extensión.

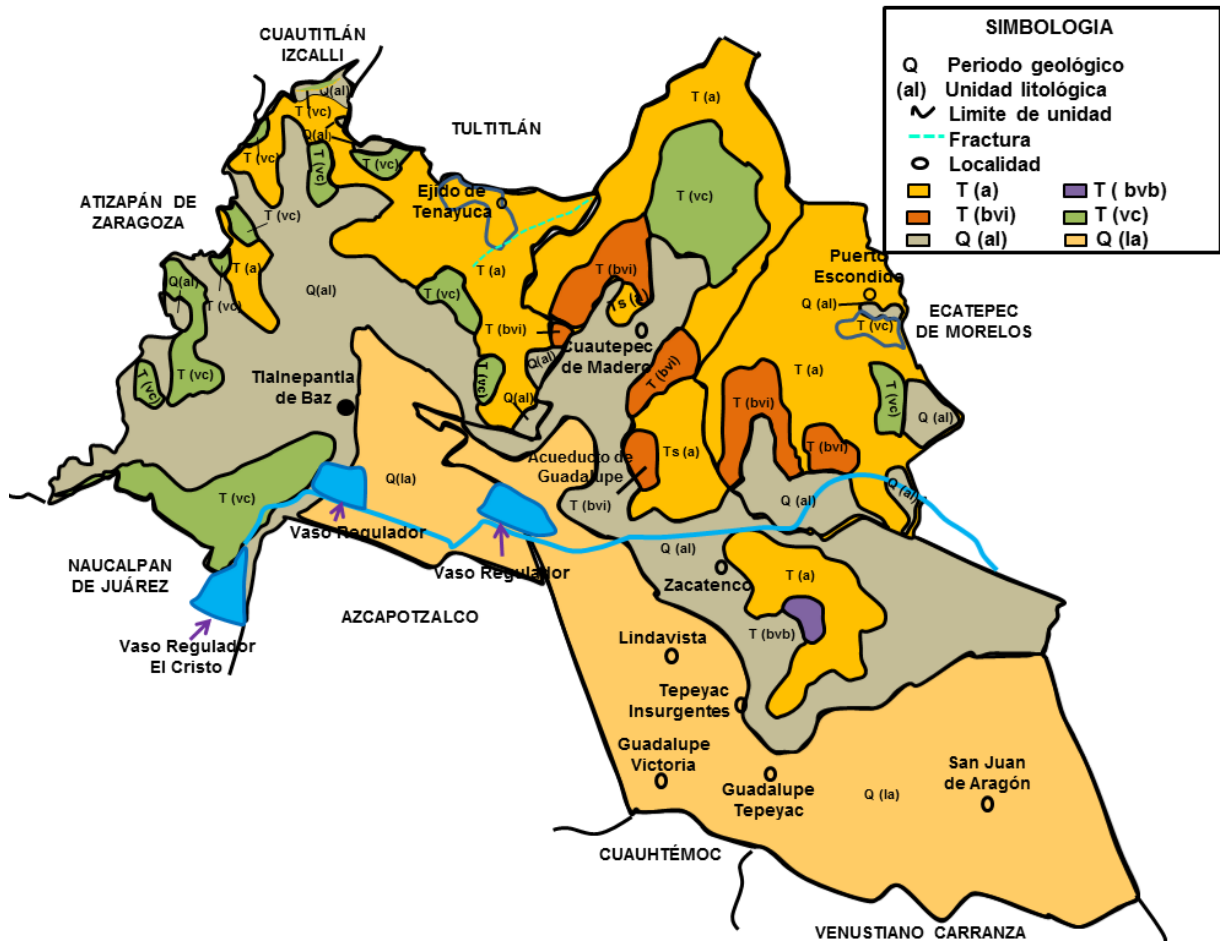


Figura 3.2 Geología de la Delegación Gustavo A. Madero

### 3.3 Clima

El clima que presenta esta región es templado, subhúmedo con lluvias en verano con temperatura media de 21 °C, precipitación anual promedio de 770 mm, existen masas de aire húmedo en verano y parte de otoño debido a la influencia de los ciclones tropicales, los vientos provenientes del norte provocan varias ráfagas y grandes columnas de polvo.

El patrón de las lluvias indica que son más abundantes mientras mayor sea la altitud de un sitio. Por ello, las partes bajas del vaso de Texcoco suelen ser más secas que las cumbres del Ajusco.

De igual manera, la altitud condiciona la temperatura y los ecosistemas en el Distrito Federal, algo similar sucede en el Estado de México específicamente en la ZMVM. En la siguiente figura (3.3), se muestra la distribución de climas para la región por la cual pasa el Río de los Remedios.

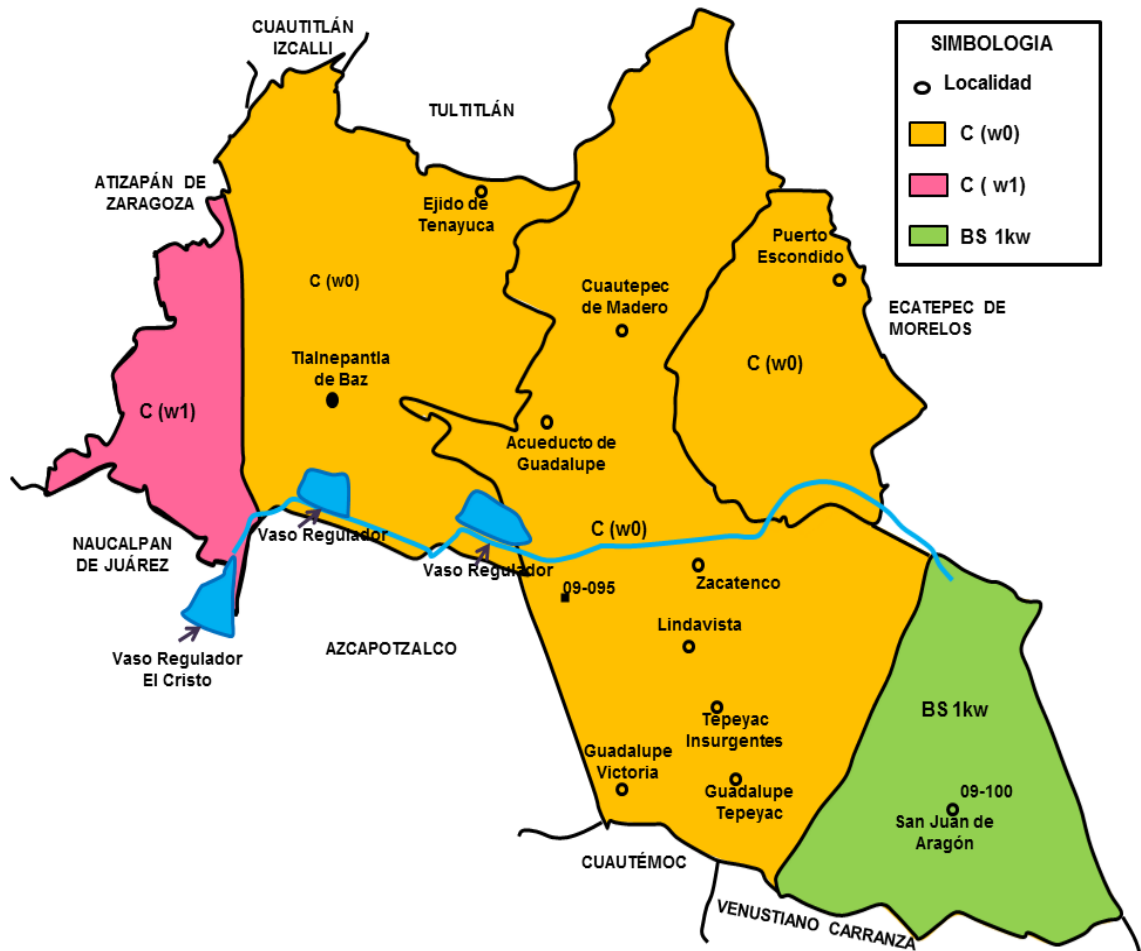
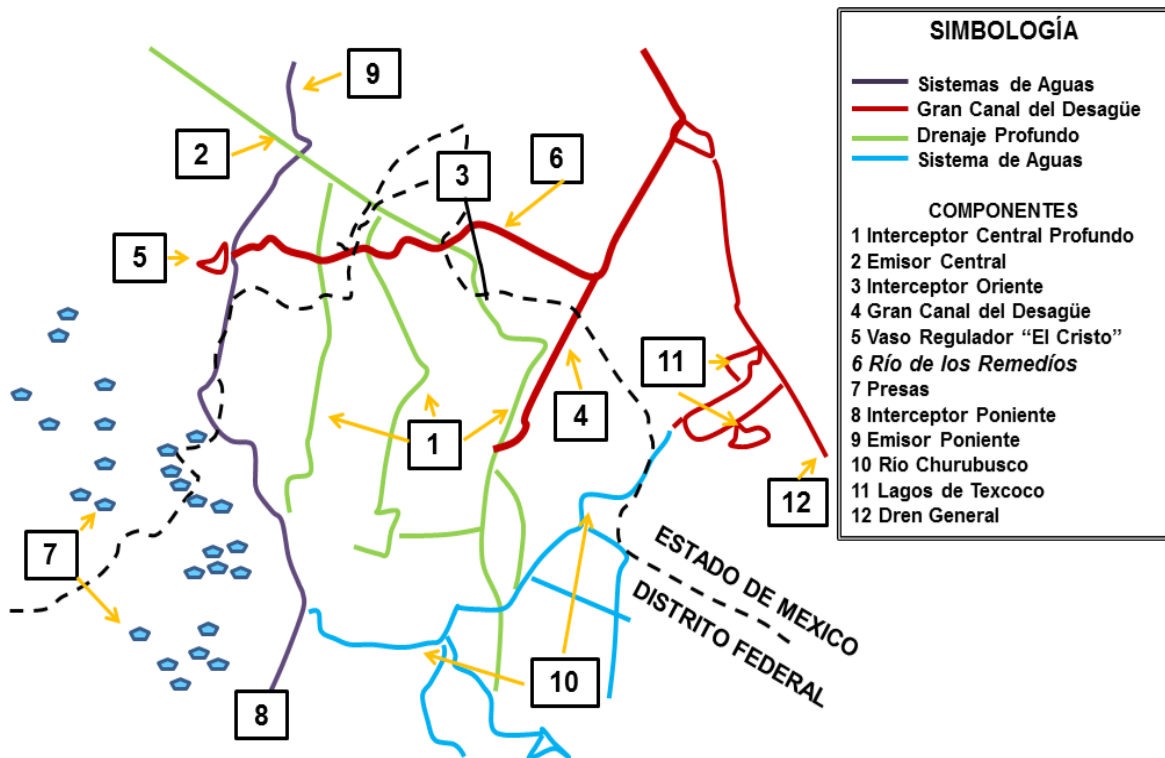


Figura 3.3 Distribución de climas para la región del Río de los Remedios (en azul)

### 3.4 Hidrografía

Los principales ríos que recorren la ZMVM descienden de las sierras y constituyen la denominada Cuenca del Río Moctezuma que abarca toda el área metropolitana. En esta cuenca se localizan ríos tales como Tacubaya, **Los Remedios**, Mixcoac, Churubusco, Consulado, etc., estando los tres últimos entubados, así como los canales Chalco, Apatlaco y Cuemanco, entre otros. Además, se encuentra el lago Xochimilco y los lagos artificiales de San Juan de Aragón y Chapultepec. Cabe señalar que algunas corrientes y cuerpos de agua mencionados han sido confinados para el consumo local (SMAGDF).



**Figura 3.4** Esquema general del Sistema de Drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México. FUENTE: Instituto de Ingeniería, UNAM, Seminario sobre Hidrología e Hidrología Urbana: Desarrollos recientes, 23 de mayo de 2006.

### 3.5 Suelos

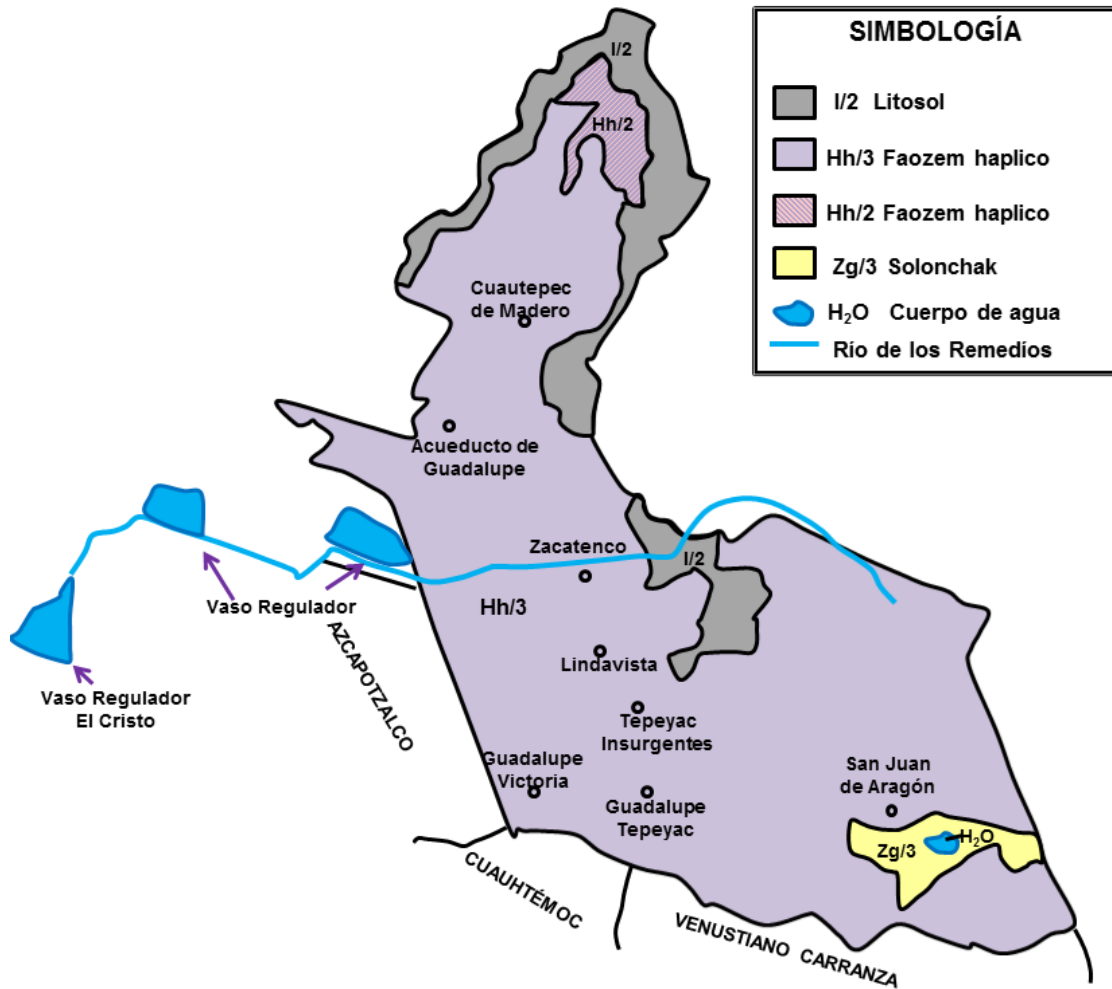
Según la carta edafológica de INEGI, los suelos cercanos al Río de los Remedios son: ZU (zona urbana), I/2 (Litosol de textura media), Hh/2 (Feozem haplico de textura media) y Hh/3 (Feozem haplico de textura fina). Los nombres están de acuerdo a la clave de la esta misma carta. Los suelos que maneja el Instituto de Geografía y Estadística fueron tomados de WRB los cuales ya no están vigentes.

#### 3.5.1 Leptosoles

Los Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. Los Leptosoles incluyen los: *Litosoles* del Mapa de Suelos del Mundo (FAO–UNESCO, 1971–1981); subgrupos *Lítico* del orden *Entisol* (Estados Unidos de Norteamérica); *Leptic Rudosols* y



*Tenosols* (Australia); y *Petrozems* y *Litozems* (Federación Rusa). En muchos sistemas nacionales, los *Leptosoles* sobre roca calcárea pertenecen a las *Rendzinas*, y aquellos sobre otras rocas, a los *Rankers*. La roca continua en la superficie se considera no suelo en muchos sistemas de clasificación de suelos.



**Figura 3.5** Mapa de suelo de la Delegación Gustavo A. Madero. (Según la carta Edafológica de INEGI de 1970)

### 3.5.1.1 Descripción resumida de Leptosoles

*Connotación:* Suelos someros; del griego *leptos*, fino.

*Material parental:* Varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina. *Ambiente:* Principalmente tierras en altitud media o alta con topografía fuertemente disectada. Los Leptosoles se encuentran en todas las zonas climáticas (muchos de ellos en regiones secas cálidas o frías), en particular en áreas fuertemente erosionadas.



*Desarrollo del perfil:* Los Leptosoles tienen roca continua en o muy cerca de la superficie o son extremadamente gravillosos. Los Leptosoles en material calcáreo meteorizado pueden tener un *horizonte mólico*.

### 3.5.1.2 Distribución regional de Leptosoles

Los Leptosoles son el GSR más extendido sobre la tierra, extendiéndose alrededor de 1 655 millones ha. Los Leptosoles se encuentran desde los trópicos hasta la tundra fría polar y desde el nivel del mar hasta las montañas más altas. Los Leptosoles están particularmente extendidos en áreas de montaña, notablemente en Asia y Sudamérica, en los desiertos de Sahara y Arabia, la Península Ungava del norte de Canadá y en las montañas de Alaska. En otras partes, los Leptosoles pueden encontrarse sobre rocas que son resistentes a la meteorización o donde la erosión ha mantenido el paso con la formación de suelo, o ha removido la parte superior del perfil de suelo. Los Leptosoles con *roca continua* a menos de 10 cm de profundidad en regiones montañosas son los Leptosoles más extendidos.

### 3.6 Flora y Fauna

En cuanto a vegetación, los mapas de vegetación publicados en los Cuadernos Estadísticos Delegacionales y municipales, junto al margen del Río de los Remedios se pueden encontrar únicamente dos tipos de vegetación: estos son, bosque y pastizal, aunque la mayor parte es zona urbana. La flora en la Sierra de Guadalupe es de bosque de pino, cedro blanco, oyamel y zacatón, y en las partes más altas se encuentra abundancia de distintos árboles, además del nopal, el agave, tejocote, capulín y encino, mientras que en las partes bajas se encuentran eucaliptos, zapoteros, pinos, pirules, entre otros. En algunas partes muy escasas se pueden encontrar algunos cultivos principalmente de maíz.

La Fauna, está integrada por cerca de 150 especies de las cuales sobresalen los anfibios: sapo y ranita; reptiles: lagartija, las serpientes cincuate y cascabel; entre las aves sobresale el cernícalo americano, el correcaminos, los carpinteros, gorriones y golondrinas.

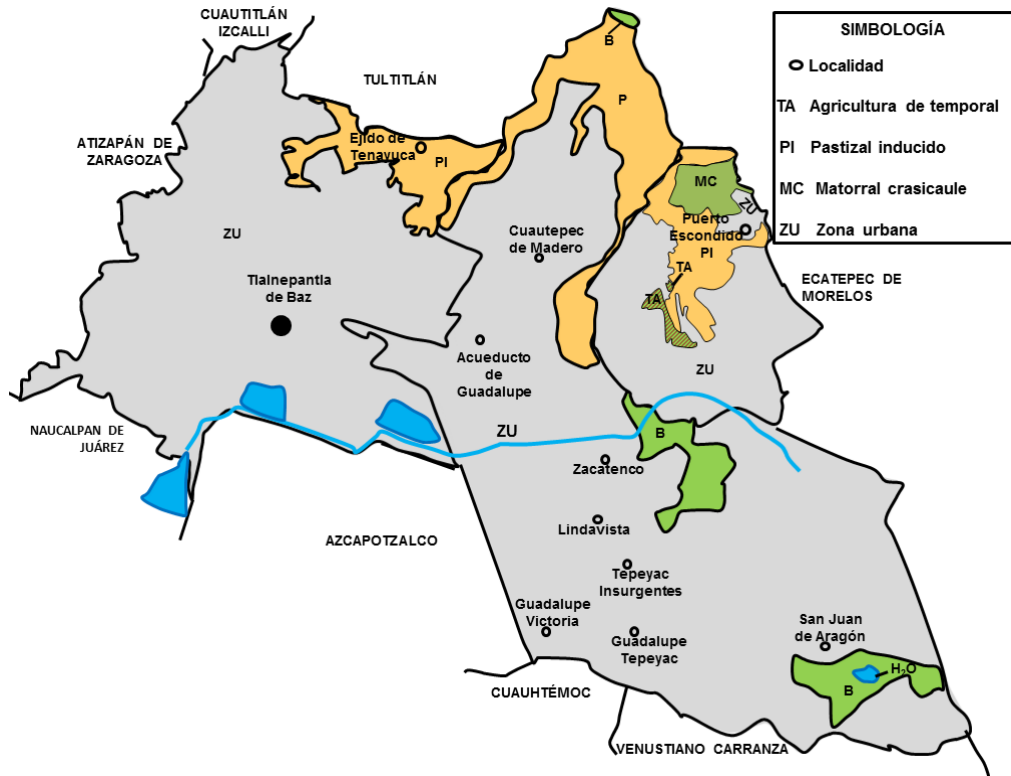


Figura 3.6 Mapa de Agricultura y Vegetación

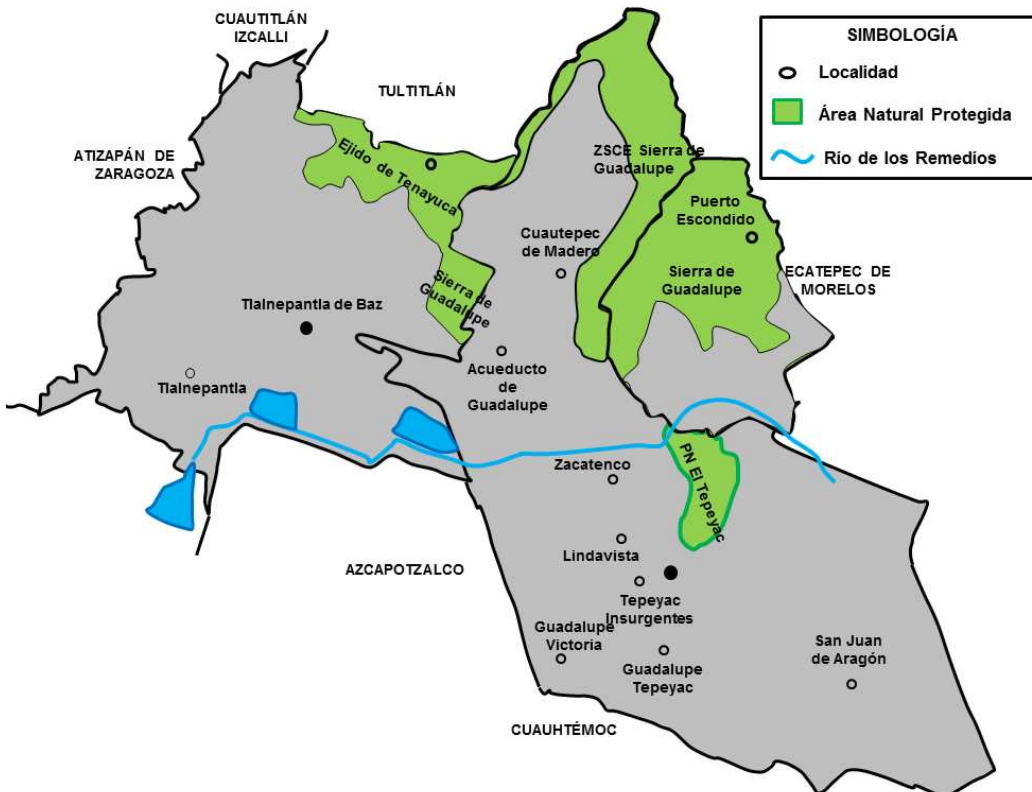


Figura 3.7 Mapa de Áreas Naturales Protegidas

### 3.7 Orografía

La Sierra de Guadalupe es una unidad volcánica neogénica, que consiste en domos volcánicos y volcanes compuestos que constituyen una estructura circular de 17 km de diámetro, con una altura de 800 m respecto a la planicie lacustre que la delimita. Se reconocen 18 elementos distintos que muestran la transformación del relieve volcánico y tectónico neogénico por la erosión, principalmente del Cuaternario.

Se aprecian las estructuras geológicas (domos volcánicos, fracturas, fallas) con una clara expresión en el relieve, ya que la erosión los ha expuesto con claridad y no se ha pasado a una etapa en que desaparezcan los rasgos originales. Un crecimiento urbano acelerado produjo a partir de los años setenta, mismo que actualmente avanza sobre las laderas (Lugo y Salinas, 1996). En la figura 3.8 se muestra el mapa orográfico de la zona que surca el Río de los Remedios.

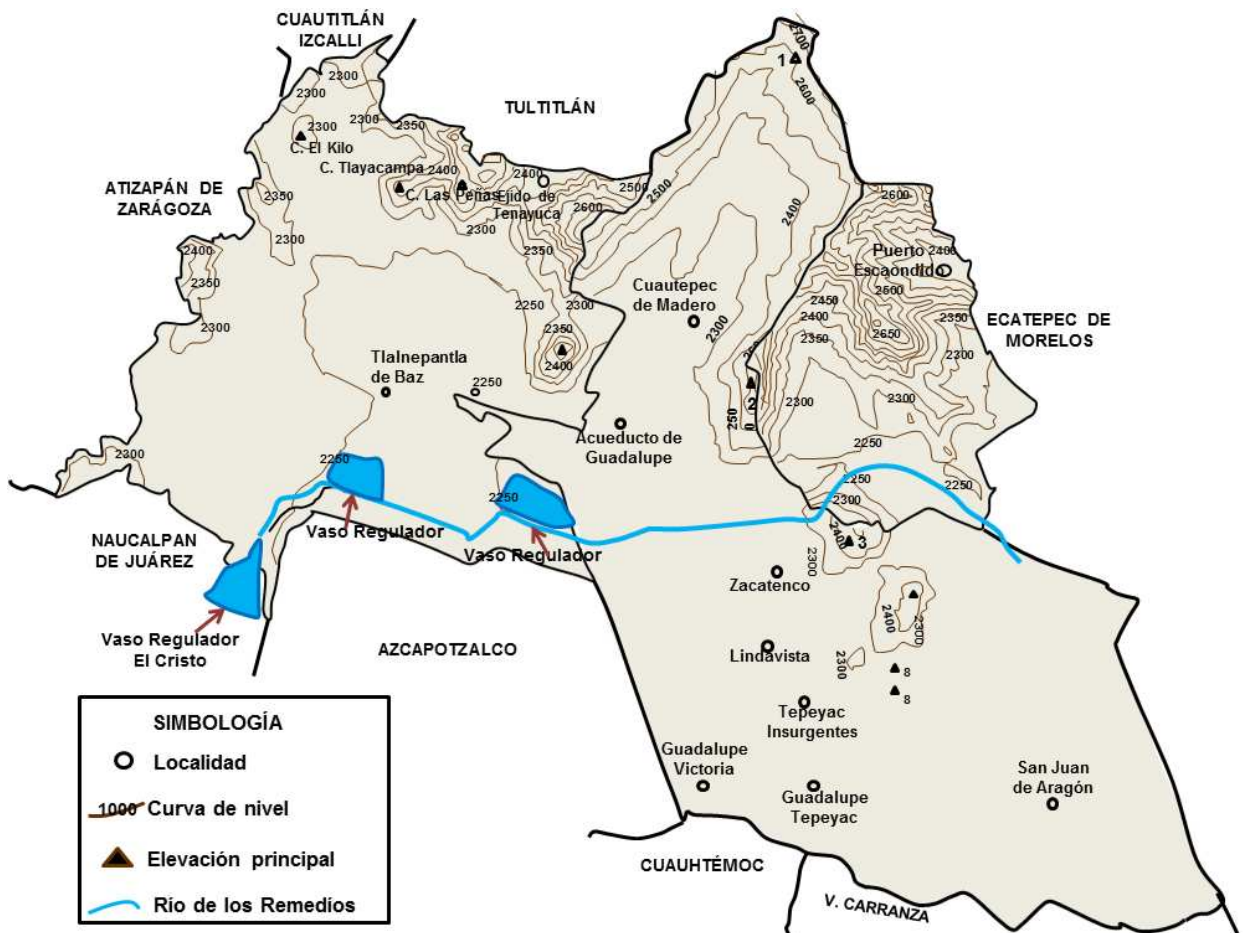


Figura 3.8 Mapa Orográfico

### 3.8 Población

La información tomada de los municipios y/o delegaciones es de los que se encuentran a través del cauce del Río de los Remedios. Según el II Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la delegación Gustavo A. Madero para el año 2000 había una población total de 1,235,542 de los cuales 595,133 son hombres y 640,409.

Para el caso de la delegación Azcapotzalco contaba con una población total de 441,008 de los cuales 210,101 son hombres y 230,907 mujeres para el censo del mismo año.

El municipio de Tlalnepantla de Baz contaba hasta el año 2005 con un total de 683.608 habitantes, de los cuales, 331.143 eran hombres y 352.665 eran mujeres. En la figura 3.9 se presenta el área de estudio enfatizando al Río de los Remedios en azul, y se diferencia el Distrito Federal de los municipios del Estado de México por la frontera en morado, así como también los puntos que se muestran son de algunos pozos cercanos al cauce.

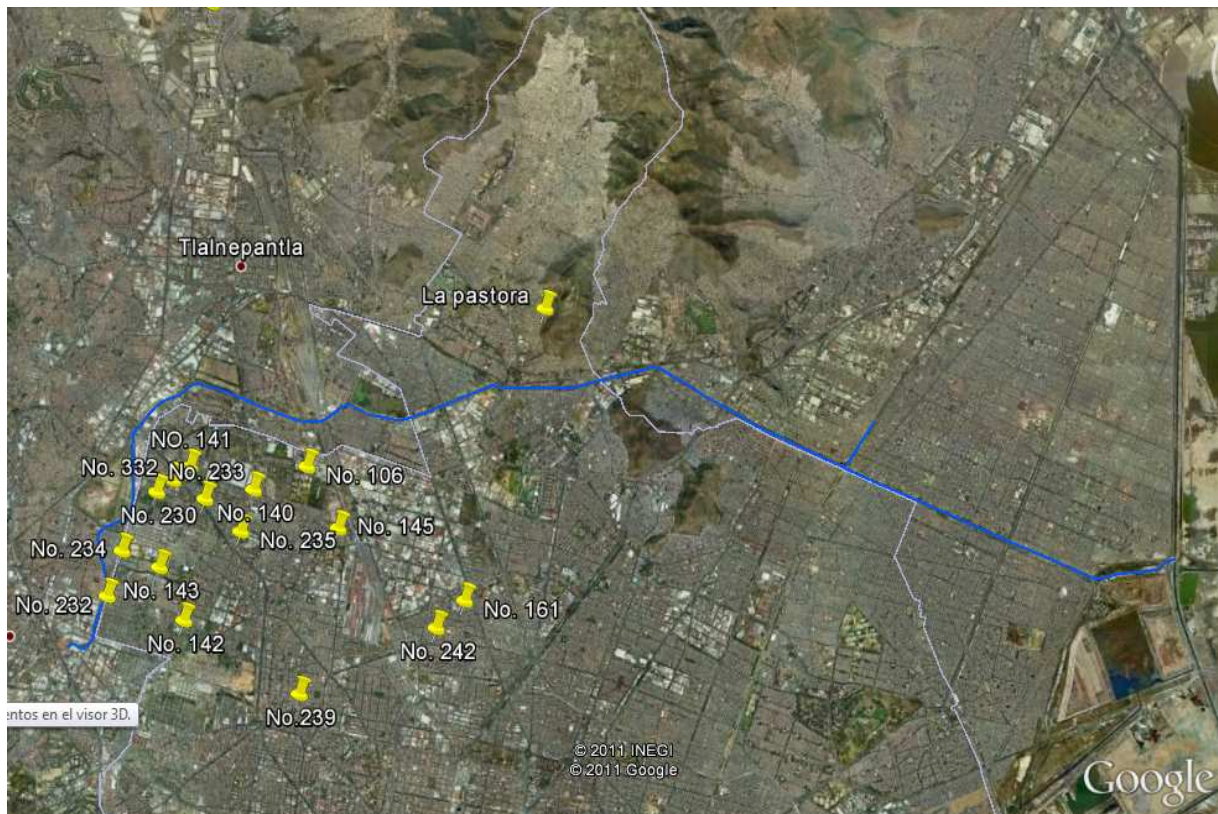


Figura 3.9 Área de estudio, con el río marcado en azul



## *CAPITULO IV*

### *MATERIALES Y METODOS*

En este capítulo se describen los métodos aplicados para el desarrollo del presente trabajo. En concreto, se detalla el procedimiento de muestreo y las diferentes etapas que se han seguido para llevar a cabo la fase de muestreo de suelos y agua, así como la preparación de las muestras.

#### **4.1 Muestreo y Caracterización del Sitio**

Para el buen desarrollo de una investigación, así como para la obtención de resultados confiables, es necesario, en primer lugar, llevar a cabo una caracterización del medio en estudio.

La caracterización de un sitio, implica actividades de muestreo y análisis que tienen como finalidad determinar la extensión y naturaleza de las concentraciones de metales pesados en el suelo y el acuífero del río; asimismo, la caracterización del sitio provee bases para adquirir la información técnica necesaria para desarrollar, proyectar, analizar y seleccionar posibles alternativas apropiadas en el manejo tanto del agua como del suelo.

Para cualquier investigación relativa a suelos contaminados (alterados), es importante definir tanto como sea posible, mediante un pozo pedológico (perfil de suelos), y apreciar la variabilidad vertical y horizontal del material contaminante, la obtención de información relacionada con este generalmente requiere de la toma de muestras y de la determinación de sus características físicas y químicas (VanDeuren, et al., 2002-18). Para el muestreo de agua en canal abierto se necesita un aforador, este se usa cuando no se cuenta con ningún dispositivo de medición de caudal.

El muestreo es el primer paso a efectuar para realizar un análisis de suelos y agua, es a su vez la actividad por medio de la cual se toman partes representativas del medio a analizarse, con el objeto de conocer las condiciones de este a partir del estudio de las características de varias de sus partes.

El objetivo principal de cualquier operación de muestreo es coleccionar ejemplares fraccionales representativos del medio que se está investigando. Más específicamente, el propósito del muestreo en un sitio contaminado (alterado), es adquirir información que ayude a determinar la presencia e identidad de los



contaminantes (en el caso que nos ocupa de metales pesados) presentes y el grado en el que estos alteran las condiciones circundantes.

#### 4.1.1 Tipo de muestreo seleccionado

El muestreo representativo juega un papel muy importante en la calidad y la utilidad de los datos analíticos. El muestreo representativo debe tener altos niveles de precisión y exactitud, que garanticen que una muestra o grupo de muestras sea representativa y proporcione con precisión las características del sitio, además de que los resultados sean reproducibles. La exactitud se refiere a la aproximación del valor del análisis del suelo y agua con respecto al contenido real en campo, y la precisión describe la posibilidad de reproducir de los resultados. Ambos parámetros están determinados por el número de muestras tomadas en el campo. A medida que se incrementa el número de muestras, aumenta la exactitud y la precisión. El diseño de un muestreo puede ser:

- (i) A juicio (no probabilístico): Gran heterogeneidad espacial y/o temporal.
- (ii) Aleatorios simple, estratificado o sistemático (probabilístico): Áreas más o menos homogéneas.

Por lo anterior y considerando que el propósito fundamental de este trabajo es comparar el impacto de la descarga de aguas residuales de distintas industrias contiguas al suelo y flujo del río que no guardan similitudes entre sí, el tipo de muestreo más apropiado es el no probabilístico (Mason 1992).

#### 4.2 Planeación de un Muestreo

No existen reglas generales para realizar un muestreo de suelos, puesto que cada sitio requiere de un muestreo en particular. Por esto, es importante realizar un esquema de muestreo para cada sitio, el cual consiste en la ubicación óptima de los puntos de muestreo y debe de ser lo suficientemente flexible para permitir ajustes durante las actividades en campo. Por ejemplo, la falta de acceso a los sitios de muestreo preseleccionados, las formaciones de subsuelo no previstas o las condiciones climáticas, pueden demandar ajustes importantes en los planes de muestreo.

Durante el diseño de un plan de muestreo para un suelo contaminado es importante considerar que las características físicas y químicas del sistema inciden en la transformación, retención y movimiento de los contaminantes a través del suelo. El contenido de arcilla, materia orgánica, la textura, la permeabilidad, el pH, el potencial

redox (Eh) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, afectan la velocidad de migración y la forma química del contaminante.

#### 4.2.1 Materiales e instrumentos para el muestreo

Los instrumentos de muestreo adecuados son esenciales para realizar un buen muestreo y para las buenas prácticas de laboratorio.

a) Entre los principales criterios a considerar para la selección de herramientas adecuadas de muestreo, se encuentran los siguientes:

- . Tamaño de muestra necesaria para los análisis requeridos, con base en la(s) característica(s) o propiedad(es) de interés.
- . Tipo de suelo (arenoso, arcilloso, etc.) y condiciones de humedad.
- . Profundidad máxima a la que se va a tomar la muestra.
- . Accesibilidad al sitio de muestreo.
- . Requerimientos del personal para su manejo.

b) Instrumentos para la toma de muestras. La selección de instrumentos adecuados es esencial para un buen muestreo y para un buen análisis de laboratorio. Para el caso de suelos contaminados con metales, los utensilios para el muestreo deben ser de plástico, teflón o acero inoxidable; entre los más comunes se encuentran: palas rectas y curvas, picos, barrenas y barretas, nucleadores, espátulas, navajas y martillo de geólogo (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Instrumentos comúnmente usados para el muestreo de suelos: a) nucleadores; b) palanca "T"; c) espátulas; d) palas

Para el muestreo de agua la cuadro 4.1 resume en un listado con base en las normas oficiales mexicanas, de los parámetros de rutina que se analizan en una descarga y especifica el tipo de envase que usa para cada parámetro a determinar, así como el volumen mínimo de agua que se requiere coleccionar para hacer el análisis.



**Cuadro 4.1** Resumen de parámetros a muestrear en agua residual y sus características en toma de muestras y preservación para la NOM-Ecol-001-1996.

Parámetro	Recipiente	Enjuague antes de tomar la muestra	Volumen mínimo requerido	Tipo de muestra	Preservación	Tiempo máximo para análisis
<b>Fosforo total</b>	Plástico	2 a 3 veces	1L	Compuesta	4 ° C	28 días
<b>Nitrógeno total</b>	Plástico	2 a 3 veces	1L	Compuesta	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH<2 4°C	28 días
<b>Metales</b>	Plástico	2 a 3 veces	1L	Compuesta	HNO <sub>3</sub> pH<2 4°C	6 meses
<b>Cianuros</b>	Plástico	2 a 3 veces	1L	Compuesta	NaOH, pH>12 4°C	24 horas

FUENTE: (Arce Velázquez, et al., 2003)

**c)** Material de apoyo. Como material de apoyo durante un muestreo, es importante incluir: cartas topográficas, edafológicas, climáticas y geológicas, un plano cartográfico del sitio y mapas de carreteras. Adicionalmente, es recomendable incluir una libreta para anotaciones, una cámara fotográfica y la cadena de custodia para las muestras.

**d)** Material para la orientación y ubicación de los puntos de muestreo y para medir la zona.

- . Sistema global de posicionamiento (GPS)
- . Lisímetro
- . Cinta métrica
- . Estacas

**e)** Material para guardar y transportar muestras. El material a emplear debe ser compatible con el material a muestrear, deber ser resistente a la ruptura y evitar reacciones químicas con la muestra y/o pérdidas por evaporación. El volumen del contenedor debe ser aproximadamente el mismo de la muestra, con la finalidad de minimizar el espacio vacío. Algunos de los materiales que pueden utilizarse para la colección de muestras son:

- Frascos de vidrio (boca ancha y angosta): compuestos semi-volátiles, pesticidas y metales
- Viales de vidrio: compuestos volátiles.
- Contenedores de polietileno: conductividad.
- Botellas de plástico: agua



**f)** Conservación de muestras. Los recipientes en los que se colectaron las muestras deben sellarse adecuadamente. En general, es recomendable evitar en lo posible el uso de agentes químicos para conservar muestras de suelo. Para su conservación es conveniente mantenerlas en lugares frescos (4 a 6 °C) y oscuros.

**g)** Material de seguridad y limpieza. Deben incluirse guantes de látex, agua desionizada, lentes de seguridad, toallas de papel, mascarilla para polvos, franelas, botas de plástico y traje impermeable.

**h)** Material para etiquetar y marcar las muestras:

- . Etiquetas adheribles
- . Marcador indeleble
- . Cinta adhesiva
- . Bolígrafos

Asimismo, la cantidad de suelo a colectar por cada muestra está determinada por el tipo y número de parámetros a analizar. En el cuadro 4.2 se muestran las cantidades de muestra requerida para cada tipo de análisis (Gerlach y Nocerino, 2003-21).

**Cuadro 4.2** Cantidad de muestra requerida en función del análisis a realizar (suelo)

Análisis	Muestra (gr)
Caracterización química: carbono orgánico, pH, CIC, Ca, Mg, N, P y K	500 gr
Caracterización física: textura, densidad	500 – 2000 gr
Contaminantes inorgánicos, principalmente metales	150 gr
Microbiológico (bacterias y Hongos)	100 gr

#### 4.2.2 Profundidad de muestras

La profundidad de un muestreo depende directamente del objetivo del mismo, es decir, si está diseñado para determinar afectaciones a la salud o ambientales (Cuadro 4.3). Las propiedades físicas del suelo, su tamaño de partícula, cohesión, humedad, y factores como la profundidad del lecho rocoso y del manto freático, limitarán la profundidad a la que las muestras pueden tomarse, así como el método para su recolección.

Existen dos porciones de suelo que son importantes para un muestreo ambiental: (i) la capa superficial (0-15 cm), que refleja la deposición de contaminantes transportados por aire o depositados recientemente; y (ii) la capa sub-superficial, en donde pueden encontrarse contaminantes depositados por derrames de líquidos o por entierros y que pueden encontrarse a profundidades considerables.



**Cuadro 4.3** Profundidad recomendada para la toma de muestras en función del objetivo del muestreo

Objetivo del muestreo	Profundidad recomendada
Riesgo de contaminación en acuíferos	Por horizontes
Riesgo a la salud	0 – 10 cm
Afectación a microorganismos del suelo	Horizonte A
Fertilidad	Espacio radical (0 – 30 cm)
Lixiviación	Por horizontes

Los métodos de muestreo de cada porción de suelo son ligeramente diferentes y se describen a continuación.

**a) Muestreo superficial.**

Generalmente se realiza para estudios de evaluación de riesgos a la salud humana, las muestras se toman a una profundidad de 0 a 10 cm. El muestreo superficial busca determinar la concentración de contaminantes depositados recientemente en el suelo y que no tienden a migrar verticalmente bajo la superficie. Los instrumentos más comunes son espátulas, palas rectas y cucharones.

**b) Muestreo vertical o profundo.**

Generalmente se realiza para estudios de clasificación de suelos de acuerdo a sus perfiles verticales, es decir, requiere excavación. También se emplea para determinar la migración de un contaminante, especialmente cuando estos son solubles y pueden migrar a través del suelo. Las muestras son tomadas desde la superficie hasta donde termina la migración del contaminante. Los instrumentos que generalmente se utilizan para realizar este tipo de muestreo son nucleadores, barrenas, palas curvas y palancas “T” (Csuros, 2002-23).

**4.2.3 Preparación de las muestras**

El problema del muestreo no concierne únicamente a las ciencias ambientales y de los recursos naturales, afecta a la totalidad de las ciencias experimentales, así como al grueso de actividades en que se hayan de generar conclusiones acerca de un colectivo. En la ciencia ambiental, sin embargo, se presentan complicaciones adicionales debidas a la heterogeneidad de la distribución espacial de las variables sometidas a estudio, la necesidad de establecer criterios para la ubicación espacial de muestras, como consecuencia del punto anterior, la inexistencia de un soporte de muestra predefinido, la estratificación espacial de las variables estudiadas, concentraciones químicas en particular, que, por las propias características de los

procesos de contaminación (distribución irregular de las fuentes contaminantes, carácter puntual de muchas de ellas, etc.), no coincide con dominios espaciales “naturales” (regiones geológicas, tipos de suelos, halos de dispersión u otros), a grado tal que se puede confundir y superponer a ellos.

#### 4.3 Estrategia experimental

El siguiente diagrama comprende la totalidad de los eventos a cubrir dentro de la fase experimental del trabajo, desde la identificación de los sitios, toma de muestras de agua, análisis en campo a pozos pedológicos hasta los resultados a obtener y el sentido final de la investigación.



Figura 4.2 Diagrama de secuenciación de actividades

##### 4.3.1 Desglose de actividades y acotaciones técnicas

###### a) Identificación de sitios.

La intención del presente trabajo es contrastar el grado de alteración del suelo y agua del Río de los Remedios a causa de verter aguas residuales de las industrias contiguas.

Para la identificación de sitios primero se hizo un recorrido en el área de estudio para determinar cuáles y cuantos sitios a muestrear serían los ideales de acuerdo a los objetivos del trabajo.

#### **b) Criterios de selección y estudio de sitios.**

La elección de sitios se hizo de acuerdo a evidencias plausibles de contaminación tales como derrames de sustancias, zonas de influencia industrial, mal olor, color extremadamente turbio del agua, zonas aledañas a obras considerables de ingeniería y en general puntos en los que se sospeche fundadamente la interacción exhaustiva del río con las industrias cercanas al cauce.



**Figura 4.3** Compuertas del Vaso Regulador “El Cristo” permitiendo el flujo del agua del Río de los Remedios

#### **c) Muestreo de especímenes de suelo**

El plan de muestreo suele ser el crucial punto de partida para todo estudio relacionado con el suelo y su caracterización, es por ello que se ha de tener especial cuidado en este apartado, entre los criterios más importantes a considerar se incluyen (Ford *et al.* 1984):

- Representatividad. Una muestra posee las mismas características o propiedades que el material en estudio.
- El grado de semejanza entre las muestras y el material en estudio se determina por las características a estudiar y por las técnicas analíticas usadas.

- Tamaño de muestra. Se debe seleccionar cuidadosamente, con base en las propiedades físicas de la matriz y los requerimientos y/o limitaciones del muestreo y las técnicas de análisis.
- Número y/o frecuencia del submuestreo. Estas consideraciones deben basarse en el tipo de información estadística que se desea y en la naturaleza del material a coleccionar.
- Mantenimiento de la integridad de las muestras. La muestra debe conservar las propiedades de las condiciones originales en el sitio (al tiempo del muestreo), durante la colección, transporte y entrega al analista.

La toma de muestras se hará a una profundidad no mayor a 50 cm y los pozos pedológicos habrán de mostrar evidencia incontrovertible de perturbación antropogénica.



**Figura 4.4** Toma de muestras con el nucleador

#### **d) Muestreo de especímenes de agua**

Hay dos Técnicas de muestreo en el caso del agua para el tipo de análisis que se quiera efectuar, la Muestra simple y la Muestra compuesta.

- Muestra simple: se toma en un solo sitio determinado y una sola vez. Se utiliza para determinar parámetros de calidad del agua.
- Muestra compuesta: se toman varias muestras en distintos momentos y se colocan en el mismo recipiente o en recipientes individuales.



**Figura 4.5** Descargas de aguas residuales a lo largo del cause

**e) Análisis físicos a muestras.**

Luego del muestreo, someter a análisis de laboratorio a las muestras será el siguiente paso a desarrollar. Se determinará si hay metales pesados contenidos tanto en agua como en suelo. Y si los hay cuáles de ellos se encuentran y en que concentración.

**E1) Determinaciones en laboratorio de propiedades del suelo**

La determinación de propiedades específicas como textura, densidad aparente, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), potencial Hidrógeno (pH).

**E2) Determinaciones en laboratorio de propiedades del agua**

En el caso del agua no es necesario determinar todos los parámetros es suficiente con conocer cuál es su conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), potencial Hidrógeno (pH).

**4.4 Análisis de las propiedades y características del suelo.**

Las propiedades y características edáficas a analizar se seleccionaron en atención a su susceptibilidad a la alteración o transformación gracias a las actividades industriales en la periferia del río.

Las propiedades y características a analizar son: la reacción del suelo, la conductividad eléctrica en el extracto acuoso 1:5 y en el extracto de saturación, los carbonatos, la capacidad de intercambio catiónico y el análisis granulométrico.



A continuación se describen los métodos y como se debe llevar a cabo cada uno de estos para llegar al resultado esperado.

#### 4.4.1 Procedimientos para valorar la contaminación de un suelo

La peligrosidad (movilidad, disponibilidad) de un contaminante se determina por distintos procedimientos químicos y mineralógicos. Para verificar si un elemento o compuesto está en una fase soluble en agua, que es cuando con mayor facilidad podrá transferirse a una planta u organismo vivo, la primera valoración de la movilidad se debe hacer determinando que fracción del mismo se encuentra soluble en agua (extracción con agua). A veces también puede hacerse esta extracción en agua ligeramente ácida.

Otra medida de la posible transferencia de metales (especialmente de cationes divalentes) a una planta viene dada por la extracción que se obtiene tratando el suelo con DTPA, o con EDTA (0.05M a pH 7.0) (Quevauviller et al., 1998). Existe un cierto acuerdo de que esta medida se aproxima bastante a la cantidad que en general las plantas pueden absorber de un suelo en condiciones normales (Ure et al., 1995).

Junto a estos métodos simples, que sólo distinguen entre metal residual y metal liberando en agua o en un extractante orgánico suave, hay procedimientos más elaborados de extracciones química secuencial, que pueden conducir a la llamada "especiación" de los distintos elementos de un suelo. Éste es uno de los tipos de especiación: la especiación operacional. Pero hay otros dos tipos de especiación: la especiación química, que distingue el grado de oxidación del elemento, y la especiación funcional, que determina la forma molecular en la que se encuentra el elemento.

Así una especiación de As puede conducir a conocer su grado de oxidación,  $As^{+3}$  o  $As^{+5}$ , especiación química, a conocer su forma molecular, arseniato, sulfoarseniuro, etc. o cómo está coordinado con otros átomos especiación funcional, y por último, si esta soluble, asociado a la materia orgánica o a oxi-hidróxidos de hierro, especiación operacional. La fracción asimilable por las plantas de un determinado elemento de un suelo depende de su especiación química y funcional, o sea, de su distribución entre sus formas químicas y especies, pero a esto no conduce exactamente una extracción secuencial, que es sólo un procedimiento operativo con bastantes limitaciones, como se verá a continuación.

La especiación operacional, o simplemente especiación, es la que con mayor frecuencia se aplica a los suelos, porque desde un punto de vista analítico es más





sencilla y se puede realizar con técnicas instrumentales que están al alcance de cualquier laboratorio. Para una buena especiación se debe disponer de métodos que determinen la concentración total, y selectivamente, la concentración de las diferentes especies químicas. La selectividad de los métodos depende en gran parte de la rapidez de las reacciones que tienen lugar en la formación o disociación de las especies que se miden.

Sin entrar en detalles analíticos, que escapan de esta presentación, se puede indicar que las aproximaciones clásicas, que consisten en aislar y estudiar cada uno de los constituyentes separadamente, tienen dos limitaciones: a) la separación completa es muy difícil, si no imposible, b) las propiedades de un componente de una mezcla compleja no son aditivas, debido a las múltiples interacciones que normalmente existen entre ellos.

Las extracciones secuenciales, si bien no conducen a una especiación química completa, si pueden tener un carácter práctico, de mayor interés en términos del comportamiento de un elemento como contaminante, porque se pueden relacionar los contenidos (que no son siempre totales) asociados a distintos componentes del suelo con su movilidad y facilidad para ser transferido a los organismos. En resumen, una extracción secuencial puede valorar de forma aproximada la distribución de los elementos trazas respecto a las distintas fases de un suelo y su movilidad relativa.

Los procedimientos de extracciones secuenciales aparecen en la literatura desde al menos los años sesenta, y son constantemente revisados y modificados, o incluso se describen otros nuevos para casos particulares con el fin de mejorar la precisión para fases y elementos concretos. Hall et al. (1996) recogió y comparó los esquemas metodológicos más frecuentes usados hasta entonces para suelos y sedimentos.

En esencia, el procedimiento básico consiste en obtener varias fracciones utilizando extractantes diferentes de forma sucesiva. La finalidad de estas extracciones es siempre determinar, con la mayor precisión posible, la distribución de los elementos traza existentes en una muestra sólida entre fracciones de distinta naturaleza. A esta distribución es a lo que se denomina normalmente especiación (**partitioning**). Una revisión crítica de lo que puede ser este tipo de especiación y de los protocolos utilizados se puede encontrar en el trabajo de López Julián & Mandado (2002).

Uno de los protocolos más populares es el de Tessier et al. (1979), que ha sufrido muchas modificaciones (Ure et al. 1993; Quevauvillir et al. 1994; Gómez Ariza et al. 200; Galán et al, 2000). El esquema simplificado de este protocolo puede ser el siguiente: la fracción 1 es la tratada con acetato amónico, la fracción 2 es la obtenida de un medio reductor con clorhidrato de hidroxilamina y ácido acético, la fracción 3

es obtenida con ácido nítrico y agua oxigenada y la fracción 4 es insoluble (Cuadro 4.4).

**Cuadro 4.4** Esquema de extracción secuencial para la evaluación de la distribución de metales en sedimentos (5.5 g de muestra) (Galán et al., 2000)

Fracción	Procedimiento
Ácida (F1)	NH <sub>4</sub> Ac 1M (35ml), pH 5, 1h, 20°C, agitación continua (v olteador 40 rpm)
Reductora (F2)	NH <sub>2</sub> OH·HCl 0.4M en ácido acético al 25% (20 ml), 6h, 96°C, agitación manual cada 30 min.
Oxidante (F3)	HNO <sub>3</sub> 0.2M (3ml) + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30% (5ml), pH 2 con HNO <sub>3</sub> , 3h, 85°C, agitación manual cada 30 min.; añadir H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30% (3ml), pH 2 con HNO <sub>3</sub> , 3h, 85°C, NH <sub>4</sub> OAc 3.2 M (5 ml) v/v en HNO <sub>3</sub> diluida en 20 ml con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 30 min., 20°C agitación continua (volteador 40 rpm)
Residuo (F4)	HF/HNO <sub>3</sub> /HCl 10/3/2.5/ (20 ml), 2h a sequedad

F1 corresponde a los metales del complejo de cambio y a los que están formando, o adsorbidos en, carbonatos. Este paso se puede subdividir en dos, un tratamiento con MgCl<sub>2</sub> 1M, durante 1 h, para extraer los cationes de cambio (cationes que pueden ser reemplazados por otros más competitivos, independientemente de que sean minerales de la arcilla, materia amorfa, etc.) y un segundo tratamiento con CH<sub>3</sub>COONa a pH 5 con ácido acético, durante 5 h, para hacer el ataque de los carbonatos. En F2 se concentran los metales asociados a los compuestos reducibles (óxidos de Mn y oxihidróxidos de Fe, y a veces de Al, amorfos o pobremente cristalinos).

Dependiendo del grado de ordenación del material pueden existir varias formas de asociación con los metales pesados; metales intercambiables y solutos en las intercarras debido al acomplejamiento en la superficie con grupos funcionales y solutos en la intercarras, moderadamente fijados por precipitación o coprecipitación (amorfos), y metales fuertemente ligados a los óxidos. F3 es la fase oxidable y en ella estarán los cationes ligados a la materia orgánica (acomplejados, adsorbidos y quelatados), y a los sulfuros (parcialmente). F4 es la fracción residual, donde los metales están en las estructuras cristalinas de los minerales resistentes.

Los resultados químicos y mineralógicos se pueden tratar mediante algún procedimiento estadístico, por ejemplo, el análisis de componentes principales, y con ello intentar relacionar el análisis químico de las distintas extracciones entre sí y con las fases encontradas. Un esquema más completo de una especiación químico-mineralógica puede ser el que se presenta en la Figura 10 (Gálán, 2003). Un procedimiento de este tipo puede servir para valorar razonablemente el riesgo de contaminación de un suelo a medio-largo plazo.



Frente a estos métodos indirectos, o parcialmente directos cuando se estudian las fases sólidas directamente por IR, FRX, EDS, existen métodos de especiación directa mediante técnicas espectroscópicas sofisticadas (XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy, EXAFS: Extended X-ray Absorption Near-Edge Structure, XAF: X-ray absorption Spectroscopy, etc.) que permiten una especiación química completa. Con estas técnicas se puede conocer mejor a escala atómica lo que ocurre entre las superficies sólidas, cristalinas o no, y las especies químicas.

Estos procedimientos de análisis requieren a veces el empleo del sincrotrón, lo que no está fácilmente disponible para cualquier laboratorio e investigación. Además el trabajo rutinario de cientos de muestras sería imposible o al menos muy lento y costoso con estas técnicas. No obstante en casos puntuales se hace necesario llegar a conocer la especiación química real de unos elementos, y entonces el uso de estas técnicas puede ser necesario.

Otra forma ya clásica de conocer la movilidad de los elementos traza es la lixiviación *in situ* o en el laboratorio. A partir de columnas de experimentación o de ensayos en batch se pueden obtener isotermas y curvas de adsorción-desorción, y modelizar los experimentos en función del pH o de la cantidad y tipo de contaminantes para predecir el comportamiento del suelo. También se puede usar esta metodología combinada con otras ya citadas. Por ejemplo, isotermas de adsorción-desorción con especiación mediante extracciones secuenciales, y modelizar de las condiciones de solubilidad de los metales para predecir los mecanismos geoquímicos que controlan la lixiviación y movilidad. Uno de los programas más usados para esta modelización es el PHREEQC-2 (Parkhurst & Appelo, 1999).

**Cuadro 4.5** niveles medios del fondo de algunos metales traza en suelos del mundo (W), Europa Comunitaria (EC) y Polonia (P) (Kabata Pendias, 1995)

Metal	Localidad	Cofieciente suelo/Clark	Podsoles	Cambisoles	Fluvisoles
Cu	W	0.7	13	23	24 <sup>a</sup>
	EC		10	15	47
	P		5	10	15
Cd	W	10	0.3	0.5	0.4 <sup>a</sup>
	EC		0.5	0.6	0.4
	P		0.4	0.5	0.5
Zn	W	2	45	60	65 <sup>a</sup>
	EC		28	48	63
	P		37	58	84
Pb	W	3	20	30	23
	EC		23	29	37 <sup>b</sup>
	P		18	20	23

<sup>a</sup> Kastanozems / <sup>b</sup> varios suelos



A pesar de todos los métodos de especiación (operacionales, funcionales, químicos, químico-mineralógicos y directos) y su modelización ofrecen un cuadro con las posibles “disponibilidades” de los elementos en un suelo y su facilidad de asimilación por las plantas, la absorción de un determinado elemento por una planta específica. Hay elementos que se absorben más fácilmente que otros además ciertas plantas son absorbentes selectivos. Kloeke et al. (1994) definieron el denominado “coeficiente de transferencia” como la concentración de un determinado metal en el tejido de una planta frente a la concentración de este metal en el suelo. Este índice es máximo para Cd, Tl, Zn, Se y Cu, medio para Ni y mínimo para Co, Cr, Pb, As, y Sn. En general cuanto más persistente un elemento traza contaminante en el suelo, más estable se hace, y así disminuye la concentración biodisponible y su toxicidad.

Otra posibilidad para comparar la abundancia relativa de los elementos traza en suelos es normalizarla con elemento universalmente encontrado y considerado como estable en la mayor parte de los ambientes geoquímicas. Tal es el caso del Al. Una comparación con el Al ha mostrado que algunos elementos como Cd, Pb y As aparecen normalmente concentrados en el suelo.

La toxicidad de un elemento depende de su actividad biológica, es además particular para cada especie e individuo y finalmente depende de la forma en que se suministre (vía respiratoria, ingestión, contacto), por lo que sólo el estudio toxicológico podrá decidir la cantidad total biodisponible admisible de un elemento traza. Como la mayor peligrosidad está casi siempre relacionada con su ingestión como elemento disponible en solución los valores límite, umbrales máximos permitidos, se dan teniendo esto en cuenta.

En términos generales se considera que las fracciones asimilables de un suelo se pueden equiparar a la extraída con EDTA y oscilan sobre el 10% del total, aunque en función de los parámetros del suelo antes comentados esta cantidad puede variar hasta el 40% del total según nuestras experiencias.

#### **a) Nivel de referencia**

Representa el máximo valor admisible para los suelos no contaminados. Normalmente se calcula por el percentil del 90% de los valores correspondientes a los suelos naturales no contaminados. Indica que el 90% de los suelos presentan valores inferiores a él. Para este umbral se debe conocer el pH del suelo y el contenido total de As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Tl, Zn.

## b) Nivel de investigación

En este nivel, los suelos se encuentran presuntamente contaminados y se propone una serie de determinaciones para evaluar la posible toxicidad de la contaminación. Se establecen dos niveles de peligrosidad.

### a) Nivel de investigación recomendable

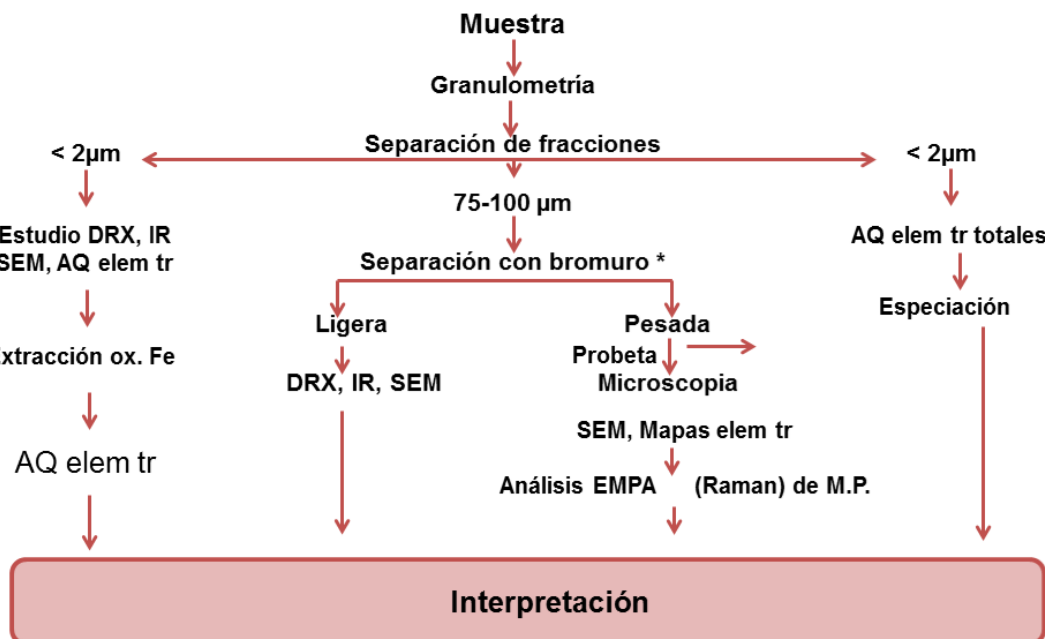
Es el nivel de alerta a partir del cual se sospecha que puede existir una contaminación peligrosa. A este nivel se recomienda realizar una serie de determinaciones para precisar la posible toxicidad de la contaminación (además de las determinaciones reguladas en el nivel anterior):

- Parámetros del suelo: textura, contenidos de materia orgánica, carbonatos, oxihidróxidos de Fe libre y mineralogía de arcillas.
- Elementos traza: se recomienda determinar el contenido de metales solubles en agua y extraíbles por EDTA.

### b) Nivel de investigación obligatoria

Se supone que a partir de este umbral el suelo se encuentra contaminado y se establece la obligatoriedad de investigar adecuadamente esta contaminación.

Se han de realizar con carácter obligatorio todas las determinaciones referidas en el umbral anterior y además se recomienda la extracción secuencial propuesta por Tessier et al., (1979).



\* Alternativamente a la separación del MP con bromorfo se puede hacer una separación magnética

**Figura 4.6** un esquema de trabajo para la especiación químico-mineralógica (Galán, 2003)



#### 4.4.2 Medición del potencial hidrogeno (pH)

Con la ayuda del medidor de pH es posible medir de forma rápida y precisa el valor pH del suelo o de una prueba tomada del suelo. Para ello debe penetrar el electrodo en la tierra previamente mullida y leer el valor pH en la pantalla digital. Así, el medidor de pH para el suelo es la solución ideal para una medición del valor pH en tierra. Para medir el pH del agua se hace lo mismo, es decir se introduce el electrodo al agua y únicamente hay que leer el resultado en la pantalla.

#### 4.4.3 Conductividad eléctrica

La prueba previa de salinidad (del suelo) consiste en la medida de la conductividad eléctrica en una suspensión suelo: agua 1:5. Se pesan 10 g de suelo tamizado y se añaden 50 ml de agua desionizada. La mezcla se agita en un agitador mecánico durante 30 minutos y se deja en reposo 5 minutos. El sobrenadante se centrifuga durante 10 minutos a 3500 rpm en una centrífuga. La medida de la conductividad en el extracto acuoso (CEea) se realiza en un conductímetro y se expresa en dS/m (deciSiemens por metro) a 25°C.

La conductividad eléctrica es la capacidad que el agua tiene de conducir la corriente eléctrica. Este parámetro tiene relación con la existencia de iones disueltos en el agua, que son partículas con cargas eléctricas. Cuanto mayor sea la concentración de iones disueltos, mayor será la conductividad eléctrica del agua. En las aguas continentales, los iones que son directamente responsables de los valores de la conductividad son, entre otros, el calcio, el magnesio, el potasio, el sodio, los carbonatos, los sulfatos y los cloratos.

El parámetro de conductividad eléctrica no indica, específicamente, cuales son los iones presentes en una determinada muestra de agua, pero puede ayudar a detectar posibles impactos ambientales que ocurran en la cuenca de desagüe debido a la descarga de desperdicios industriales, minería, aguas fecales, etc. Para la determinación de la conductividad se utiliza un medidor de conductancia, procediendo en igual forma que con el medidor de pH.

#### 4.4.4 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo será calculada mediante la determinación de la cantidad máxima de sodio que puede ser adsorbido por el complejo de cambio. Se pesan 4 g de suelo tamizado y se saturan con sodio mediante lavados sucesivos con 30 ml de acetato sódico ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) 1N a pH 8.2.



La mezcla se agita durante 5 minutos en un agitador mecánico y se centrifuga durante 5 minutos a 3000 rpm en una centrífuga. Este proceso se repite tres veces cambiando la solución de acetato sódico y resuspendiendo el suelo cada vez. El exceso de sal se elimina del suelo con etanol 96% (v/v) mediante agitación, centrifugación y resuspensión, repitiendo el proceso tres veces.

El sodio adsorbido se desplaza con acetato amónico ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) 1N a pH 7.0 mediante agitación y centrifugación, repitiendo el proceso varias veces. El líquido sobrenadante obtenido en cada caso se decanta en un matraz aforado de 100 ml sobre el que se dispone un embudo con un filtro. Finalmente, los matraces se enrasaron a 100 ml con el mismo acetato amónico utilizado anteriormente y la solución final se conserva en botes de plástico a 4°C hasta su análisis. El sodio se determina por espectrofotometría de absorción atómica con atomización por llama (EAA-Llama).

#### **4.4.5 Análisis del contenido total de metales pesados en suelos.**

Existen diferentes métodos para el tratamiento de las muestras de suelo con el fin de determinar el contenido total de metales pesados, entre los que destacan la digestión por vía seca, la digestión por vía húmeda y la fusión con diferentes tipos de fundentes. En todos los casos, el objetivo consiste en transformar la muestra sólida en una solución donde se encuentran disueltos los metales pesados. Entre estos métodos, la digestión por vía húmeda es el método más extendido para el estudio de la contaminación del suelo.

En este caso, la digestión puede llevarse a cabo mediante diferentes sistemas de calentamiento como por ejemplo, baño de arena, placa metálica, bloque de aluminio, digestor y horno microondas que, generalmente, se clasifican en dos grupos (Sastre J., et al. 2002-24):

##### **a) Métodos de digestión en vasos abiertos.**

Estos métodos han sido utilizados durante las últimas décadas y siguen siendo recomendados por algunas entidades como la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) (p. ej., ISO 11466) (ISO, 1995). Son métodos que utilizan placas calefactoras, bloques de aluminio o digestores para llevar a cabo el calentamiento y descomposición de las muestras.

La digestión se realiza en vasos abiertos o sistemas de reflujo, que se calientan a una determinada temperatura, produciéndose la solubilización de los metales contenidos en la muestra de suelo. Los principales inconvenientes de las digestiones



en abierto son la mayor pérdida de componentes debido a procesos de volatilización, la contaminación potencial entre muestras por salpicaduras durante el calentamiento y la necesidad de mayores contenidos de ácidos para llevar a cabo la digestión debido a su continua evaporación.

Asimismo, estos métodos consumen la mayor parte del tiempo de la fase de análisis, debido a que la digestión debe producirse lentamente para la completa disolución.

b) Métodos de digestión en sistemas cerrados.

Este segundo grupo de métodos está desplazando a los anteriores debido a las ventajas que presentan. Se trata de métodos rápidos y fiables, ya que el proceso de digestión se realiza en vasos cerrados, de forma limpia y controlada. La contaminación entre muestras se minimiza, lo cual determina una mayor reproducibilidad del método, y el tiempo requerido para la digestión se reduce desde horas hasta unos pocos minutos. La digestión en microondas requiere una menor cantidad de ácidos, debido a la menor evaporación de los mismos, y permite alcanzar mayores temperaturas sin un aumento considerable de la presión (Sastre, et al., 2002).

Para la digestión de muestras de suelo por vía húmeda se utilizan diferentes tipos de ácidos y agentes oxidantes, tanto en vasos abiertos como en recipientes cerrados. Los principales ácidos empleados para la determinación de metales pesados en muestras de suelo son: el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), el ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ), el ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Dentro de los agentes oxidantes, el más utilizado es el agua oxigenada ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). La combinación de varios de estos reactivos permite aumentar la eficacia de la digestión, debido al efecto conjunto de las diferentes propiedades de cada uno de ellos.

Estos ácidos son suficientemente fuertes para disolver los elementos que se encuentran asociados a los componentes del suelo y a los minerales secundarios, pero no pueden disolver completamente los metales pesados ocluidos en las redes de los minerales primarios. En consecuencia, los metales que van a ser extraídos mediante estas mezclas no representan realmente el contenido total de metales pesados en el suelo, por lo que se conoce como "análisis pseudo-total".

En algunos casos, se utiliza el ácido fluorhídrico ( $\text{HF}$ ) para la determinación del contenido total en muestras de suelo, puesto que es capaz de disolver completamente los silicatos. Sin embargo, debido a la problemática que supone la utilización de  $\text{HF}$  (elevada toxicidad por inhalación, quemaduras en la piel, interferencias durante la cuantificación) y los cuidados especiales que requiere su

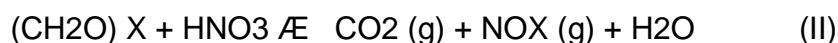
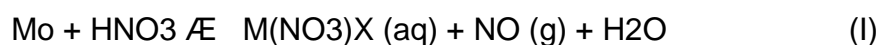




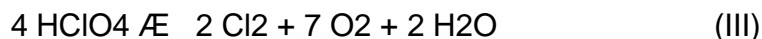
empleo (material de teflón o platino debido a la destrucción del material de vidrio), generalmente se utilizan diferentes mezclas de ácidos fuertes en los análisis de rutina.

#### 4.4.5.1 Selección de los métodos de digestión

El  $\text{HNO}_3$  es un ácido oxidante que permite la oxidación de los metales pesados (Mo) que se encuentran disueltos en la solución final (reacción I), así como la oxidación de una parte de la materia orgánica del suelo (representada por  $\text{CH}_2\text{O}$ ) (reacción II) permitiendo liberar los metales retenidos por ésta.



El  $\text{HClO}_4$  es un ácido fuerte con elevado poder oxidante en caliente, debido a la liberación de oxígeno activo (reacción III). La reacción es altamente explosiva, por lo que es necesario elevar la temperatura gradualmente y destruir parcialmente la materia orgánica (mediante una etapa de predigestión), antes de adicionar este ácido y calentar la preparación. Generalmente, no se recomienda el uso de  $\text{HClO}_4$  en vasos cerrados, debido al riesgo potencial de explosión.



Finalmente, el  $\text{HCl}$  es un ácido fuerte con propiedades reductoras débiles y carácter complejante, debido a la formación de complejos clorados solubles en agua. Este ácido tiene la capacidad de disolver fosfatos, boratos, carbonatos y sulfuros, así como un elevado número de silicatos, a pesar de que el sílice no permanece estable en la disolución. El  $\text{HCl}$  aumenta el poder de disolución del  $\text{HNO}_3$ , por lo que se utilizan conjuntamente para aumentar la eficacia del proceso de digestión.

#### 4.4.6 Reactivos y limpieza del material

Los ácidos utilizados en la fase de análisis son de calidad analítica reconocida  $\text{HNO}_3$  al 65% (v/v),  $\text{HClO}_4$  al 70% (v/v) y  $\text{HCl}$  al 37% (v/v). Por otro lado, para la limpieza de material se utilizó agua desionizada.

El material utilizado para las digestiones fue mantenido en una solución acuosa de  $\text{HNO}_3$  al 20% durante toda la noche (aproximadamente 16 horas). Al día siguiente, el material fue lavado con agua desionizada varias veces y secado al aire sobre



papeles de filtro antes de su utilización, con el objetivo de evitar la contaminación del material.

En cada tanda de digestión, se prepara al menos un blanco de método, para evaluar posibles problemas de contaminación durante el proceso de digestión de las muestras. Los blancos de método contienen los reactivos utilizados y no incluyen muestra de suelo, si bien se ven sometidos al proceso completo de digestión. Todos los blancos quedaron cerca o por debajo del límite de detección instrumental, indicando un adecuado proceso de digestión y una contaminación nula entre muestras.

#### **4.5 Análisis del contenido extraíble de metales pesados en suelos.**

Los metales pesados están presentes en el suelo bajo diferentes formas químicas o tipos de unión. La determinación de estas formas ofrece una mayor información acerca de la movilidad de los metales en el suelo, así como su disponibilidad y toxicidad.

Para la determinación de estas formas, se han desarrollado diferentes métodos de extracción que pueden agruparse en dos tipos:

##### **a) Métodos de Extracción Simple.**

Este tipo de métodos están orientados a determinar las fracciones de metales pesados disponibles para las plantas, cuyo contenido depende de la forma química del elemento y del tipo de unión con los componentes del suelo (Quevauviller, et al., 1996-28). En este caso, la extracción se lleva a cabo en una etapa y mediante la utilización de un único extractante, que tiene la capacidad de extraer los metales pesados presentes en la solución y asociados a diferentes componentes, según la fuerza de extracción del reactivo.

Consecuentemente, estos métodos se basan en la suposición que los iones asociados a algunos componentes del suelo pueden ser desplazados de los puntos de adsorción por la presencia de iones competitivos en la solución extractante. Las extracciones simples son comúnmente aplicadas en estudios de fertilidad, para la predicción de los fenómenos de absorción de elementos esenciales, en la diagnosis de deficiencias o excesos y en estudios de disponibilidad de contaminantes, con el objeto de evaluar su transferencia desde el suelo hasta las plantas o cultivos (Rauret, et al., 1989).

El principal inconveniente de estos métodos consiste en la dificultad de encontrar un reactivo efectivo que presente una fuerza de extracción cuantitativamente adecuada, en función del tipo de suelo y la fracción que se desea extraer.

b) Métodos de Extracción Secuencial.

Estos métodos están enfocados a distinguir las distintas asociaciones entre los metales pesados y los constituyentes del suelo. Para ello, se utilizan diferentes extractantes, de menor a mayor fuerza de extracción, con el objeto de evaluar las diferentes especies de metales presentes (especiación). El esquema de Tessier et al. (1979), inicialmente aplicado a sedimentos, ha sido ampliamente utilizado para la extracción secuencial de metales pesados en muestras de suelo. En este caso, los constituyentes edáficos pueden ser divididos, de forma conceptual, en fracciones específicas de metales pesados que pueden ser extraídas selectivamente mediante la utilización de distintos extractantes.

**4.5.1 Selección del extractante para la extracción secuencial**

En la Figura 4.7, se presenta un esquema de la fuerza de extracción de algunos extractantes que suelen utilizarse para la extracción simple de metales pesados en muestras de suelo, clasificados de menor a mayor fuerza.

La determinación de la fracción extraíble de metales pesados en suelos calcáreos se ha realizado, principalmente, mediante la utilización de uno de los siguientes extractantes (Quevauviller, et al., 1996-28): EDTA, DTPA y ácido acético. De todos ellos, la extracción con agentes quelantes, y en concreto con EDTA, ha ofrecido resultados más precisos en comparación con el ácido acético, que presenta una menor fuerza extractante.

Extractante	Fracciones o "depósitos"		de Unidos a materia orgánica	Metales Ocluidos en óxidos y minerales secundarios	Pesados Fracción residual
	Solubles en agua	Intercambiables			
Agua desionizada					
0.1 M NaNO <sub>3</sub>					
0.005 M CaCl <sub>2</sub>					
0.1 M HNO <sub>3</sub>					
1M NH <sub>4</sub> OAc					
0.1 M Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>					
0.5 M HOAc					
0.005 M DTPA					
0.05 M EDTA					
1 M HNO <sub>3</sub>					
Ácido (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Ox					
HNO <sub>3</sub> / HF					

**Figura 4.7** Fuerza de extracción de diferentes reactivos utilizados para la extracción de metales pesados en muestras de suelo (Fuente: Alloway, 1990-3).



De hecho, diferentes estudios con trazadores isotópicos muestran que el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) y las plantas son capaces de remover la misma cantidad para algunos metales (e.g. Zn). Algunos autores prefieren la utilización del DTPA o el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) para la extracción simple de metales pesados en suelos calcáreos.

El EDTA es capaz de extraer los metales pesados solubles e intercambiables, unidos débilmente a materia orgánica y, en menor medida, los metales ocluidos en minerales secundarios, por lo que la cantidad extraída podría corresponderse con la cantidad de metales pesados disponibles.

#### **4.5.2 Método para la extracción de metales pesados en suelos**

Para llevar a cabo la determinación del contenido extraíble de metales pesados en las muestras de suelo, se pesan 8 g de suelo pulverizado (con una precisión  $\pm 0.01$  g) en tubos de centrifuga y se añaden 35 ml de EDTA 0.05M a pH 7.0. Los tubos se sitúan en un agitador mecánico modelo con una agitación horizontal durante 2 horas a temperatura ambiente.

Una vez transcurrido este tiempo, la mezcla se centrifuga a 3500 rpm durante 10 minutos en una centrífuga. El sobrenadante se transfiere hasta matraces de 50 ml, filtrando la solución mediante filtros. Finalmente, se enrasó con el mismo EDTA utilizado en el proceso de extracción hasta un volumen de 100 ml. La solución obtenida se transfiere a botes de plástico para su conservación a  $4^\circ\text{C}$  y posterior determinación por EAA. Todas las muestras se analizan con, al menos, dos repeticiones y los resultados se expresan en mg/kg suelo seco.

#### **4.5.3 Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica.**

El contenido de metales pesados en todas las soluciones obtenidas se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (EAA), mediante un espectrofotómetro. El espectrofotómetro está equipado con diferentes lámparas de cátodo hueco, que generan luz a la longitud de onda característica para cada elemento, y un automuestreador, que permite inyectar las muestras de forma automatizada mediante el sistema informático.

El límite de detección instrumental (LD) de un elemento es la mínima cantidad que proporciona una señal significativamente diferente a la señal del blanco o fondo para



un método dado. El LD fue definido como tres veces la desviación estándar de los resultados de una solución estándar, que presenta una concentración de analito de tres a cinco veces por encima del límite de detección sugerido por el fabricante del espectrofotómetro (VARIAN, 1997). Por otro lado, el límite de cuantificación instrumental (LQ) es la mínima cantidad de analito capaz de ser determinada por un método analítico con una precisión y exactitud aceptable.

El LQ fue definido como diez veces la desviación estándar de los resultados de una solución estándar, que presenta una concentración de analito de tres a cinco veces por encima del límite de detección sugerido por el fabricante (VARIAN, 1997).

La determinación cuantitativa de los metales pesados se ha realizado mediante espectrofotometría de absorción atómica con atomización por llama (EAA-Llama), para la cuantificación de elementos en mayores concentraciones. Por otro lado, la espectrofotometría de absorción atómica con atomización electrotérmica en horno grafito (EAA-Horno) se ha utilizado para la cuantificación de elementos minoritarios. Generalmente, suele escogerse el LD o el LQ como límite de decisión para la medida por EAA-Horno (Miller y Miller, 1993), en función de la incertidumbre asociada a la medida que se desea aceptar. Para la determinación de los contenidos de metales pesados en las diferentes soluciones obtenidas se ha preferido utilizar la denominada "concentración característica" (CC) como límite de decisión, que representa un criterio teórico basado en la sensibilidad de cada metal. La CC se define como aquella concentración del elemento que presenta 0.0044 unidades de absorbancia, es decir, un 1% de la absorción (Skoog et al., 1995; VARIAN, 1997).

Concretamente, los límites de decisión aplicados han sido los siguientes:

(a) Contenidos Totales de Metales Pesados en Suelo: Todos los elementos se determinaron por EAA-Llama, excepto los contenidos de Cd por debajo de la CC ( $\leq 0.010$  mg/l), que se determinaron por EAA-Horno.

(b) Contenidos Extraíbles de Metales Pesados en Suelo: Los contenidos de Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn se determinaron por EAA-Llama, excepto aquellas muestras con contenidos de Cd, Ni y Pb por debajo de su CC ( $\leq 0.010$ ,  $0.05$  y  $0.15$  mg/l, respectivamente), que se determinaron por EAA-Horno. Por su parte, el Co y el Cr se midieron directamente por EAA-Horno, puesto que la fracción extraíble para la mayoría de las muestras quedó por debajo de la CC ( $\leq 0.05$  y  $0.12$  mg/l, respectivamente).

(c) Contenidos de Metales Pesados en Cultivo: Los contenidos de Cu, Fe, Mn y Zn se midieron por EAA-Llama, mientras que el Cd, Co, Cr, Ni y Pb se midieron por EAA-Horno debido a que se presentan en concentraciones por debajo de sus respectivas CC.



## *CAPITULO V*

### *RESULTADOS*

A continuación se hace una breve descripción de cada sitio en los cuales se pudo tener acceso para muestrear tanto agua como suelo para posteriormente hacer una comparación entre las concentraciones de metales según la parte del Río donde se encuentra y la distancia a las industrias que se piensa son la principales fuentes de elementos traza hacia el cauce del río.

Al mismo tiempo determinar cuál de estos metales está al límite o sobrepasa el límite máximo permitido en la Norma Oficial Mexicana Nom-021-RECNAT-2000 para suelo y la Nom 001-ECOL-1996 en el caso del agua.

#### **5.1 Sitio 1**

Referencia: Vaso Regulador el Cristo

Coordenadas 19°29' 25.9'' N 99°12' 56.7''O

Este punto se encuentra dentro del vaso regulador, éste está a cargo de la Comisión Nacional del Agua. Para este trabajo se está considerando este punto como el nacimiento del Río de los Remedios, por la época del año en la que se muestreo se considera de estiaje, así que se pudo bajar hasta el cauce del río sin problema alguno, es decir que la muestra de suelo se tomó en la parte del cauce, con lo cual se pudo obtener una muestra de suelo excelente para el propósito que se considera, por otra parte es obvio que se espera tener concentraciones de metales en el agua porque prácticamente se encontraba “estancada”, en seguida se muestran unas figuras en las cuales se distingue claramente lo ya mencionado.

##### **5.1.1 Descripción**

En el Vaso “El Cristo” confluyen prácticamente todos los escurrimientos de la zona poniente, incluidos los ríos y las presas del Estado de México, aquí confluye el Río Hondo que recibe a su vez la descarga de las aguas provenientes del interceptor poniente. Al salir el agua del vaso como un solo cauce se le conoce como Río de los Remedios.



**Figura 5.1** Vista panorámica del cauce del Río de los Remedios (Sitio 1)

### 5.1.2 Conformación del Sitio

El terreno en este punto tiene una pendiente que va de 0-5 ya que se distingue como una planicie, la profundidad del agua es mayor en el centro del cauce y es aproximada a los 0.4 m. Con una anchura que va de los 2.5–3.5 m en su parte más angosta y entre 5-6 m en la más amplia. En época de lluvia los valores anteriores se disparan ya que capta no solo el agua de lluvia sino además toda el agua que trae consigo el Río Hondo, dando como resultado un embalse de alrededor de 12 m pudiendo llegar hasta los 20 m. y profundidades que van desde 1.5 m hasta 4m.



**5.1** Muestreo del Sitio 1

### 5.1.3 Vegetación

Las especies vegetales encontradas en el sitio fueron *Higuerilla (Ricinus communis)*, Diente de León (*Achicoria amarga*), Verdolaga (*Portulaca oleraceae*), Quelite cenizo (Género *Chenopodium*), Quelite (*Amaranthus hybridus*) Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Pirúl (*Schinus molle*).



**Figura 5.3** Cause del Río de los Remedios con algunas plantas de quelite (*Amaranthus hybridus*)

#### 5.1.4 Fuentes de Perturbación

En esta parte del río no es tan fácil apreciar todas las fuentes de perturbación antropogénica, pero al parecer son obvias dadas las descargas que se van acumulando sobre el cauce del Río Hondo al pasar por distintas fábricas y de muy diversos giros, hasta llegar al a este sitio, por lo tanto es de esperar una gran carga de contaminantes y de distintos tipos. No se observan grandes cantidades de desechos sólidos, pero los que se encuentran son de tamaño considerable.

Al sacar las muestras de suelo con el nucleador se observó por el color además del olor concentraciones importantes de hidrocarburos, así como de descargas domésticas, al paso del tiempo el agua deja residuos en el suelo que se acumulan poco a poco hasta alcanzar los niveles encontrados en sitio.



**Figura 5.4** En época de lluvia todo lo que se observa “seco” es cubierto por agua.



## 5.2 Sitio 2

Referencia: Avenida Eje Central

Coordenadas: 19°30' 57.2'' N 99°09' 09.6'' O

En este punto se complicó un poco la toma de muestras ya que para tener acceso al agua la posición del bordo era casi vertical, por tal motivo si se usaron los instrumentos de muestreo pero con precaución.



**Figura 5.5** Panorámica del Sitio 2

Esta parte del río se encuentra a poca distancia de dos Avenidas importantes Eje Central y anillo Periférico, la muestra se tomó cerca del trabajo de entubamiento del río, este se lleva a cabo por ICA (Ingenieros Civiles Asociados). Cercano al río se encuentra una gran cantidad de viviendas mismas que han presentado problemas las ocasiones que el río se ha llegado a desbordar.

### 5.2.1 Conformación del sitio

Al llegar al sitio 2 se observa el cauce del río mucho más profundo alrededor de 1-2.3 m, por otro lado el ancho del río es de entre 8 – 10 m. La pendiente es aproximadamente del 3-7 %.

En época de lluvia la profundidad aumenta considerablemente alcanzando la altura máxima de borde, siendo de alrededor de 8 metros y por lo tanto el ancho también aumenta hasta casi 15 metros, en ocasiones viéndose superado la altura máxima esto lleva al desbordamiento, que más que río los vecinos lo conocen como canal.

### 5.2.2 Vegetación

En este sitio de vegetación se encontró *Higuerilla* (*Ricinus communis*), Quelite (Género *Chenopodium*), pasto (*Bouteloua radicata*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y Pirúl (*Schinus molle*).



Figura 5.6 Quelite (Género *Chenopodium*), al margen del río

### 5.2.3 Fuentes de perturbación

Como se mencionó anteriormente el río es conocido en la zona como “canal” debido al color del agua, los olores que se desprenden de este y las descargas que llegan a este. Al salir del vaso regulador “El Cristo” pasa por otro vaso regulador junto a Calzada Vallejo que al pasar por las compuertas dejan una gran cantidad de desechos sólidos, pero ya dejando estos atrás, nuevamente al paso del río acumula no únicamente desechos, sino además algunos animales muertos y demás cosas que las personas arrojan a este.

También se pudo observar una gran cantidad de microartrópodos y colémbolos en distintos puntos del cauce, son fáciles de distinguir por su forma de respirar y generar burbujas en la superficie del agua.

### 5.3 Sitio 3

Referencia: Avenida Miguel Bernard

Coordenadas: 19°31' 05.8"N 99°08' 33.7"O

Este punto se unen dos efluentes, las muestras tanto de suelo como de agua se tomaron algunos metros antes de dicha unión, la profundidad del suelo es mínima ya que al introducir la pala sube una lámina de agua, el suelo es altamente permeable.

### 5.3.1 Descripción

Este punto se encuentra en una zona totalmente urbana, entre avenidas muy transitadas (Mario Colín y Miguel Bernard), centros comerciales y viviendas, por lo tanto es de esperar una concentración de contaminantes mucho más mayor por las condiciones que rodean al sitio.



Figura 5.7 Panorámica del Sitio 3

### 5.3.2 Conformación del sitio

El cauce del río en este punto es mucho menor que en el sitio 2, la profundidad no supera 1.5 metros, y el ancho varía en algunas partes es de menos de 3 m y en otras alcanza a extenderse hasta 7 u 8 m.

La pendiente por su parte en un punto llega a ser negativa y en otros puntos es de 1-3 %, es decir mínima. Los bordes son irregulares y en esta parte del río son pocos frecuentes los desbordamientos. Como ya se mencionó el nivel del freático es superficial obteniendo valores de 0.

### 5.3.3 Vegetación

En el sitio 3 entre las especies vegetales que se observaron están la *Higuerilla* (*Ricinus communis*), Quelite (Género *Chenopodium*), pasto (*Bouteloua radicata*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Malva (*Malva Sylvestris*), Pirúl (*Schinus molle*), además de algunas especies subacuáticas.



**Figura 5.8** La higuera (*Ricinus communis*) es una de las especies más comunes a lo largo del cauce del Río de los Remedios

### Fuentes de perturbación

En primer plano se observa la presencia de infraestructura urbana en varios sentidos, primeramente la existencia de drenes que descargan en el río y son de origen no conocido; por otra parte, se encontraron distintos sólidos en suspensión y sobre la margen del río que pertenecen mayormente a residuos sólidos municipales, además, el cruce de caminos y puentes que mediante la depositación periódica de partículas sedimentables y contacto directo con las emisiones automotores, generan la presencia de metales derivados de ellas.

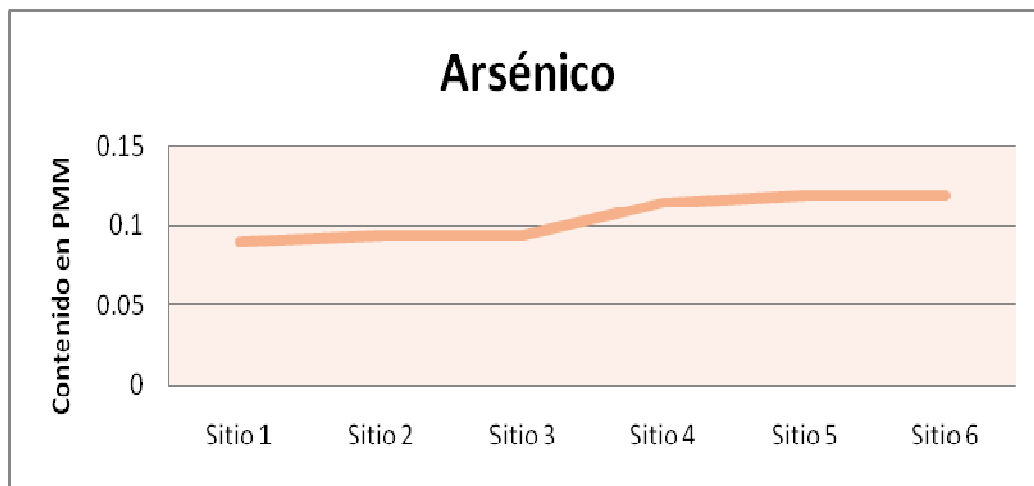


**Figura 5.9** Descarga de agua residual sobre el cauce del río.

## 5.4 Análisis de las muestras

Después de la fase de campo siguió la fase de laboratorio aquí se analizaron las muestras para determinar elementos traza y algunos otros parámetros. Los análisis se hicieron de acuerdo a las Normas Oficiales para muestreo y análisis de suelo y agua de la SEARNAT, las cuales fueron la Nom 001-ecol-1996 para agua y Nom 021-reclat-2000 para suelo.

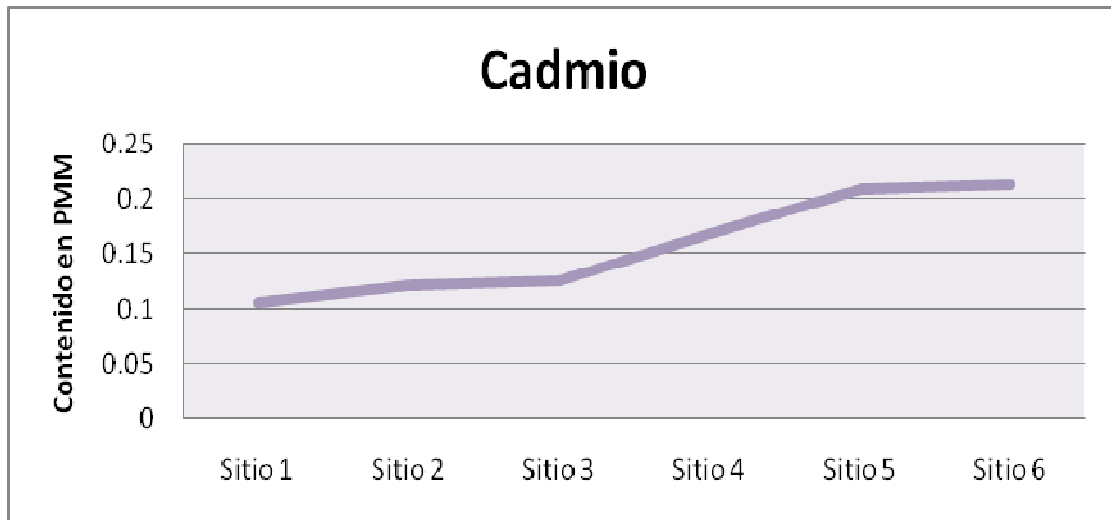
De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio se elaboraron las siguientes gráficas para posteriormente analizar dichos valores. Los valores de los elementos traza se encuentran en ppm.



**Figura 5.10** Concentración de Arsénico encontrado en el río de los Remedios

Las reacciones del arsénico en los suelos están gobernadas por sus estados de oxidación. Su toxicidad depende de la concentración de arsénico soluble, siendo el arseniato sódico y el trióxido de arsénico los más tóxicos. Se acumula en el hígado, riñones, piel, pelo y uñas; se elimina por la orina. La ingestión de dosis crecientes habitúan el organismo al veneno y lo hacen más resistente.

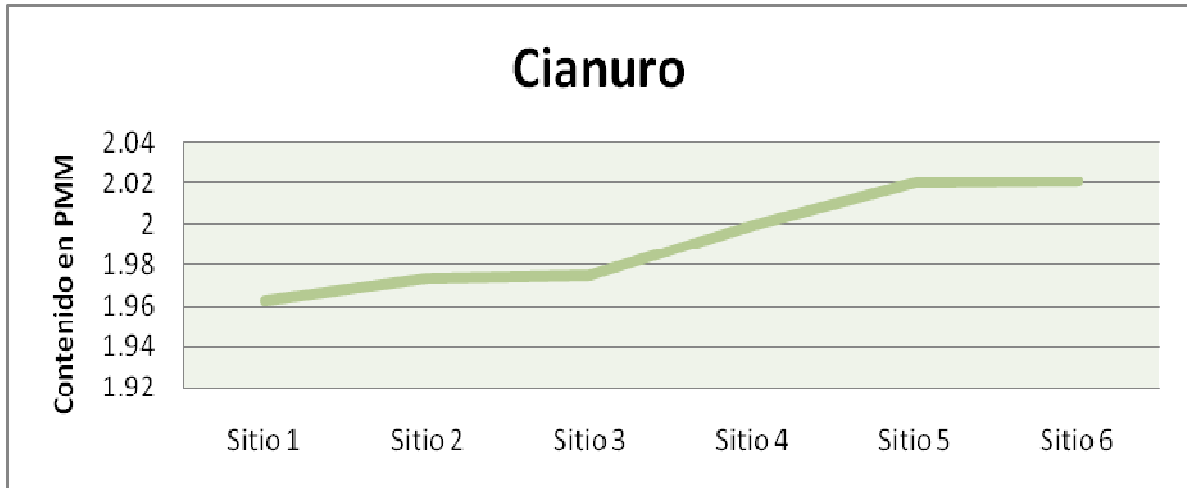
Por vía inhalatoria el efecto crítico es el cáncer de pulmón. Se ha observado un incremento de la incidencia de cáncer de pulmón en varios grupos expuestos ocupacionalmente a compuestos de arsénico inorgánico (IHOBE, 1998).



**Figura 5.11** Concentración de Cadmio en el río de los Remedios

El riñón es el blanco del cadmio y el efecto crítico es la proteinuria. La concentración crítica de cadmio en la corteza renal que produciría un 10% de prevalencia de proteinuria de bajo peso molecular en la población general es aproximadamente 200 mg/kg, la cual se alcanzaría tras una ingesta diaria de aproximadamente 75  $\mu\text{g}$  por persona durante 50 años. La tasa de absorción de cadmio varía con la fuente: 2.5 % para el procedente de los alimentos y 5% para el procedente del agua. Estudios de inhalación han demostrado un incremento altamente significativo del cáncer de pulmón en ratas dependiente de la dosis. También se ha observado en varios estudios un exceso de cáncer de pulmón entre trabajadores expuestos al cadmio (IHOBE, 1998).

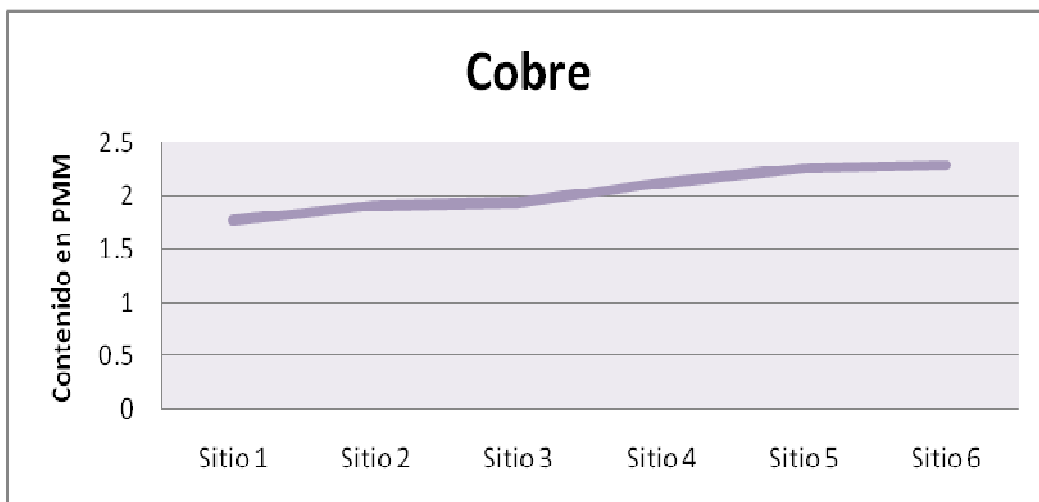
Casi todo el cadmio se obtiene como subproducto en el procesado de minerales de cinc, cobre y plomo. El cadmio es componente de algunas de las aleaciones de más bajo punto de fusión. Se emplea mucho en recubrimientos de acumuladores y rectificadores. También en muchos tipos de soldadura, baterías de níquel-cadmio recargables, reactores nucleares.



**Figura 5.12 Concentración de cianuro**

Se describe con un olor fuerte a almendras amargas o castañas, no siempre emana olor y no todas las personas pueden detectarlo, se ha comprobado que la capacidad de detectarlo esta en un gen recesivo asociado al cromosoma X femenino. Además el límite de tección del olor es muy cercano a la concentración donde comienza a ser tóxico. Por lo tanto no es recomendable dar a olerlo.

Se encuentra con habitualidad en la naturaleza en diversos microorganismos, insectos, y en el estado de crecimiento de muchas plantas como un mecanismo de protección, como un alcalohide común.



**Figura 5.13 concentración de Cobre en el Río de los Remedios**

Es el material más empleado para fabricar cables eléctricos, tanto de uso industrial como residencial. Así mismo se emplean conductores de cobre en numerosos

equipos electricos como generadores, motores, y transformadores. Tambien son de cobre la mayoria de los cables telefonicos ademas de todos los equipos informaticos y de telecomunicaciones, que contienen cobre en mayor o menor medida.

El sulfato de cobre (II) o sulfato cúprico es el compuesto de cobre de mayor importancia industrial y se emplea como abono y plaguicida en agricultura, alguicida en la depuración del agua y como conservante de la madera.

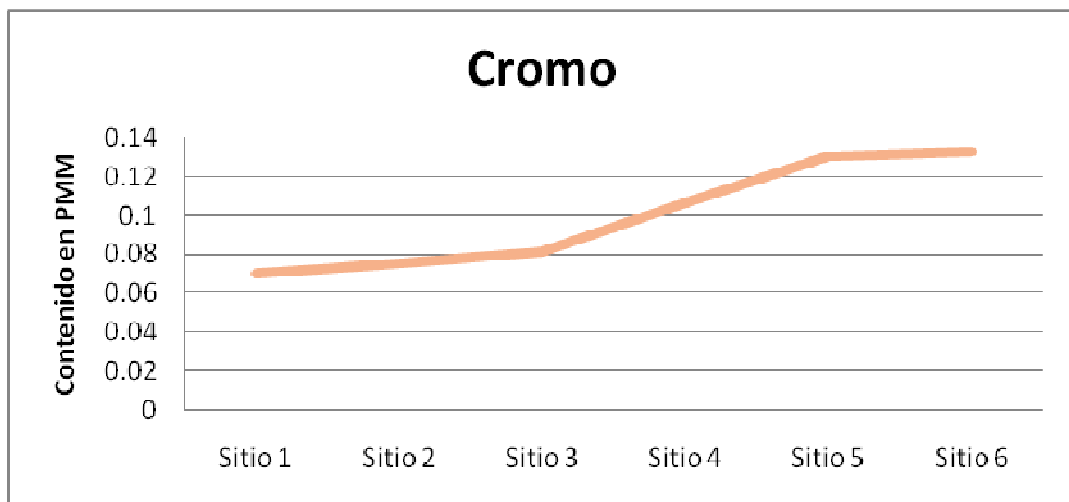
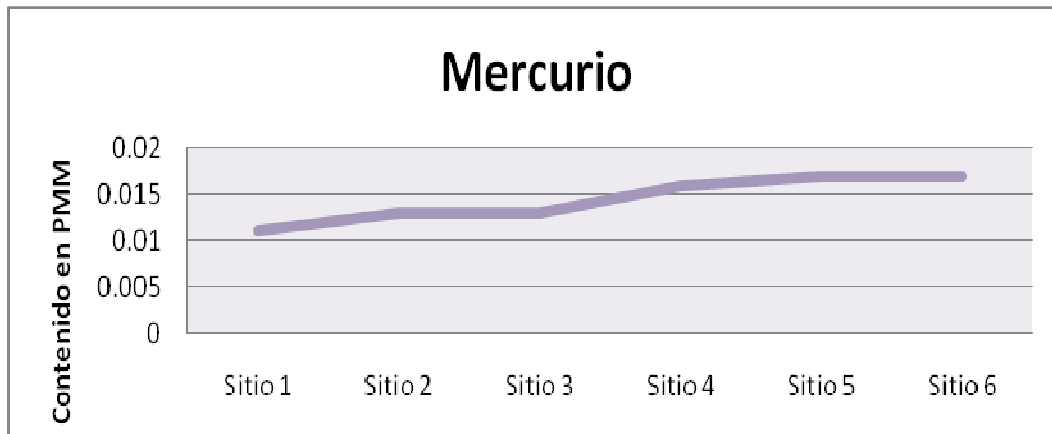


Figura 5.14

La gente puede estar epuesta al Cr a través de respirarlo, comerlo o beberlo y através del contacto con la piel o con compuestos del cromo. Cuando la comida es almacenada en tanques de acero o latas las concentraciones de Cr pueden aumentar. La toma de mucho cromo III puede causar efectos sobre la slaud tambien, por ejemplo erupciones cutaneas. Despues de ser respirado el cromo puede causar irritación en nariz y sangrado de nariz, ademas como ulceras y malestar de estomago.

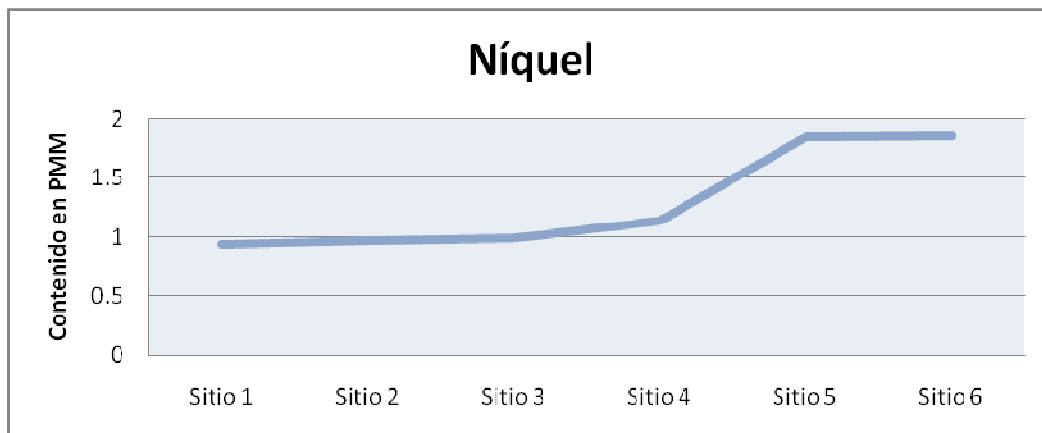
El mineral cromita se emplea en moldes para fabricación de ladrillos, una gran parte de la cromita consumida sde emplea para obtener Cr o en aleaciones. En el curtido del cuero es frecuente emplear el denominado curtido al cromo, en el que se emplea hidroxisulfato de cromo.





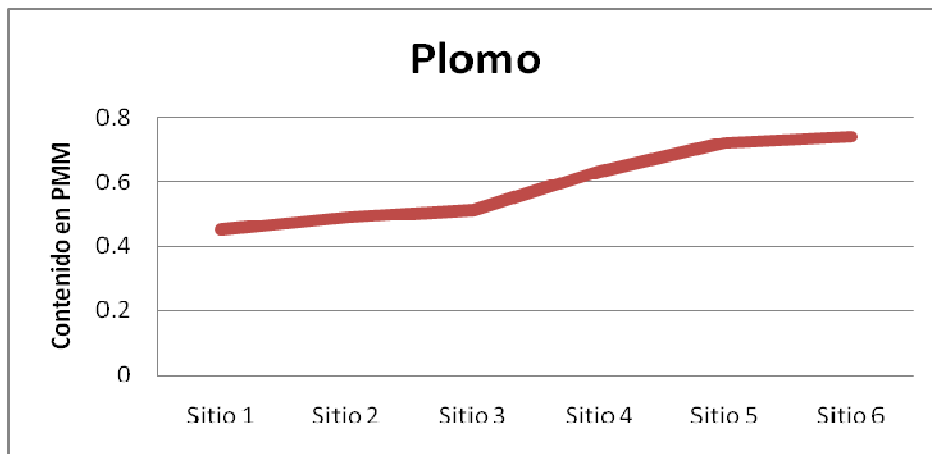
**Figura 5.15** Concentración de Mercurio en el trayecto del río de los remedios

En la figura 5.15 se muestra la concentración de mercurio en los diferentes sitios a través del transecto del río de los remedios y los datos nos muestran que a medida que avanza el trayecto se incrementa la concentración de Mercurio debido a los bioproductos de plantas productoras de cloro, baterías usadas, bulbos de luz, y procesos de recubrimiento con oro de las industrias que se encuentran aledañas al margen del río de los remedios.



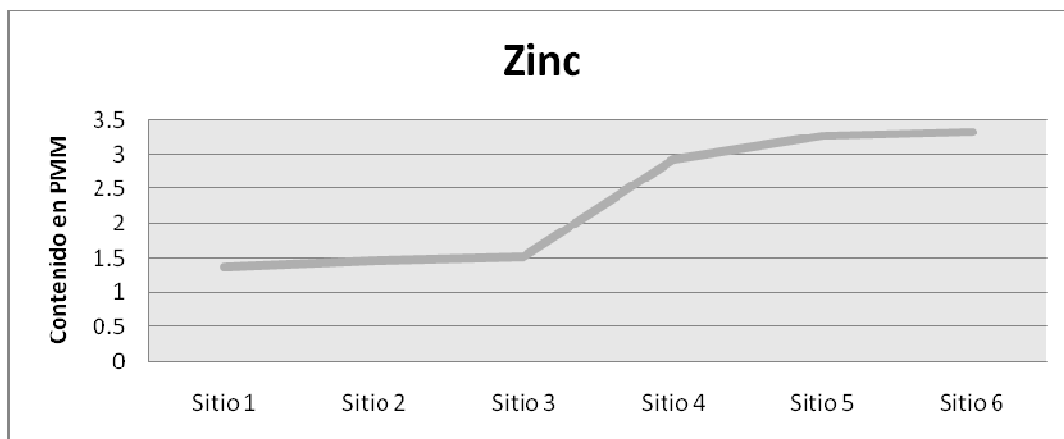
**Figura 5.16** Concentración de Níquel en el cause del Río de los Remedios

El níquel aparece en forma de metal en los meteoritos junto con el hierro y se encuentra en el núcleo de la tierra. Se emplea en la fabricación de acero inoxidable, aleaciones, baterías recargables, catalisis, acuñación de monedas, recubrimientos metálicos, fundición y en multitud de componentes electrónicos así como en aleación para imanes. Se emplea en partes de automóviles como ejes, frenos, válvulas, y rodamientos, resistencias eléctricas, transformadores, telas metálicas, aparatos para la criogenia, etc.



**Figura 5.17** concentración de Plomo en el trayecto del Río de los Remedios

Como otros metales pesados el plomo se une e inactiva los grupos  $-SH$  de proteínas, inhibe la biosíntesis del grupo hemo y puede sustituir al calcio en los huesos y en procesos bioquímicos (incluso pequeñas dosis de  $Pb$  pueden causar neurotoxicidad ya que sustituye al  $Ca^{2+}$  en las funciones nerviosas). Es tóxico para mamíferos y aves y se concentra en todos los organismos acuáticos. Se han observado problemas en la reproducción, una menor supervivencia y limitaciones en el crecimiento con niveles tan bajos como  $1,0-5,1 \mu m/l$  de  $Pb$  en agua



**Figura 5.18** Concentración de Zinc

Cuando la gente absorbe un poco de Zinc estos pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Pequeñas llagas, y erupciones cutáneas, la acumulación del  $Zn$  puede incluso producir defectos de nacimiento. Niveles altos de zinc puede causar ulcera de estomago, irritación de la piel, vómitos, nauseas y anemia, dañar el páncreas y perturbar el metabolismo de las proteínas y causar arteroesclerosis.



## *CONCLUSIONES*

Los metales pesados y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones en la corteza terrestre, los suelos, aguas y plantas. La presencia de concentraciones nocivas en los suelos es una degradación especial denominada contaminación.

Los metales pesados o elementos traza pueden ser de origen geogénico o antropogénico. Los elementos de origen geogénico proceden de la roca madre, de actividad volcánica, o de la lixiviación de mineralizaciones. Los metales pesados antropogénicos derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola, y residuos sólidos urbanos (RSU).

La caracterización, evaluación y remediación de un suelo y agua contaminados es uno de los principales retos ambientales por abordar en los próximos años. La peligrosidad de los contaminantes viene dada no solo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad.

En las zonas urbanas las principales fuentes de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas son las industrias ya que pueden realizar inyección en pozos o vertidos superficiales, provocar infiltración o causar accidentes de todo tipo.

El fundamento básico de la biorrecuperación de acuíferos y suelos consiste en la inmovilización, degradación o transformación de sustancias contaminantes mediante la actividad de microorganismos, obteniéndose productos no tóxicos o al menos con menor toxicidad.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal Identificar los tipos de metales pesados que contaminan los suelos del Río de los Remedios según su origen y su relación con el acuífero cercano al río, estos resultados marcan el seguimiento de la investigación de técnicas de recuperación en acuíferos y suelos contaminados por metales pesados por la actividad humana.



## ***BIBLIOGRAFIA***

Alina Kabata-Pendias, *Trace Elements in Soils and Plants* Third Edition Ph.D., D.Sc. 2001.

Alloway, B.J.(1990). *Heavy Metals in Soils*. Blackie & Son Ltd., London, 368 pp.

Alvarez-Manilla, A. et. al. *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transportes de contaminantes*. Aplicación en la infraestructura del transporte, Publicación técnica nº 195, San Fandila, Qro, Cap II. (2002),

Arce Velázquez Ana Luisa, Calderón Mólorigora César, Tomas Ortiz Ana Cecilia *Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua "Fundamentos Técnicos para el Muestreo Análisis de Aguas Residuales*. IMTA, CNA, SEMARNAT. 2003.

Cala, V.(1998). Comportamiento de metales pesados en suelos. In: Terceras Jornadas de Suelos Contaminados. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 57-72.

Cleckner et al, (1998) Trophic transfer of methylmercury in the northern Everglades. *Biogeochemistry*, Vol 40, pp.347-361. Reprinted with kind permission of Springer Science and Business Media

Cleckner et al, *Trophic transfer of methylmercury in the northern Everglades*. *Biogeochemistry*, Vol 40, (1998) pp.347-361.

Colloidal Transport in Porous Media, Fritz H. Frimmel , Frank von der Kammer , Hans-Curt Flemming

Csuros, M. and C. Csuros 2002, *Environmental sampling and analysis for metals*, Lewis Publishers, Boca Raton, United State.

Donald L. *Environmental Soil Chemistry*, Second Edition, Sparks *University of Delaware* Amsterdam, Academic Press *An imprint of Elsevier Science* 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California 92101-4495, USA

Donald L. Sparks. *Environmental Soil Chemistry*, Second Edition, University of Delaware Amsterdam, Academic Press *An imprint of Elsevier Science*, San Diego, California, USA

Evaluación Geoquímica De Las Propiedades Del Material Particulado (Polvo, Suelos Y Sedimentos) De La Ciudad De Luanda (Angola) Y Su Entorno: Implicaciones Ambientales. Lopes Ferreira Baptista Universidad Politécnica De Madrid, Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Minas, Madrid, 2005

F.F. Daniel., J. Jaramillo., *Introducción a la Ciencia del Suelo.*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín, Colombia 2002



Ford, G. C., Harrison, P. M., Rice, D. W., Smith, J. M. A., Treffry, A., White, J. L. & Yariv, J. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B.* 304, 551-556 (1984)

Fractionation And Speciation Of Trace Metals In Contaminated Urban Soils From Montreal, Canada Juan Li Department of Natural Resource Sciences, McGill University Montreal, Canada, October 1997

Fritz H. Frimmel Frank von der Kammer , Hans-Curt Flemming *Colloidal Transport in Porous Media.*

Garrison Sposito. *The Surface Chemistry of Soils*, University of California, Riverside, Oxford University Press New York, Clarendon Press Oxford, 1984

Gerlach, R.W. and J.M. Nocerino, *Guidance for Obtaining Representative Analytical Laboratory Subsamples From Particulate Laboratory Samples*, EPA/600/R-03/027 (NTIS PB2004-101514), U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2003.

Henryk Pendias, Ph.D. , Boca Raton London New York Washington, D.C., CRC Press, 2001

Ibáñez, J. J., Jiménez, R. & García M Álvarez, A. (1991): Sistemología y termodinámica en edafogénesis.II. Suelos, estructuras disipativas y teoría de catástrofes. *Rev. Écol. Biol. Sol.*,28(3): 237M254.

*Introducción a la Ciencia del Suelo.*, Daniel F.F., y Jaramillo J., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín, Colombia 2002

Kabata-Pendias Alina, Arun B. Mukherjee. *Trace Elements from Soil to Human.* Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2007

Karin Ljung. *Metals in Urban Playground Soils, Distribution and Bioaccessibility* Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences , Department of Soil Sciences , Uppsala

Li Juan. *Fractionation and speciation of trace metals in contaminated urban soils from Montreal, Canada.* Department of Natural Resource Sciences, McGill University Montreal, Canada, October 1997

Littleton, L. Y H. Buckman. *Edafología: Naturaleza y propiedades del suelo* Acme Agency. Buenos Aires. Argentina. 1944, 479 p.

López Ferreira Baptista. *Evaluación geoquímica de las propiedades del material particulado (Polvo, Suelos y Sedimentos) de la Ciudad de Luanda (Angola) y su entorno: Implicaciones Ambientales.* Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid, 2005

Lugo –Hubp José y Araceli Salinas-Montes. *Geomorfología de la sierra de Guadalupe (al norte de la ciudad de México) y su relación con peligros naturales.*



Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 13, número 2, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. México, D.F. 1996, p 240-251.

Mats Linde, *Trace Metals in Urban Soils – Stockholm as a Case Study* Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Uppsala, Doctoral thesis , Swedish University of Agricultural Sciences , Uppsala 2005.

Metales Pesados, Sales y Sodio en Suelos de Chianmpa en México., Ramos Bello Rosalia/ Lenom J. Cajuste/ Flores Román David/ García Calderón Norma., Agrociencia, julio-agosto, año/vol. 35, número 004., Colegio de Postgraduados, Texcoco, México, pp 385-395

Micó Llopis, Carolina; “Estudio de Metales Pesados en Suelos Agrícolas con Cultivos Hortícolas de la Provincia de Alicante”. Departamento de Planeación Territorial, Universidad de Valencia, España, 2005.

Micó Lopis Carolina. *Estudio de Metales Pesados en Suelos Agrícolas con Cultivos Hortícolas de la Provincia de Alicante*, Universitat de Valencia , Servei de Publicacions , Departamento de Planificación Territorial. 2005

Monika Sieghardt ; Erich Mursch-Radlgruber : Elena Paoletti ; ElsCouenberg :AlexandrosDimitrakopoulus :Francisco Rego : AthanassiosHatzistathis: Thomas BarfoedRandrup

Morton Bermea Ofelia, Contenido de Metales Pesados en Suelos Superficiales de la Ciudad de México. Tip Revista Especializada en Ciencias Quimico-Biologicas., año/vol.9, número 001., UNAM, México, México. 2006, pp45-47

Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por hidrometalurgia del cinc”; Antonia María Solano Marin; 2005, Murcia, España  
P. Gy, 2000. Sampling for Analytical Purposes.Wiley, New York.

PiotrSkodowski, AlinaMaciejewska and JolantaKwiatkowska\* Department of Soil Science and Soil Conservation, Warsaw University of Technology, 1 Politechniki Sq., 00-661 Warsaw, Poland

Quevauviller, Ph., Rauret, G., L´opez-S´anchez, J. F., Rubio, R. Ure, A. and Muntau, H.: 1996, The certification of the EDTA-extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Ni, Pb and Zn in sediment following a three-step sequential extraction procedure. Office for Official Publications of the European Communities, BCR Information, Luxembourg, 59 pp

Ramos Bello Rosalia, Lenom J. Cajuste, Flores Román David, García Calderón Norma Metales Pesados, Sales y Sodio en Suelos de Chinampa en México. Agrociencia, julio-agosto, año/vol. 35, número 004., Colegio de Postgraduados, Texcoco, México, pp385-395



Rauret, G.; Rubio, R.; López-Sánchez, J.F.(1989): Optimization of Tessier procedure for metal solid speciation in river-sediments. Intern. Environ. Anal. Chem. **36**, 69-83.

Sastre J., Sahuquillo A., Vidal M., Rauret G. (2002): Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction, *AnalyticaChimicaActa*, 462, 59-72.

Secretaría del Medio Ambiente. *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2005*, Gobierno del Distrito Federal

Simonson, R. W. *Soil classification in the past: Roots and Philosophies*. ISRIC Annual Report 1984: 6M18.

Solano Marin; Antonia María *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por hidrometalurgia del cinc*; 2005, Murcia, España

T. R. Crompton. *Toxicants in Terrestrial Ecosystems A Guide for the Analytical and Environmental Chemist*. Hill Cottage (Bwthyn Allt) Anglesey, Gwyned United Kingdom

Tania Volke Sepúlveda, Juan A. Velasco Trejo y David A. de la Rosa Pérez *Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología, Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat), Primera edición: mayo de 2005.

Tania Volke Sepúlveda, Juan A. Velasco Trejo y David A. de la Rosa Pérez; *Suelos contaminados por metales y metaloides*. INECOL; SyG Editores, S.A. de C.V,2005.

Tessier A, Campbell P.G.C & Bisson M 1979 *Analytical Chemistry*. 51, 7: 845-851  
The Abiotic Urban Environment: Impact of Urban Growing Conditions on Urban Vegetation. Monika Sieghardt ; Erich Mursch-Radlgruber ; Elena Paoletti ;  
The Abiotic Urban Environment: Impact of Urban Growing Conditions on Urban

Toxicants in Terrestrial Ecosystems A Guide for the Analytical and Environmental Chemist, T. R. Crompton Hill Cottage (Bwthyn Yr Allt) Anglesey, Gwynedd United Kingdom

Trace Elements from Soil to Human, Alina Kabata-Pendias Arun B. Mukherjee, Springer is a part of Springer Science+Business Media springeronline.com © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition, Alina Kabata-Pendias, Ph.D., D.Sc.

Trace Metals in Urban Soils– Stockholm as a Case Study , Mats Linde, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences , Department of Soil Sciences , Uppsala, Doctoral thesis , Swedish University of Agricultural Sciences , Uppsala 2005



Twardowska Irena, Allen Herbert E., Häggoblom Max M.. *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation*. Ed. Springer. The Netherlands. 2006

Van Deuren, J., Lloyd, T., Chhetry, S., Raycham, L., Peck, J., *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*, Federal Remediation Technologies Roundtable (2002)

Volke Sepúlveda Tania, Juan A. Velasco Trejo y David A. de la Rosa Pérez. Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, . México, D.F. Primera edición: mayo de 2005

Zapata Hernández Raúl D., *Química De Los Procesos Pedogenéticos*. Escuela De Geociencias, Facultad De Ciencias Universidad Nacional De Colombia, Medellín, Colombia. 2006