

300618  
9  
24



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

---

ESCUELA DE QUIMICA  
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

**COMPORTAMIENTO DE ALGUNOS ELEMENTOS  
TOXICOS PRESENTES EN LIXIVIADOS  
PROVENIENTES DE BASUREROS MUNICIPALES**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N :

**IRMA GEORGINA FERNANDEZ LOPEZ  
LUIS HERNANDEZ ALVAREZ**

DIRECTOR DE TESIS: ING. JORGE GARCIA ACEVEDO

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1993



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# I N D I C E

|                   |   |
|-------------------|---|
| PROLOGO . . . . . | 1 |
|-------------------|---|

## CAPITULO 1

### IMPORTANCIA DE LOS DESECHOS SOLIDOS EN LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DE LA CIUDAD DE MEXICO.

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.0 | INTRODUCCION . . . . .  | 4  |
| 1.1 | LA BASURA . . . . .   | 5  |
| 1.2 | RESIDUOS SOLIDOS EN LA CIUDAD<br>DE MEXICO . . . . .            | 11 |
| 1.3 | CONTAMINACION DE AGUAS SUPERFICIALES<br>Y SUBTERRANEAS. . . . . | 13 |

## CAPITULO 2

### AGUAS SUBTERRANEAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.0 | INTRODUCCION . . . . .  | 17 |
| 2.1 | CICLO HIDROLOGICO . . . . .                                   | 19 |
| 2.2 | DISTRIBUCION DE AGUAS SUBTERRANEAS. . . . .                   | 22 |
| 2.3 | CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA. . . . .                         | 27 |
| 2.4 | TIPOS DE CONTAMINACION DE AGUAS<br>SUBTERRANEAS. . . . .      | 29 |
|     | 2.4.1 CONTAMINACION NATURAL . . . . .                         | 29 |
|     | 2.4.2 CONTAMINACION<br>ANTROPOGENICA . . . . .                | 31 |
|     | 2.4.2.1 ACTIVIDADES DE<br>AGRICULTURA Y<br>GANADERIA. . . . . | 33 |
|     | 2.4.2.2 DISPOSICION DE<br>AGUAS RESIDUALES . . . . .          | 34 |
|     | 2.4.2.3 CONTAMINACION<br>MICROBIOLOGICA . . . . .             | 38 |
|     | 2.4.2.4 DESECHOS<br>DOMESTICOS. . . . .                       | 38 |
|     | 2.4.2.5 DESECHOS<br>INDUSTRIALES. . . . .                     | 39 |

## CAPITULO 3

### LIXIVIADOS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.0  | INTRODUCCION . . . . .  | 43 |
| 3.1  | FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA<br>FORMACION DE LIXIVIADOS . . . . .               | 44 |
| 3.2  | ESTIMACION DE LA GENERACION DE<br>LOS LIXIVIADOS. . . . .                         | 46 |
| 3.3  | CARACTERISTICAS DE LIXIVIADOS . . . . .   | 49 |
| 3.4  | INTRODUCCION ACERCA DE LOS ELEMENTOS<br>TOXICOS CONTENIDOS EN LIXIVIADOS. . . . . | 54 |
| 3.5  | DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS TOXICOS<br>EN ESTUDIO. . . . .                       | 55 |
| 3.6  | TOXICIDAD DE LOS ELEMENTOS TOXICOS<br>EN ESTUDIO. . . . .                         | 56 |
| 3.7  | NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS. . . . .   | 60 |
|      | 3.7.1 NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS<br>PARA RESIDUOS PELIGROSOS 60                   |    |
|      | 3.7.2 NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS<br>PARA AGUA POTABLE . . . . .                   | 63 |
| 3.8  | USOS INDUSTRIALES . . . . .   | 65 |
| 3.9  | CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DE<br>LOS ELEMENTOS EN ESTUDIO . . . . .       | 68 |
| 3.10 | DANOS CAUSADOS POR LIXIVIADOS . . . . .   | 73 |

## CAPITULO 4

### MECANISMOS QUE INTERVIENEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS TOXICOS EN ESTUDIO

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.0 | INTRODUCCION . . . . .   | 76 |
| 4.1 | MECANISMOS DE TRANSPORTE . . . . .                                 | 77 |
|     | 4.1.1 TRANSPORTE DE LIXIVIADOS<br>EN LA ZONA NO SATURADA . . . . . | 79 |
|     | 4.1.2 TRANSPORTE DE LIXIVIADOS<br>EN LA ZONA SATURADA . . . . .    | 82 |
| 4.2 | REMOCION DE METALES . . . . .                                      | 84 |
|     | 4.2.1 ADSORCION . . . . .  | 84 |
|     | 4.2.2 OXIDO-REDUCCION . . . . .                                    | 90 |
|     | 4.2.3 PRECIPITACION . . . . .                                      | 91 |

|         |                                      |    |
|---------|--------------------------------------|----|
| 4.2.3.1 | PRECIPITACION<br>DE CARBONATOS . . . | 93 |
| 4.2.3   | COMPLEJACION DE METALES . . .        | 95 |

## CAPITULO 5

### DESCRIPCION DEL SITIO EN ESTUDIO

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.0     | INTRODUCCION . . . . .   | 97  |
| 5.1     | LOCALIZACION POLITICA Y GEOGRAFICA DEL<br>EX-TIRADERO DE SANTA CRUZ MEYEHUALCO . . | 98  |
| 5.2     | LOCALIZACION HIDROGEOLOGICA . . . . .  | 108 |
| 5.2.1   | LA CUENCA DEL VALLE DE<br>MEXICO . . . . .   | 108 |
| 5.2.2   | HIDROLOGIA SUBTERRANEA<br>DEL VALLE DE MEXICO . . . . .                            | 111 |
| 5.2.2.1 | CARACTERISTICAS DEL<br>ACUIFERO . . . . .  | 111 |
| 5.2.2.2 | CONFIGURACION DE<br>LA PROFUNDIDAD DEL<br>NIVEL FREATICO . . . . .                 | 115 |
| 5.2.2.3 | ELEVACION DEL NIVEL<br>FREATICO . . . . .  | 115 |

## CAPITULO 6

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 6.0 | INTRODUCCION . . . . .    | 118 |
| 6.1 | EXPERIMENTACION . . . . . | 119 |

## CAPITULO 7

### RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 7.0 | Resultados . . . . .                                  | 129 |
| 7.1 | Resultados con respecto al<br>Cadmio (Cd) . . . . .   | 130 |
| 7.2 | Resultados con respecto al<br>Cromo (Cr) . . . . .    | 136 |
| 7.3 | Resultados con respecto al<br>Mercurio (Hg) . . . . . | 142 |
| 7.4 | Resultados con respecto al<br>Plomo (Pb). . . . .     | 147 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 7.5 | Conductividad electrica (CE) y pH . . . . | 153 |
| 7.6 | Resultados referentes al carbono . . . .  | 161 |

**CAPITULO 8**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| 8.0               | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . . . . .              | 166 |
| 8.1               | CONCLUSIONES . . . . .                                | 166 |
| 8.2               | RECOMENDACIONES . . . . .                             | 169 |
| 8.2.1             | RECOMENDACIONES GENERALES . . . . .                   | 169 |
| 8.2.2             | RECOMENDACIONES DEL TRABAJO<br>EXPERIMENTAL . . . . . | 171 |
| APENDICES         | . . . . .   | 172 |
| APENDICE 1        | . . . . .   | 173 |
| APENDICE 2        | . . . . .   | 177 |
| GLOSARIO          | . . . . .   | 189 |
| TABLA DE UNIDADES | . . . . .   | 198 |
| BIBLIOGRAFIA      | . . . . .   | 200 |

## PRÓLOGO.

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo, estudiar el comportamiento de elementos tóxicos peligrosos en lixiviados provenientes de depósitos de residuos sólidos con respecto a los fenómenos de precipitación y adsorción, para contribuir al avance del conocimiento en el área de contaminación de las aguas subterráneas, cuya aplicación directa será al problema de contaminación que ocasionan los depósitos de residuos sólidos al acuífero del Valle de México (Mora Judith, 1991).

Con la finalidad de aplicar en el futuro los resultados de este trabajo al análisis de la contaminación del acuífero del Valle de México, se seleccionó como depósito de residuos sólidos el ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco actualmente convertido en el "Parque Ecológico Cuitláhuac", ubicado en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México, ya que es uno de los depósitos de residuos sólidos más grande y antiguo que se encuentra sobre la fuente de abastecimiento de agua potable de mayor importancia para los habitantes de la zona metropolitana del Valle de México.

Para el desarrollo del trabajo, se estableció en primer término, un marco teórico que permite conocer la definición, clasificación y desarrollo de los conceptos que serán manejados a lo largo de este trabajo.

Posteriormente, se presentan y describen las diferentes técnicas analíticas empleadas a lo largo de este estudio, así como los resultados obtenidos experimentalmente y su correspondiente análisis mediante un método estadístico de cuadrado latino.

Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones basadas en el conocimiento teórico-experimental adquirido a lo largo del desarrollo del presente trabajo de tesis.

## CAPITULO 1

# IMPORTANCIA DE LOS DESECHOS SOLIDOS EN LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DE LA CIUDAD DE MEXICO.

## 1.0 INTRODUCCIÓN.

Desde tiempos remotos el hombre ha producido basura (El primer depósito de basura organizado se reporta en Atenas en el año 500 A.C.), pero es a partir del Siglo XVIII con la Revolución Industrial, cuando ésta comienza a convertirse en un serio problema para la sociedad. Ya que la Revolución Industrial provocó una deformación radical en la estructura social a partir de la renovación de los sistemas de producción, de los medios de transporte y comunicación y de la tecnología industrial.

Como resultado de tantos años de desperdicio, en Staten Island, una isla a las afueras de Nueva York, el depósito de basura es tan grande que amenaza con ser el segundo objeto hecho por el hombre visible desde el espacio exterior después de la muralla China (Zapata D., 1991).

La sociedad de nuestra era se ha convertido en una sociedad desechable, donde tarde o temprano todo acaba en la basura.

## 1.1. LA BASURA.

Para fines de este trabajo de tesis, se entiende por "Basura", al complejo de todos los desechos y desperdicios sólidos producidos por la actividad de una aglomeración humana y el subsecuente desarrollo industrial que ésta conlleva.

Los principales materiales que componen la basura son: desechos sólidos, estiércol y animales muertos.

Los desechos sólidos se clasifican según su productor en:

a) Desechos domiciliarios. Estos se generan cotidianamente en las viviendas unifamiliares y unidades habitacionales. Dichos desechos están compuestos principalmente por papel, cartón, trapo, vidrio, plástico, madera, cuero, algodón, envases de cartón tetrapak, tierra, materia orgánica (desechos de comida) y materiales ferrosos y no ferrosos.

b) Desechos comerciales. Se producen en las diferentes etapas de la distribución de bienes, en la preparación y venta de alimentos comerciales. Su contenido es alto en papel, cartón, vidrio, lámina, plástico, envases de tetrapak, madera y materia orgánica.

c) Desechos de Mercados. Son los desechos que se producen por la comercialización de los productos en los mercados permanentes y temporales. En su composición se encuentran desperdicios de legumbres, frutas, flores, vísceras, carnes y otros de muy fácil descomposición.

d) Desechos Institucionales. Estos se generan en oficinas, escuelas, universidades, edificios públicos, museos, bibliotecas, iglesias, etc. Están compuestos principalmente de papel, colillas de cigarro, madera, plástico y material ferroso.

e) Desechos de la vía pública. Son aquellos que son depositados y recolectados en la vía pública y están constituidos por papel, tierra, arena, madera, plástico, hojas, estiércol, colillas de cigarro, piedras, animales muertos, etc.

f) Desechos de Construcciones y Demoliciones. Son todos aquellos producidos por la industria de la construcción. Su composición básica es la tierra, piedras, arena, tabiques, etc.

g) Desechos Industriales. Son todos aquellos producidos por la actividad de la industria de la transformación. Están compuestos principalmente por metales pesados, compuestos orgánicos, aleaciones de metales, pesticidas, etc.

La característica más notable de los desechos sólidos es su diversidad. Estamos familiarizados con la clase de desechos de nuestros botes de basura, algunos de estos desechos son más o menos biodegradables, algunos son combustibles, algunos son tóxicos, algunos desprenden olores repelentes y algunos son inertes, pero todos ellos ocupan lugar.

La descarga sobre tierra a cielo abierto es un sistema utilizado como medio de eliminación de toda clase de residuo sólido. Generalmente, se escoge para establecer el tiradero un terreno bajo, cuyo nivel se va elevando por el relleno con los residuos sólidos.

En la década de los 80's comenzó la clausura de los tiraderos que se sustituyen por "rellenos sanitarios", (Entendiéndose por relleno sanitario el método de ingeniería para la disposición final de los desechos, colocándolos sobre una capa impermeable en el suelo y distribuyendo la basura en capas, compactándolos y tapándolos con material de recubrimiento al final del día de la operación o tan frecuente como sea necesario).

En el relleno sanitario se procura tapar con tierra, barredura de calles o ceniza, los montones de basura.

El terreno escogido tiene que ser poco permeable, a fin de evitar que las aguas que se infiltran a través de los depósitos lleguen a contaminar la capa freática y luego el agua de los pozos y manantiales cercanos.

Aparentemente, se acepta al relleno sanitario como medio adecuado para disponer basura si el terreno es poco permeable, pero debe de aclararse que:

- a) El tiradero es foco de contaminación.
- b) No hay terreno suficientemente poco permeable.

A todos los rellenos sanitarios se les acondiciona con una capa impermeable y un sistema colector de "lixiviados" (Entendiéndose como lixiviado el líquido que se percola como consecuencia de la infiltración del agua de lluvia, extrayendo el material disuelto o suspendido de los residuos sólidos).

El relleno sanitario o relleno controlado una vez cerrado puede aprovecharse como parque, jardín, área de recreo y deporte o estacionamiento de autos, etc.

En la actualidad en la Ciudad de México existen once tiraderos municipales, de los cuales 8 funcionan como tiraderos a cielo abierto ( Bordo poniente, Santa Catarina,

Prados de la Montaña, Xochimilco, Los Remedios, Ecatepec, Tlalnepantla y Naucalpan) de los cuales 2 son rellenos sanitarios Prados de la Montaña en Santa Fé y Bordo Poniente en Texcoco y otros 3 se clausuraron (Santa Cruz Meyehualco, Santa Fé y Ajusco), se cubrieron con suelo y se convirtieron en áreas verdes.

Se proyecta en un futuro cercano (1992-1993) clausurar el tiradero de Santa Catarina y crear otro relleno sanitario aunque todavía no se tiene el lugar (Reunión Regional del D.F, Agosto 1992).

Algunas autoridades ambientales estatales y municipales encargadas de rellenos controlados en otros países están consternadas por varias razones:

- La contaminación tan seria que se ha estado causando en los mantos acuíferos superficiales y en los profundos, así como en los suelos.
  
- Por las fugas del gas metano creado por la descomposición de la basura en estos sitios.
  
- Por los olores nauseabundos que se desprenden de los sitios donde están los confinamientos.

Cabe citar que en Alemania Occidental, entre 35,000 y 50,000 rellenos controlados han sido declarados potencialmente peligrosos por la amenaza que representan para sus aguas subterráneas (TIME, enero 2 de 1989).

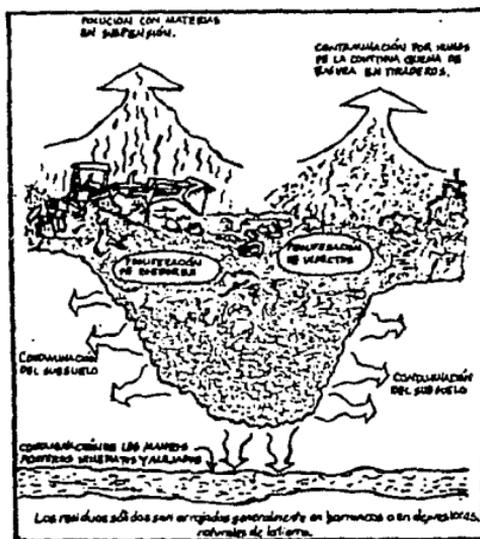


Figura 1.1 Representación de los problemas que genera un tiradero municipal.

## 1.2 RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

Debido a la falta de conciencia de la sociedad, México está padeciendo grandes problemas a causa de la disposición final inadecuada que le estamos dando a nuestros desechos sólidos municipales e industriales, alcanzando proporciones graves.

Miles y miles de toneladas de residuos sólidos se generan diariamente en nuestra gran ciudad, provocando grandes focos de infección y estropeando los bellos lugares naturales que rodean la gran urbe, haciendo de ellos, terrenos inoperables para cualquier actividad económica o social. Para citar algunos ejemplos, en la Ciudad de México se produjeron 20,000 toneladas de basura en 1989, y el promedio diario de basura que cada ciudadano mexicano desecha, en 1988 fué de 693 gramos (SEDUE, Informe General de Ecología, noviembre de 1988.).

En nuestro país, en la actualidad existen 35 rellenos controlados para atender una generación anual de 20 millones de toneladas de desechos sólidos municipales. De acuerdo con la SEDUE, el 45% se recolecta diariamente, y el resto queda en la vía pública (aproximadamente, 14,000 toneladas diarias).

Del 45% que se recolecta, las dos terceras partes son tiradas (depositadas) a cielo abierto y sólo un tercio de lo que se recolecta queda en un relleno sanitario.

En México siempre ha existido la pepena, aunque ya en los últimos años se ha reducido un cierto porcentaje, esta pepena se lleva a cabo principalmente sobre cartón, vidrio, papel y metal. Tomando en cuenta una pepena con un 60% de eficiencia en la ciudad de México tenemos que el 45% de los desechos sólidos que se recolectan diariamente se reduce a un 34.15% (Manejo de los desechos sólidos: El caso del D.F, 1988).

El consumismo del que es víctima la humanidad en este siglo que conlleva al uso de múltiples productos desechables y plásticos, con el consecuente problema de volúmenes enormes de desechos sólidos que dan lugar a "lixiviados" constituyen un grave problema en cuanto a la contaminación del suelo y a las aguas subterráneas se refiere y sus efectos sobre la salud.

### 1.3 CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.

Desde el siglo XVII se empezó a modificar el sistema hidrográfico de la Ciudad de México para evitar las inundaciones, se construyeron canales de desagüe y drenaje profundo para eliminar el agua (Mora Judith, 1991).

Actualmente los daños se revierten, padecemos de falta de agua potable para abastecer a toda la población de la Ciudad de México. El mayor consumo de agua proviene principalmente de los acuíferos, desde 1950 la extracción de agua subterránea ha sido la actividad más importante para abastecer de este elemento a la ciudad, sin embargo la extracción es mayor a la recarga anual, se está sobreexplotando el acuífero.

| BALANCE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS<br>(m <sup>3</sup> /seg) |            |         |                  |
|---|------------|---------|------------------|
|   | Extracción | Recarga | Sobreexplotación |
| Valle de México   | 2840       | 2519    | 321              |

Fuente: Información Científica y Tecnológica, Febrero de 1991, volumen 13, No.173. México.

La sobreexplotación afecta a los pozos, ya que con el abatimiento del nivel algunos quedan inutilizados. La degradación de la calidad natural del agua, es un efecto de la sobreexplotación, ya que al bajar los niveles y la presión hidrostática del acuífero, se favorece la infiltración de desechos líquidos o "lixiviados".

El proceso de urbanización ha degradado las cuencas hidrológicas y corrientes superficiales por cuyos cauces se desalojan sólidos y líquidos con lo que se ha reducido la eficiencia de las obras para el control de crecientes y se ha anulado la posibilidad de aprovechar estas aguas. Este mismo proceso ha afectado zonas de recarga de acuíferos, con el riesgo de contaminarlo por la falta de drenaje y modificar la calidad natural del agua.

Los principales contaminantes que modifican la calidad natural del agua en aguas superficiales y subterráneas son:

- a) Materia orgánica que ocasiona un déficit de oxígeno disuelto en el agua.
- b) Nutrientes que provocan eutroficación.
- c) Grasas y Aceites que ocluyen las agallas de los peces y disminuyen la transferencia de oxígeno.

d) Metales pesados, detergentes, plaguicidas y compuestos orgánicos que afectan a la salud humana, a la flora y la fauna.

e) Lluvia ácida que acarrea contaminantes atmosféricos.

f) Aguas residuales domésticas e industriales.

g) Aguas provenientes de actividades agrícolas y ganaderas.

## CAPITULO 2

### AGUAS SUBTERRANEAS.

## 2.0 INTRODUCCIÓN.

El agua es uno de los recursos naturales renovables más importantes con que se cuenta, ya que se ha visto que sin ella sería imposible la vida en la Tierra.

El agua es para el hombre un elemento indispensable, no solo visto desde un enfoque biológico sino también para su progreso desde todo punto de vista. La humanidad desde sus albores se ha preocupado por el abastecimiento de agua, en un principio únicamente la buscaba para calmar su sed y refrescar su cuerpo, pero después, a medida que fue evolucionando y fueron aumentando sus necesidades, vió en ella un medio para solucionar sus problemas y así la empezó a utilizar en mayor cantidad para usos domésticos, para la agricultura, en la producción de energía y en la industria.

Actualmente, la Ciudad de México está sujeta a problemas de escasez de agua, que se han acentuado con el aumento de la población. A fin de contrarrestar los efectos de la escasez, se han construido grandes obras de ingeniería, para extraer agua subterránea de diferentes acuíferos y transferir agua superficial de otras cuencas. Así como, se ha hecho necesaria la investigación de todos los medios posibles para la obtención, control y uso eficiente del agua.

El subsuelo constituye un depósito natural de agua, mejor y mucho más grande que el logrado por las obras de ingeniería hechas para el almacenamiento de las aguas en la superficie.

La importancia del agua del subsuelo es notable en México donde gran parte del territorio carece de aguas superficiales aprovechables debido a su régimen de lluvia.

En la antigüedad y en la Edad Media se creía que el agua subterránea provenía directamente del mar o bien de la condensación del aire en las cavernas que se suponía existían en el interior de la Tierra. Sin embargo, en el siglo I el Arquitecto Romano Marco Vitruvio Pollio pensó en la existencia del agua subterránea como consecuencia de la infiltración del agua superficial; idea que después fue secundada por Mariotte, padre de la Hidrología y por Bernardo Palissy quien afirmó que el agua se infiltraba en el suelo hasta ser detenida por una capa impermeable (Moderey Roscan, 1965).

La importancia de las aguas subterráneas es indiscutible, gracias a ellas muchas regiones del globo han podido ser habitadas y en el futuro se seguirá dependiendo de ellas en un grado mucho mayor por las razones antes expuestas.

## 2.1 CICLO HIDROLÓGICO.

Uno de los problemas que más ha preocupado al hombre desde tiempos remotos ha sido determinar el origen de las aguas subterráneas. Muchas hipótesis y teorías se han creado para explicar su origen; la mayor parte con las limitaciones científicas de las épocas pasadas, en las que se desconocía la ley de la gravedad y otras leyes básicas de Física y Química (Gómez E., 1967).

En la actualidad se ha comprobado que la presencia de la mayor parte del agua subterránea se debe a la infiltración del agua en el suelo y forma parte del ciclo hidrológico, ya que éste considera el movimiento del agua entre los océanos, el agua superficial, la atmosférica y la subterránea (Canter et al., 1987).

El agua subterránea, es una fase muy importante del ciclo hidrológico. Éste es el continuo y permanente movimiento del agua en sus tres estados en la tierra. Se admite que el ciclo hidrológico empieza en el agua de los océanos, ya que éstos cubren las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra. El Sol al emitir sus radiaciones y calor evapora el agua de los océanos hacia la atmósfera. El vapor de agua al elevarse forma las nubes, las cuales bajo ciertas condiciones se condensan y descargan a la tierra en forma de

lluvia, nieve, granizo, neblina y otras formas de precipitación.

Parte de la precipitación que cae sobre la tierra (ya que parte se evapora en el trayecto), luego de humedecer las plantas y el suelo, se escurre sobre la superficie de éste y va a las corrientes y otros cuerpos de agua. Parte del agua que se infiltra en el suelo es detenida en la zona de las raíces de las plantas y es adsorbida eventualmente o devuelta al suelo por acción del efecto de capilaridad.

Otra parte penetra más abajo de la zona de las raíces de las plantas y bajo la fuerza de gravedad continúa su descenso hasta entrar en la zona de almacenaje. En esta zona, el agua se mueve a través de los intersticios de los materiales que están saturados y puede reaparecer en la superficie de áreas de elevación a un nivel más bajo que el nivel de la zona de almacenaje. En estos sitios, el agua subterránea se descarga naturalmente en forma de manantiales o filtraciones, que son los que mantienen el flujo de la corriente en los periodos secos. Las corrientes, acarreado aguas superficiales y descargas naturales de las aguas subterráneas, conducen sus caudales eventualmente a los océanos, cerrándose así el ciclo hidrológico (ver figura 2.1).

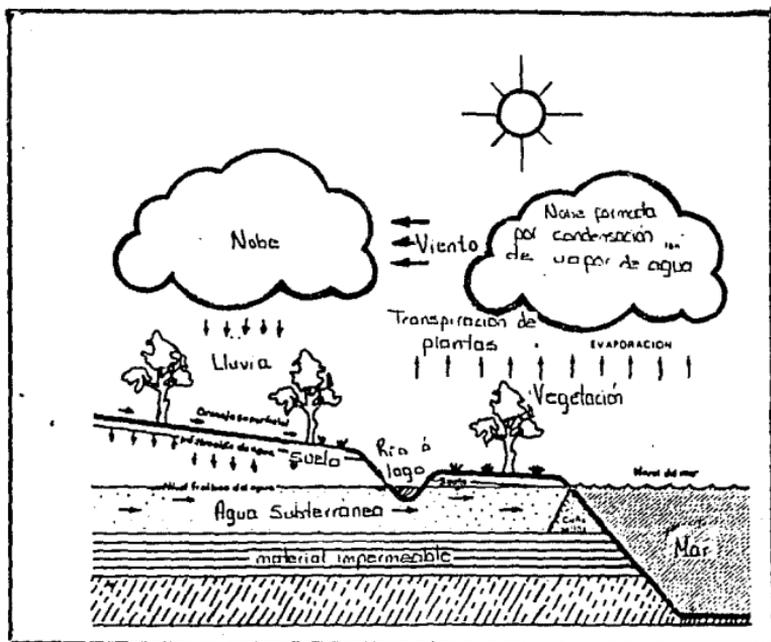


Figura 2.1. Ciclo Hidrológico.

## 2.2 DISTRIBUCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Muchos geólogos teniendo como base, que el agua subterránea proviene de la infiltración del agua superficial en el suelo y considerando su importante papel dentro del ciclo hidrológico, han estudiado su distribución dentro del suelo, dividiéndola en dos zonas: la saturada y la no saturada.

La zona *no saturada* comprende a su vez tres franjas, la del agua del suelo, la intermedia y la capilar.

En la *franja del suelo* se encuentran tres tipos de agua que son :

a) El agua higroscópica que es la que el suelo absorbe de la atmósfera húmeda y pasa a formar películas muy delgadas alrededor de las partículas del suelo.

b) El agua capilar es aquella que existe en los intersticios del suelo debido a fenómenos de capilaridad. Es ésta el agua que aprovechan las plantas para satisfacer sus necesidades.

c) El agua libre o de gravedad es la que se mueve bajo la influencia de gravedad una vez satisfecha la humedad del suelo.

La *franja intermedia* es la que comunica la franja del agua del suelo con la capilar.

La *franja capilar* es una capa humedecida por el agua que asciende de la zona saturada debido a fenómenos capilares.

El agua de la zona no saturada se le conoce como agua suspendida, ésta es el agua infiltrada que se dirige al manto freático.

En la zona saturada se encuentra el agua subterránea, en esta región el movimiento del agua es más lento debido a que todos los poros e intersticios se encuentran ocupados por ella, y es de aquí de donde se extrae el agua para diversos usos que le da el hombre (figura 2.2).

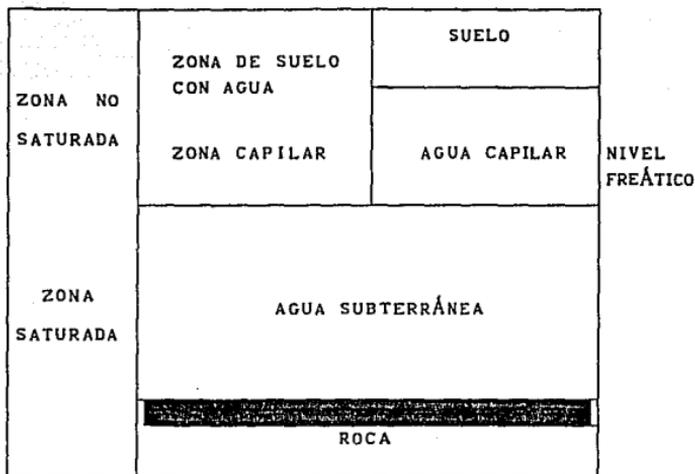


Figura 2.2 Zona Saturada y Zona no Saturada.

El movimiento del agua subterránea está controlado por varios tipos de fuerzas como son: la fuerza de gravedad, la fuerza de atracción molecular, la presión del fluido que en la zona saturada es mayor que la atmosférica, la carga hidráulica que se mide con un tensiómetro en la zona no saturada y con un piezómetro en la zona saturada. También intervienen otros factores como son: la conductividad hidráulica que es función de la carga de presión, el flujo y la porosidad. Todo esto interviene de manera especial en la estructura de las formaciones de rocas.

Las formaciones de rocas según su aptitud para contener y dejar pasar el agua a través de su masa, reciben distintos nombres:

a) *Acuíferos*: formaciones que permiten al agua moverse a través de ellas bajo condiciones ordinarias y son capaces de suministrarla por gravedad o por bombeo.

b) *Acuíclerres*: formaciones capaces de contener agua pero incapaces de transmitirla en cantidades suficientes como para su captación o manantiales.

c) *Acuífugos*: formaciones impermeables que no absorben ni transmiten agua.

Los acuíferos pueden ser libres y confinados dependiendo de la presencia o ausencia del nivel freático. Un acuífero libre tiene como frontera superior al nivel freático, por lo general, se ubica cerca de la superficie del terreno. Un acuífero confinado se presenta cuando el agua subterránea se encuentra bajo una presión mayor a la atmosférica y el nivel al cual llegan estas aguas sin ser bombeadas se llama superficie piezométrica o superficie de presión.

El agua subterránea tarde o temprano sale a la superficie:

1.- La que está cerca de la superficie del suelo se pierde por evaporación y transpiración. Hay sitios en los que se tiene lugar la filtración excurrente que es un movimiento lento del agua subterránea hacia la superficie.

2.- Por medio de manantiales.

3.- Mediante la descarga artificial a través de pozos, galerías filtrantes y demás.

4.- Mediante descargas al mar.

### 2.3 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

La calidad del agua se relaciona casi siempre con la concentración de componentes que contienen, de tal manera, que si se tienen bajas concentraciones, es decir, están suficientemente diluidos no tendrán efectos nocivos en la salud o en la utilidad que se le dé. En algunos casos, la presencia de estas sustancias en concentraciones bajas son condición necesaria para su uso. Por lo tanto, la evaluación de la calidad del agua debe considerar dos aspectos principales, la concentración de sus componentes y el uso o necesidad que se vaya a satisfacer.

La fuente del agua, es determinante en la calidad, en este caso se tomará en cuenta el agua subterránea como fuente abastecedora.

Las aguas subterráneas se originan, como ya mencionamos antes, de la precipitación y de escurrimientos superficiales; por esta razón, a menudo presentan un contenido químico similar a éstas. Sin embargo, a su paso a través del suelo, se pueden alterar sus características físicas, químicas y biológicas. El movimiento lento del agua, incrementa la oportunidad de contacto y disolución de sustancias químicas presentes en el suelo y de reacciones biológicas y fisicoquímicas presentes en el suelo que pueden

reducir o incrementar las concentraciones de algunos de los componentes. Los grandes volúmenes de aguas subterráneas con largos tiempos de retención presentan menos variabilidad en la calidad con el tiempo, que las aguas superficiales. Las aguas subterráneas tienden a ser mucho más uniformes en cuanto a temperatura, características químicas y contenido biológico. La filtración a través del suelo generalmente remueve toda la materia suspendida, incluyendo microorganismos, pero el contenido mineral en la mayoría de los casos es más alto que en las aguas superficiales de la misma región (Lamb James,1985).

## 2.4 TIPOS DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Por convención, se considera que el agua está contaminada cuando, la introducción o emisión en ella de organismos patógenos o sustancias tóxicas la hacen inapropiada para el consumo humano, uso doméstico e industrial o para la conservación de la flora y la fauna (Fair et al., 1984).

La contaminación de las aguas subterráneas puede tener muy diversas causas, éstas pueden ser naturales o provocadas por actividades humanas (Fair et al., 1984).

### 2.4.1 CONTAMINACIÓN NATURAL.

En la contaminación natural es necesario considerar la relación que existe entre el ciclo hidrológico y el ciclo geoquímico.

En el ciclo hidrológico el agua que precipita de la atmósfera lleva disuelta materia mineral, contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC), y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Al filtrarse a través del suelo disuelve minerales y sales, además de absorber bióxido de carbono, producto de la materia orgánica en descomposición, formándose ácido carbónico. Este ácido diluido capacita al agua para reaccionar químicamente con los fragmentos minerales, liberando bicarbonatos y carbonatos que pueden ir también en dilución.

Una vez que el agua entra a la matriz geológica se efectúan otras reacciones químicas, ocasionando que los compuestos menos solubles se precipiten conforme alcancen los límites de solubilidad o que los compuestos del suelo se solubilicen como el caso del Arsénico en la Comarca Lagunera o que las bacterias puedan reducir a los sulfatos en solución.

Finalmente, el agua regresa a la atmósfera por evaporación dejando atrás la materia mineral en el suelo, o bien, esa agua regresa al mar como descarga del agua del subsuelo o en forma de escurrimiento pluvial, acarreando su carga mineral con ella.

Este tipo de contaminación se debe también a los diferentes eventos naturales que se llevan a cabo como son las erupciones de volcanes, terremotos, maremotos y otros.

## 2.4.2 CONTAMINACIÓN ANTROPOGÉNICA.

En las últimas décadas, con el aumento de la población han surgido en las zonas urbanas, gran cantidad de industrias, comercios e instituciones de servicios públicos; ésto ha provocado que las fuentes superficiales de abastecimiento de agua disminuyan su volumen o lleguen a contaminarse a tal grado que no sea posible su uso, recurriéndose a la explotación de mantos acuíferos subterráneos.

Las actividades municipales e industriales generan grandes cantidades de desechos sólidos y aguas residuales. Los desechos sólidos se acumulan en tiraderos que por efecto del agua de lluvia generan lixiviados; lo que da lugar a que se contaminen por infiltración los acuíferos subterráneos.

Las actividades que realiza el hombre en el campo, también influyen de manera importante en la degradación de la calidad del agua subterránea.

Hay diversas clasificaciones sobre las fuentes de contaminación antropogénica una de las cuales es la del adaptado de Canter en 1987 que a continuación se detalla:

a) Descarga de sustancias.

-Percolación subsuperficial: fosas sépticas, cisternas.

-Pozos de inyección.

-Aplicación al terreno: riego por aspersión, lodos de desecho, descargas industriales al suelo, etc.

b) Almacenamiento, tratamiento y/o disposición de sustancias.

-Tiraderos de basura y rellenos sanitarios, con la consecuente infiltración de lixiviados.

-Depósitos de desechos: presas de jales.

-Depósitos de desechos en pilas: contenedores, tanques de almacenamiento enterrados.

-Sitios de incineración.

-Depósitos de desechos radioactivos: sitios de disposición de plantas nucleares.

c) Fuentes diseñadas para retener sustancias durante su transporte o transmisión.

-Tuberías con desechos: transporte de desechos líquidos industriales, aguas residuales municipales.

-Transporte de materiales: banda transportadora de desechos industriales.

d) Descarga de sustancias como consecuencia de otras actividades.

-Irrigación con agua tratada o cruda.

-Aplicación de plaguicidas y fertilizantes.

- Operaciones para alimentar ganado.
- Esguerrimiento urbano.
- Percolación de contaminantes atmosféricos.
- Infiltración en zonas minerales.

e) Inducción de descarga a través de patrones de flujos alterados.

- Producción de pozos: de petróleo y de gas, geotérmicos, de monitoreo y de exploración.
- Excavaciones.

f) Fuentes naturales cuya descarga se incrementa por actividades humanas.

- Lixiviación del agua de esguerrimientos naturales.
- Intrusión salina.

Otra clasificación un poco más detallada de las principales causas de contaminación antropogénica es la siguiente:

#### 2.4.2.1 ACTIVIDADES DE AGRICULTURA Y GANADERÍA.

Entre las principales actividades de agricultura y ganadería que pueden causar degradación de la calidad del agua subterránea, son las referentes a riego, el uso de fertilizantes y pesticidas y el almacenamiento o eliminación de desechos de ganado o aves ( Freeze y Cherry, 1979).

En condiciones ambientales normales, en el suelo se llevan a cabo reacciones biológicas aerobias que producen bióxido de carbono. Estas condiciones prevalecen en subsuelos poco profundos. A medida que se profundiza y se incrementa el contenido del agua en el suelo, se presentan condiciones anaerobias. Bajo estas condiciones, la descomposición de la materia orgánica genera bióxido de carbono y metano. El gas metano tiende a elevarse escapando a la atmósfera. Sin embargo, el bióxido de carbono tiende a disolverse en el agua subterránea, aumentando la corrosividad.

El elemento que mayor efecto tiene sobre las aguas subterráneas es el nitrógeno, pues es uno de los elementos que penetra más en los estratos porosos. En las aguas residuales, principalmente las provenientes de usos domésticos, se presentan grandes concentraciones de compuestos nitrogenados que, al ser esparcidos en el suelo mediante el riego, pueden producir condiciones severas de contaminación en los mantos acuíferos.

#### 2.4.2.2. DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Mucho se ha hablado sobre la utilización de las aguas residuales crudas en la agricultura y se ha recalcado el carácter controvertido de este uso, ya que por un lado es fuente de nutrientes, acondiciona y forma suelos y es fuente

de agua disponible. Por otro lado, persiste un gran riesgo de afectar la salud tanto de las personas que consumen los productos regados con estas aguas, como de los propios campesinos y sus familias que conviven con las aguas residuales.

Los frentes para atacar la problemática que causa este uso, no han sido muchos, ya que el impacto que ha causado en México ha sido aparentemente positivo, porque ha contribuido a la apertura de tierras de riego, al incremento de la producción agrícola y sobre todo ha sido una fuente de abastecimiento de agua para riego, en zonas de gran escasez o conflicto por el uso del agua (Tejeda G., 1991).

Los expertos recomiendan que para utilizar las aguas residuales que aseguren al menos un mínimo riesgo sanitario es necesario:

a) Que el contenido de coliformes fecales no sea mayor de 1000 NMP/100ml y que no exista o se tenga un huevo viable de "helminto" (parásito intestinal como la tenia y la triquina).

b) Que las concentraciones máximas permisibles de los parámetros agronómicos sean : salinidad (sólidos

suspendidos menos de 2000 ppm), Boro (menor de 2.5 ppm), conductividad eléctrica menos de 3000  $\mu$ mhos/cm, cloruros (menor a 250 ppm) y relación de adsorción de sodio, RAS (menor de 18 me/l).

c) Que las concentraciones máximas permisibles de sustancias tóxicas donde se detecten descargas industriales sean:

| MÁXIMOS PERMISIBLES (mg/l) |       |
|----------------------------|-------|
| Arsénico                   | 5.0   |
| Cadmio                     | 0.05  |
| Cromo hexavalente          | 5.0   |
| Mercurio                   | 0.005 |
| Plomo                      | 5.0   |
| Cianuro                    | 0.1   |
| Aluminio                   | 5.0   |

d) Mantener un pH neutro ya que los pH ácidos permiten la solubilidad de los metales pesados y su incorporación a la cadena alimenticia.

e) Mantener lo máximo posible las concentraciones presentes en las aguas residuales de materia orgánica (DBO) y de nutrientes a los cultivos.

Algunos de éstos puntos ya han sido legislados y deben considerarse en la elección de tratamiento o manejo sanitario de las aguas residuales.

Ante esta situación y conforme al gasto que representa el tratamiento completo y total del agua residual usada y por usarse en riego, que para la Ciudad de México representa el tratamiento de cerca de 50 m<sup>3</sup>/s, Tejeda González (Ingeniería Ambiental, 1991) propone las siguientes acciones, que juntas bajan los costos, maximizan los resultados en cuanto a la reducción de riesgos, incremento de productividad y disponibilidad de agua:

- 1.- Restricción de cultivos.
- 2.- Prácticas de riego.
- 3.- Operación de la infraestructura hidroagrícola.
- 4.- Aplicación del tratamiento mínimo requerido.

La forma más eficaz de controlar este tipo de contaminación, es la eliminación de aquellos componentes que pueden producir contaminación de aguas de descarga, ya sea por medio de algún tratamiento biológico o fisicoquímico.

### 2.4.2.3 CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA.

Otra causa de contaminación que se debe considerar es la presencia de bacterias y virus y su movimiento en el flujo de agua subterránea.

Las bacterias viajan en la corriente de agua a través del medio poroso y se pueden eliminar por filtración, agotamiento o por adsorción. La migración de las bacterias es muy lenta en relación a la velocidad del flujo del agua. En un medio arenoso o de materiales finos, los organismos patógenos y coliformes generalmente no penetran más de algunos kilómetros (Krone et al., 1968). Lo cual sí es preocupante porque las extracciones más profundas son ± 2,000 m.

### 2.4.2.4 DESECHOS DOMÉSTICOS.

En general, los desechos líquidos y sólidos producidos en las actividades domésticas, son importantes debido a su volumen y a las altas concentraciones de materia orgánica que contienen.

Los desechos líquidos domésticos, se captan por medio de redes de alcantarillado, las cuales conducen las aguas hasta puntos alejados de las zonas urbanas donde se reintegran al

medio ambiente, ya sea directamente o con tratamiento previo. En México este servicio cubre del 40 al 70 % de la población.

Existe un problema serio en cuanto a los detergentes, originando cambios de tensión superficial que bloquean la interfase para fenómenos de autopurificación del agua y permanencia en partículas del suelo.

Las aguas descargadas al medio ambiente sin tratamiento, se encauzan hacia cuerpos receptores que las transportan hacia su reuso o al océano.

La contaminación que se produce en estos cuerpos receptores, puede acabar con la utilización de sus aguas y además se pueden presentar infiltraciones al subsuelo, causando la contaminación de mantos acuíferos subterráneos.

Existe contaminación en 216 cuencas, observándose en 20 de ellas un deterioro mayor. Cinco de estas cuencas concentran el mayor desarrollo urbano-industrial, por lo que han sido consideradas de atención prioritaria: Lerma-Santiago, Pánuco, San Juan, Balsas y Blanco (SEDUE, Informe General de Ecología, Noviembre de 1988).

#### 2.4.2.5. DESECHOS INDUSTRIALES.

Las aguas subterráneas pueden particularmente contaminarse por productos de desecho procedentes de núcleos urbanos y de complejos industriales. Las distintas industrias producen diferentes tipos de residuos, todos ellos nocivos para la humanidad. La Ciudad de México cuenta con un gran número de industrias entre las que encontramos (Turpin M.S., 1990):

- Industrias petroquímicas.
- Industrias de azúcar y alcohol.
- Industria de celulosa y papel.
- Industria de curtido y acabado en pieles.
- Industria Textil.
- Industria Alimentaria.
- Industrias de fertilizantes.
- Industrias de plásticos.
- Industria de vidrio.
- Industria de hierro y acero.
- Centros termoelectrónicos.

Los residuos sólidos desechados por estas industrias, bajo ciertas condiciones se infiltran a través del subsuelo contaminando los acuíferos.

Las industrias son una gran fuente de contaminación de aguas

subterráneas, además de que son la principal fuente de aportación de metales a los desechos sólidos. (Jiménez Cisneros, 1991).

En la Ciudad de México no se puede hacer una distinción entre residuos domésticos y residuos industriales, pues ambos tipos de residuos se encuentran mezclados en los tiraderos municipales.

Es por esto, que se analizó el contenido de elementos tóxicos disueltos en lixiviados y su comportamiento con respecto a los fenómenos de adsorción y precipitación en un sistema de carbonatos, simulando carbonatos presentes en el suelo.

## CAPITULO 3

### LIXIVIADOS.

### 3.0 INTRODUCCIÓN.

En países en vías de desarrollo, los sitios de disposición de residuos sólidos, la mayoría de las veces, se ubican en lugares seleccionados arbitrariamente (Cheremisinoff, y Kenneth 1983), estos sitios pueden convertirse en una fuente potencial de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. En condiciones inapropiadas se produce la infiltración de agua de lluvia hacia los residuos sólidos, generando líquidos que se percolan extrayendo el material disuelto o suspendido (lixiviado).

En este capítulo se describirá la formación de lixiviados en un sitio de disposición de residuos sólidos, así como el tipo de lixiviado con el que se llevó a cabo este estudio, con la finalidad de aplicar en el futuro los resultados de este trabajo al análisis de la contaminación del acuífero del Valle de México.

### 3.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE LIXIVIADOS.

El suelo que rodea al sitio de disposición de residuos sólidos es de gran importancia, tanto por su naturaleza, litología, concentración en materia orgánica y en organismos vivos, así como por sus características hidrogeológicas, debido a que existe la posibilidad de escurrimientos y dilución de los lixiviados. El volumen de lixiviación producido en un sitio es función de la adsorción del suelo, área expuesta, composición, localización, material de cubierta y cantidad de recarga por infiltración (Cheremisinoff y Kenneth, 1983).

Cuando el agua se pone en contacto directo con los residuos sólidos, se abre la posibilidad de iniciar procesos de contaminación. Muchos materiales de residuos sólidos son solubles en agua, en cambio otros se forman como productos solubles de la degradación natural de los residuos sólidos. En general, arrastra una alta concentración de contaminantes (Cheremisinoff y Kenneth, 1983).

En los sitios de disposición de residuos sólidos ocurren fenómenos complejos debido a las interacciones entre los constituyentes de los residuos y el agua de lluvia que se infiltra entre la masa de los sólidos.

Un sitio de disposición de residuos sólidos, se debe considerar, como un medio en constante evolución, en donde se realizan reacciones fisicoquímicas, químicas y biológicas. Estas reacciones son las responsables de la solubilización, precipitación, óxido-reducción e intercambio iónico de algunos materiales contaminantes. Estas reacciones tienen como resultado la formación de compuestos susceptibles de interactuar con otros elementos contaminantes, por ejemplo, la formación de complejos metálicos. Las consecuencias directas de estas transformaciones son la liberación de gas y la formación de lixiviados.

Los factores que influyen principalmente en la formación de lixiviado son el agua de lluvia que se infiltra en la masa de residuos, las condiciones hidrogeológicas del sitio de disposición y las etapas bioquímicas de la degradación de los residuos sólidos (Finstein et al., 1980).

### 3.2 ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS.

Un procedimiento para estimar la generación de lixiviados es el método de balance de agua que considera los movimientos del agua en el suelo: precipitación, evapotranspiración, superficie de escurrimiento y almacenamiento de humedad en el agua (Rovers y Farquhar, 1983).

Los movimientos del agua en el suelo en Santa Cruz Meyehualco se muestran en la siguiente figura:

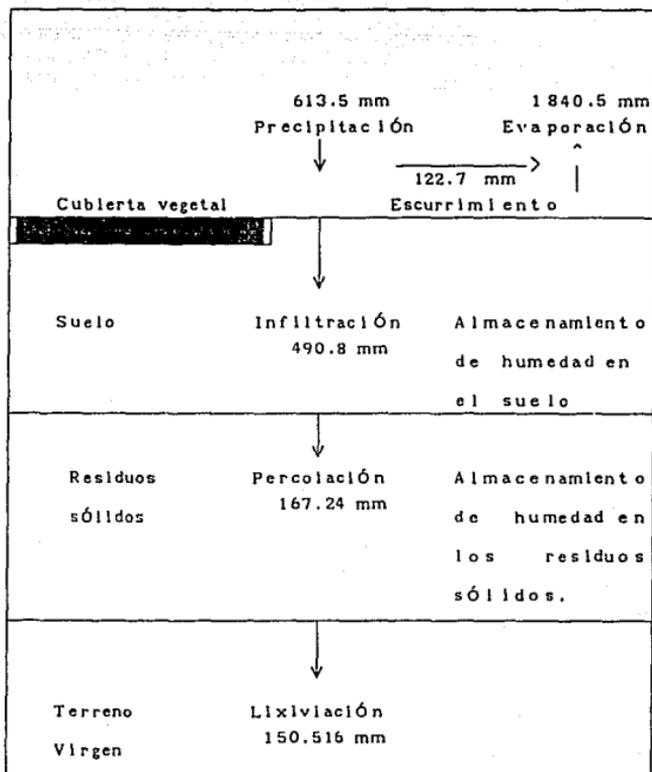


Figura 3.1 Movimientos del agua en el suelo en Santa Cruz Meyehualco.

En la mayoría de los casos, la generación de lixiviados representa un problema potencial en áreas húmedas (evapotranspiración real baja y alta precipitación); sin embargo, este problema disminuye en zonas áridas. El patrón que sigue el flujo intermitente de lixiviados es similar a las precipitaciones que se presentan en el área. La mayor parte de los lixiviados se producen, durante los meses de percolación significativa (Cheremisinoff y Kenneth, 1983).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS

La cantidad de agua que entra a un depósito de residuos sólidos no necesariamente necesita exceder la capacidad de campo del desecho depositado para producir lixiviados y descargarlo al medio ambiente. Las características del lixiviado varían ampliamente y es difícil predecir la composición exacta del lixiviado. Las características del lixiviado no están determinadas únicamente por los materiales colocados en el sitio, sino también por la etapa de descomposición, las características físicas del agua de percolación, el suelo utilizado para la cubierta y el suelo adyacente al lugar. Es decir, el lixiviado estará compuesto de las concentraciones de contaminantes tales como sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas o suspendidas, así como productos de actividad microbiana (Cheremisnoff y Kenneth, 1983).

Un cierto número de investigaciones han conducido a definir las características específicas de un lixiviado. Se ha reportado el intervalo de color de lixiviados de verde a café y los olores similares aquellos de basura, aceite y grasa (hidrocarburos).

La tabla 3.2 que sigue, muestra un informe de la EPA (Environmental Protection Agency de U.S.A) en la cual se proporciona de manera aproximada la composición de un lixiviado en un sitio de disposición de material sólido. En él se observa un gran número de contaminantes inorgánicos y orgánicos, además de que se puede ver que el contenido de sólidos totales disueltos es muy alto. Cabe señalar que el contenido de metales es bajo porque en E.U no se mezclan los residuos sólidos domésticos con los industriales los cuales aportan mayor parte de los metales al lixiviado.

TABLA 3.1 Composición de un lixiviado en un sitio de disposición de material sólido

| PARÁMETROS                      | INTERVALOS REPRESENTATIVOS (mg/lt) |
|---------------------------------|------------------------------------|
| K                               | 200-1000                           |
| Na                              | 200-1200                           |
| Ca                              | 100-3000                           |
| Cl                              | 300-3000                           |
| SO <sub>4</sub>                 | 10-1000                            |
| Alcalinidad total               | 500-10000                          |
| Fe(total)                       | 1-1000                             |
| Mn                              | 0.01-100                           |
| Cu                              | <10                                |
| Ni                              | 0.01-1                             |
| Zn                              | 0.1-100                            |
| Pb                              | <5                                 |
| Hg                              | <0.2                               |
| As                              | <5                                 |
| Ag                              | <5                                 |
| Ba                              | <100                               |
| Cd                              | <1                                 |
| Se                              | <1                                 |
| Cr                              | <5                                 |
| NO <sub>3</sub>                 | 5-200                              |
| NH <sub>4</sub>                 | 10-1000                            |
| Fosfóro como PO <sub>4</sub>    | 1-100                              |
| Nitrógeno orgánico              | 10-1000                            |
| Carbono orgánico total disuelto | 200-30000                          |
| DQO                             | 80-90000                           |
| DBO                             | 2-57000                            |
| Sólidos totales disueltos       | 5000-40000                         |
| pH                              | 5.9-9.1                            |
| Conductividad (µmhos)           | 100-1200                           |

De acuerdo con la experiencia en el muestreo de lixiviados, el color puede variar de negro a claro, dependiendo de las condiciones de lluvia; el olor puede cambiar desde prácticamente ninguno hasta un olor fuertemente químico. La turbiedad se presenta desde clara hasta cargada con material sólido de origen orgánico e inorgánico (Freeze y Cherry, 1979).

En general, un lixiviado tomado directamente de un tiradero puede ser normalmente alto en hierro, nitrógeno orgánico, dureza, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), fosfatos, sulfatos, sólidos totales (disueltos o suspendidos), demanda química de oxígeno (DQO) y compuestos orgánicos.

Para nuestro estudio se utilizó el lixiviado del extiradero de Santa Cruz Meyehualco cuya caracterización es la siguiente :

TABLA 3.2 Caracterización del lixiviado

| ELEMENTO            | CONCENTRACIÓN (mg/lt) |
|---------------------|-----------------------|
| Cadmio              | 0.016                 |
| Calcio              | 63.6                  |
| Cromo               | 0.30                  |
| Fierro              | 24.92                 |
| Mercurio            | 6.58E-6               |
| Magnesio            | 88.00                 |
| Plomo               | 0.16                  |
| CE ( $\mu$ mos)     | 4900.00               |
| pH                  | 8.46                  |
| * T ( $^{\circ}$ C) | 18.8                  |
| COT (ppm)           | 745                   |

\* Es la temperatura a la cual se tomaron las mediciones

De acuerdo con la EPA ( Environmental Protection Agency, U.S.A ) se puede ver que el pH en el que se va a trabajar es básico, las partes por millón de carbono total está por encima del límite inferior establecido. En cuanto a la conductividad podemos ver que sobrepasa en gran cantidad el límite de la EPA. Se puede apreciar que la concentración de los metales es baja.

### 3.4 INTRODUCCIÓN ACERCA DE LOS ELEMENTOS TÓXICOS CONTENIDOS EN LIXIVIADOS

En años recientes se ha puesto especial atención a elementos tóxicos presentes en aguas subterráneas por sus efectos en la salud, en la flora y en la fauna. De los principales elementos tóxicos que se han tomado en cuenta están: Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Plata, Plomo, Selenio y Zinc (Code of federal regulations, Julio 1988)

Estos elementos raramente se presentan en aguas subterráneas en porcentajes significativos del total de sólidos disueltos y sus concentraciones pueden estar, dependiendo de la fuente y del comportamiento hidroquímico, sobre las normas especificadas en agua potable.

La importancia del estudio de los elementos tóxicos contenidos en lixiviados radica en los efectos que ocasionan éstos al rebasar los límites de concentraciones máximas permitidas para cada uno de ellos, ya que ésto trae como resultado una gran variedad de perjuicios sobre la salud así como la contaminación de las aguas subterráneas pues éstas constituyen la fuente de abastecimiento de agua más grande con la que cuenta la Ciudad de México.

### 3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS TÓXICOS EN ESTUDIO.

Las principales fuentes de disposición de elementos tóxicos son: lixiviados de ciertos residuos industriales y aguas residuales en el suelo. Entre los elementos tóxicos que se encuentran presentes en lixiviados de acuerdo al código de regulaciones federales de 1988 tenemos al Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Mercurio, Plata, Plomo y Selenio.

En el desarrollo del presente trabajo de tesis, se trabajó solo con cuatro de ellos ( Cadmio, Cromo, Mercurio y Plomo), debido a que estos elementos tóxicos se encuentran en mayor proporción que los otros, según la caracterización del lixiviado trabajado.

### 3.6 TOXICIDAD DE LOS ELEMENTOS TÓXICOS EN ESTUDIO.

Conocer la toxicidad de un elemento es de vital importancia, pues nos ayuda, para tomar en cuenta las precauciones adecuadas para su manejo.

La toxicidad de cada uno de los elementos en estudio se describe a continuación:

#### CADMIO

Es un elemento tóxico en extremo, sobretodo si se inhala en polvo. Ha habido muertes por envenenamiento agudo con cadmio por inhalación de humos de óxido de cadmio (CdO). Tanto el cadmio en polvo como el cadmio en humo provocan irritación en los pulmones.

El cadmio ataca tanto al sistema gastrointestinal como el sistema renal, al sistema nervioso, al sistema respiratorio, al sistema cardiovascular y a los huesos. La mayoría del cadmio existente en el medio ambiente procede de escapes de procesos de revestimiento de acero y otros elementos, que pueden contaminar las plantas de tratamiento biológico de aguas negras (Phillip and James, 1985).

Se recomienda una concentración límite en el agua potable de 0.005 mg/lit.

#### CROMO

Este metal se introduce al cuerpo por inhalación, ingestión directa o por ingestión de agua contaminada. El cromo en polvo puede producir deficiencia pulmonar, tiene un gran poder cancerígeno en los pulmones (sarcomas, adenocarcinomas). Ataca al sistema renal, nervioso y respiratorio. Produce graves irritaciones en la piel y problemas en el hígado (Nick and James, 1978).

Se recomienda una concentración límite en el agua potable de 0.05 mg/lit.

#### MERCURIO

Es un elemento tóxico y se puede producir un envenenamiento por inhalación del vapor, por adsorción cutánea o por ingestión de compuestos solubles. Un ejemplo histórico es la enfermedad de los sombreros ( hidrargirismo ), contraída por los obreros al emplear compuestos de mercurio en la preparación de fieltro a partir de la piel de conejo.

Altas concentraciones de mercurio causan serias irritaciones respiratorias, problemas de digestión y daño

renal. También causa enfermedades como anorexia, pérdida de peso, estomatitis y problemas a nivel neurológico y físico. La exposición de vapores de mercurio a concentraciones de 1.2 a 8.5 mg/m<sup>3</sup> causa tos, dolor en el pecho y disnea, ocasionando bronquitis y neumonitis (Phillip and James, 1985).

El mercurio tiene un efecto acumulativo, tiene la tendencia de depositarse en diferentes órganos como el cerebro, el hígado, riñones y en algunos tejidos.

Se recomienda una concentración límite en el agua potable de 0.001 mg/lt.

#### PLOMO

Este metal se introduce al cuerpo por inhalación e ingestión; se adsorbe y transporta en la sangre acumulándose en el hígado, riñones y huesos, donde parece ser inerte; pero su exceso en los tejidos puede ocasionar cólicos graves y efectos neurológicos adversos. La mayor fuente del plomo ambiental existe naturalmente en el suelo, a un promedio de 16 mg/lt (Control del agua potable, 1990).

Se detecta por altas concentraciones de ácido aluminovulínico en la orina. Se recomienda una concentración límite en el agua potable de 0.05 mg/lt.

TABLA 3.3 DOSIS LETALES DE LOS ELEMENTOS EN ESTUDIO.

| ELEMENTO | CONCENTRACIÓN<br>(Mg/Lt) |
|----------|--------------------------|
| Cadmio   | Mayor a 2.5              |
| Cromo    | Mayor a 1.0              |
| Plomo    | Mayor a 0.6              |
| Mercurio | Mayor a 0.05             |

Chemical Hazards of the Workplace, Nick H. Proctor, 1978.

### 3.7 NORMAS TÉCNICAS ECOLÓGICAS.

Debido a la toxicidad de ciertos elementos químicos, se han reglamentado normas técnicas ecológicas donde se muestran los límites de concentraciones permisibles de cada elemento, tanto para residuos peligrosos como para agua potable.

#### 3.7.1 NORMA TÉCNICA ECOLÓGICA PARA RESIDUOS PELIGROSOS.

Algunos elementos son altamente riesgosos para la salud, en la norma técnica ecológica, NTE-CRP-001/88 de SEDUE, se establecen los criterios para la determinación de residuos peligrosos.

Esta norma declara que los residuos sólidos son peligrosos cuando por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, venenosas, biológicas, infecciosas, irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Así por ejemplo, un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando:

"Al hacer la prueba de extracción para la toxicidad conforme a la norma técnica ecológica NTE-CRP-002/88, aparezcan uno o más de los constituyentes que a continuación se mencionan, y al efectuar los métodos de análisis previstos en las normas técnicas ecológicas correspondientes presentan concentraciones iguales o mayores que las que se presentan en el siguiente listado: "

**TABLA 3.4 Constituyentes que hacen peligroso  
 a un residuo por su toxicidad al Ambiente**

| CONSTITUYENTE           | CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMITIDA (mg/lt) |
|-------------------------|--|
| ARSÉNICO                | 5.0                                    |
| BARIO                   | 100.0                                  |
| BENCENO                 | 0.07                                   |
| CADMIO                  | 1.0                                    |
| CLORDANO                | 0.03                                   |
| CLOROBENCENO            | 1.4                                    |
| CLOROFORMO              | 0.07                                   |
| CLORURO DE METILENO     | 8.6                                    |
| CLORURO DE VINILO       | 0.05                                   |
| CROMO                   | 5.0                                    |
| DISULFURO DE CARBONO    | 14.4                                   |
| ENDRIN                  | 0.003                                  |
| FENOL                   | 14.4                                   |
| HEPTACLORO              | 0.001                                  |
| HEXACLOROBENCENO        | 0.13                                   |
| HEXACLOROBUTADIENO      | 0.72                                   |
| HEXACLOROETANO          | 4.3                                    |
| ISOBUTANOL              | 36.0                                   |
| LINDANO                 | 0.06                                   |
| MERCURIO                | 0.2                                    |
| METILETILCETONA         | 7.2                                    |
| METOXICLORO             | 1.4                                    |
| NITROBENCENO            | 0.13                                   |
| PENTAFLOROFENOL         | 3.6                                    |
| PIRIDINA                | 5.0                                    |
| PLATA                   | 5.0                                    |
| PLOMO                   | 5.0                                    |
| SELENIO                 | 1.0                                    |
| TETRAFLORURO DE CARBONO | 0.07                                   |
| TOLUENO                 | 14.4                                   |

Fuente: SEDUE, 1988, "Norma técnica ecológica NTE-CRP-001/88 que establece los criterios para la determinación de residuos peligrosos y el listado de los mismos", Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de Junio de 1988, México, D.F. "

### 3.7.2 NORMAS TÉCNICAS ECOLÓGICAS PARA AGUA POTABLE.

Se considera agua potable o agua apta para consumo humano, toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud, es decir, cuando se encuentre libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas y cumpla con los requisitos establecidos en esta norma (Diario oficial de la federación, Enero 1988).

El número de organismos coliformes totales debe ser como máximo de 2 organismos por cada 100 ml.

No contendrá organismos fecales.

Aspecto líquido, pH entre 6.9 a 8.5, olor y sabor característicos.

Turbiedad hasta 10 unidades de la escala de sílice.

El contenido expresado en mg/lt de elementos, iones y otras sustancias no excederá los límites permisibles que a continuación se expresan en la tabla 3.4:

| Elemento                               | mg/l t |
|--|--------|
| Alcalinidad total (CaCO <sub>3</sub> ) | 400.00 |
| Aluminio                               | 0.20   |
| Arsénico                               | 0.05   |
| Bario                                  | 1.00   |
| Cadmio                                 | 0.005  |
| Cianuro                                | 0.05   |
| Cobre                                  | 1.50   |
| Cloro libre agua clorada               | 0.20   |
| Agua sobreclorada                      | 1.00   |
| Cromo hexavalente                      | 0.05   |
| Dureza de calcio (CaCO <sub>3</sub> )  | 200.00 |
| Fenoles                                | 0.001  |
| Fierro                                 | 0.30   |
| Floruro                                | 1.5    |
| Magnesio                               | 125.00 |
| Manganeso                              | 0.15   |
| Mercurio                               | 0.001  |
| Nitratos                               | 5.00   |
| Nitritos                               | 0.05   |
| Oxígeno consumido en medio ácido       | 3.00   |
| Plomo                                  | 0.05   |
| Selenio                                | 0.05   |
| Sulfatos                               | 250.00 |
| Zinc                                   | 5.00   |

Tabla 3.5 Concentración de metales en agua potable

### 3.8 USOS INDUSTRIALES.

Los metales dentro de nuestra sociedad e industria juegan un papel muy importante desde el punto de vista de sus aplicaciones en nuestra vida diaria.

Los elementos tóxicos estudiados son inhibidores de los procesos biológicos para tratamiento de aguas, algunos de sus usos son los siguientes:

#### CADMIO.

La mayoría del cadmio existente en el medio ambiente procede de fugas de procesos, de revestimiento de acero y otros elementos, que pueden contaminar las plantas de tratamiento biológico de aguas negras (Phillip and James, 1985).

Además de los procesos de revestimiento, el cadmio se utiliza en muchas aleaciones, como por ejemplo, para aumentar la resistencia y conductividad del cobre destinado a contactos y terminales eléctricos. Es también un componente de las pilas recargables de níquel-cadmio, con hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. Se emplea además extensamente en electrónica, en los rectificadores y

fósforos de las pantallas de televisión y en forma de sulfuro (CdS), en los dispositivos fotoeléctricos y células solares.

La mayoría de sus sales son de color rojo oscuro y algunos sulfuros de cadmio se utilizan como pigmentos amarillos y anaranjados (Mortimer, 1983).

#### CROMO.

Se utiliza en pigmentos, como inhibidor de corrosión (cromadora), se utiliza en la fabricación de acero inoxidable y en aleaciones de acero.

Las formas más comunes de encontrar el cromo son como óxido crómico, fosfato crómico y fluoruro crómico (Phillip and James, 1985).

#### MERCURIO.

Se utiliza principalmente en la fabricación de pilas de larga duración y gran estabilidad eléctrica en radios, relojes, cámaras y calculadoras. En estado gaseoso se utiliza en lámparas fluorescentes de descarga eléctrica. Se utiliza también este metal en cubas industriales destinadas

a la producción electrolítica de hidróxido y cloruro de sodio. Forma aleaciones llamadas amalgamas, las cuales se usan en empastes odontológicos. También se utiliza en la fabricación de termómetros, barómetros y manómetros.

## PLOMO

Utilizado en múltiples industrias, es uno de los metales que se encuentran con mayor frecuencia en el suelo debido a lixiviados, procesos de combustión y derrames de gasolina, entre otros.

Se utiliza hoy en día en todos los acumuladores de vehículos de motor, en aleaciones para metal tipográfico, cojinetes, pigmentos, tintas, cerámica y soldaduras. Es el metal corriente más denso ( $11.34 \text{ g/cm}^3$ ), por lo que se utiliza como lastre, como parte del equipo protector contra rayos X y como absorbente de rayos gamma (Phillip and James, 1985).

### 3.9 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ELEMENTOS EN ESTUDIO.

A partir del conocimiento de las características físicas y químicas de los elementos en estudio (Cd, Cr, Hg y Pb) es posible predecir su comportamiento en ciertas condiciones, así como, poder seleccionar las condiciones óptimas para lograr resultados confiables en un estudio experimental.

Debido a éstas razones, se exponen a continuación características generales tanto físicas como químicas de estos elementos.

Los metales se caracterizan por tener altas conductividades eléctricas y térmicas, lustre característico y la capacidad de deformarse bajo presión sin romperse. La tendencia de estos elementos hacia la formación de cationes por pérdida de electrones y la formación de óxidos están entre las características químicas de los metales.

Más de las tres cuartas partes de todos los elementos conocidos son metales (Mortimer, 1983). La mayoría de los metales tienen densidades relativamente altas en comparación con las densidades de los sólidos no metálicos, en general, los metales presentan altos puntos de fusión y ebullición.

La conductividad eléctrica, se mide en unidades de  $1/\Omega \text{ cm}$  y para una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , va desde  $10^4$  y  $10^6/\Omega \text{ cm}$ .

La mayoría de los metales son altamente deformables, es decir, son dúctiles y maleables además de buenos conductores del calor y la electricidad. Los radios atómicos son notablemente constantes y la energía de ionización tiende a aumentar a medida que se incrementa la carga positiva del núcleo (número atómico).

La estructura de estos metales suele ser de tipo de empaque compacto: cúbico centrado en el centro (ccc), cúbico centrado en las caras (ccca), o empaque hexagonal compacto (hex). También existen otras estructuras como la cúbica simple (cs), la rómbica (rmb), la tetragonal (tet) y la diamante (dia) (Ander y Sonnessa, 1985). Algunas estructuras se presentan en las siguientes figuras:

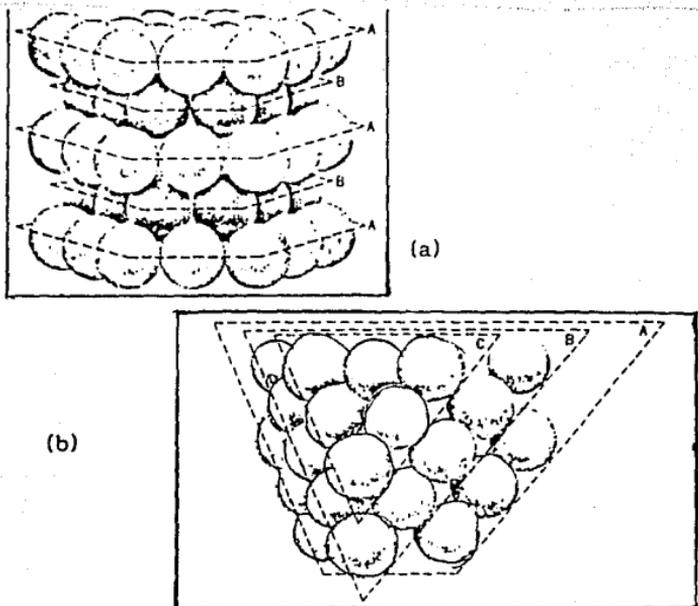


Figura 3.2 Representación tridimensional de las estructuras compactas, hexagonal (a) y cúbica centrada en la cara (b).

Casi todos los metales forman compuestos con aniones conocidos, tales como haluros, sulfuros, nitratos, acetatos, carbonatos, hidróxidos, fosfatos y silicatos. Los primeros cuatro aniones tienden a formar compuestos solubles y los otros, compuestos insolubles. En todos estos compuestos el metal se encuentra en un estado de oxidación positiva. Debido a que estos metales tienden más a un estado de oxidación, pueden formar más de una sal con un cierto anión. Además se sabe que entre más negativo sea el potencial de reducción más activo es el metal como agente reductor.

**CADMIO:** Es un metal dúctil, se obtiene como subproducto de los minerales de zinc, cobre y plomo. Su p.f es de  $321^{\circ}\text{C}$ , su p.e es de  $767^{\circ}\text{C}$ , su densidad es de  $8.6 \text{ g/cm}^3$  y su estructura cristalina es hexagonal. Forma un óxido ( $\text{CdO}$ ) en el aire húmedo y frente a los ácidos, se convierte en las sales correspondientes. Es insoluble en agua a temperatura ambiente y su presión de vapor es de 1 torr a  $393^{\circ}\text{C}$ .

**CROMO:** Es un metal grisáceo, inoxidable, de hermoso pulimento, su p.f es de  $1857^{\circ}\text{C}$ , su p.e es de  $2682^{\circ}\text{C}$ , su densidad es de  $7.27 \text{ g/cm}^3$  y su estructura cristalina es de cúbico centrado en el centro.

**MERCURIO:** Es un metal plateado, denso, único que existe en estado líquido a temperatura ambiente, en la naturaleza se encuentra en cantidades muy pequeñas en forma de  $\text{HgS}$ . Su p.f es de  $-39^{\circ}\text{C}$ , su p.e es de  $357^{\circ}\text{C}$ , su densidad es de  $13.6 \text{ g/cm}^3$  y su estructura cristalina es rómbica. Su presión de vapor es de  $1.2 \times 10^{-3}$  torr a  $20^{\circ}\text{C}$  y su solubilidad en agua es de 0.056 a  $25^{\circ}\text{C}$ .

**PLOMO:** Es un metal muy blando y maleable, se funde, suelda y convierte fácilmente en tubos o láminas, es el metal corriente más denso ( $11.34 \text{ g/cm}^3$ ), su p.f es de  $328^\circ\text{C}$ , su p.e es de  $1751^\circ\text{C}$  y su estructura cristalina es cúbico centrado en las caras.

La mayoría de los metales se pueden determinar colorimétricamente mediante la formación de sustancias complejas o utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica, el cual permite detectar cantidades mínimas de dichos metales hasta un 0.001 con el método de flama, y un poco más pequeña con el método de generación de hidruros y acetileno (Ander y Sonnessa, 1985).

Los problemas de aguas subterráneas causados por metales son influenciados por las condiciones redox, como resultado en el número de oxidación o de elementos no metálicos con los que forma compuestos. También influyen los cambios en la fase sólida del medio poroso causados por la adsorción.

La existencia y movilidad de los metales en aguas subterráneas puede ser fuertemente influenciada por el proceso de adsorción que ocurre por la presencia de minerales arcillosos, materia orgánica y por sustancias cristalinas o amorfas que constituyen el medio poroso.

### 3.10 DAÑOS CAUSADOS POR LIXIVIADOS.

En tiraderos de basura y rellenos sanitarios, la acumulación de agua causa que los lixiviados fluyan, por un lado hacia la zona saturada, donde pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas y, por el otro lado, se dispersan en la periferia del tiradero y llegan a corrientes y/o otros cuerpos de agua superficial (Freeze y Cherry, 1979).

En situaciones donde los rellenos sanitarios estén localizados sobre materiales relativamente permeables, tales como grava, arena o rocas fracturadas, la migración de los lixiviados puede causar contaminación en áreas muchas veces tan grandes o más que las ocupadas por los tiraderos de basura.

La contaminación de aguas superficiales y subterráneas se puede evitar si los rellenos sanitarios se ubican en sitios hidrogeológicamente apropiados. Aún cuando los depósitos se cambiaran de sitio, la contaminación por lixiviados puede continuar por varias décadas (Haxo et al., 1983).

Además de la producción de lixiviados, su disposición en el terreno puede generar gases, al llevarse a cabo la descomposición bioquímica de la materia orgánica. Los gases que se producen son bióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ),

ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ). Los más abundantes son el  $CO_2$  y el  $CH_4$  (Haxo et al., 1983).

La contaminación por lixiviados puede causar daños agudos y crónicos sobre la salud de la población en general. Lo anterior incluye enfermedades, daños a la piel, parálisis parcial, daños cerebrales y muerte.

Además puede causar severos daños económicos, tensiones, inconveniencias y pérdidas para los dueños de la tierra, así como afectar animales domésticos, plantas de ornato y otro tipo de vegetación (Freeze y Cherry, 1979).

## CAPITULO 4

### MECANISMOS QUE INTERVIENEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS TOXICOS EN ESTUDIO.

#### 4.0 INTRODUCCIÓN

La contaminación que puede resultar de la migración de lixiviados, según Perrier y Gibson (1980) depende de:

a) La capacidad de retención de la zona no saturada de agua con respecto a la cantidad global de la contaminación liberada.

b) La capacidad de dilución y dispersión de la zona saturada de agua.

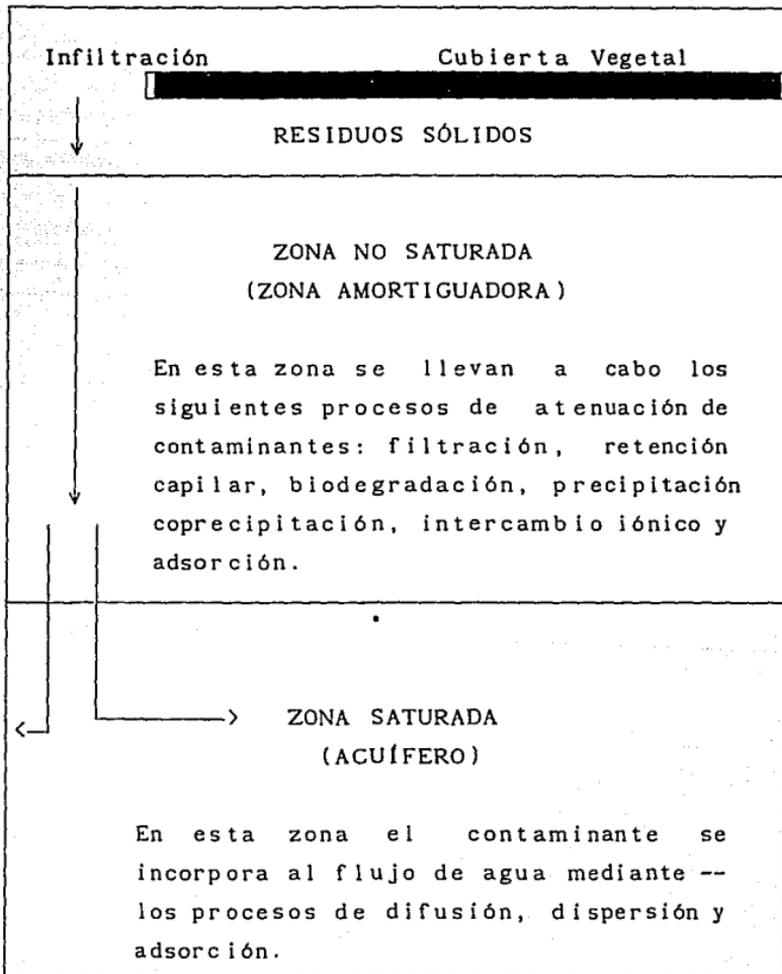
En este capítulo se darán a conocer los diferentes mecanismos de transporte de contaminantes en la zona no saturada y zona saturada, así como los principales procesos de remoción de metales.

#### 4.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE

Los mecanismos de transporte nos muestran las diferentes etapas por las que pasa el lixiviado desde que se pone en contacto con el suelo hasta que llega al acuífero y los procesos de remoción de metales que incluyen todos aquellos procesos físicos, químicos y bioquímicos que eliminan la mayor parte de la contaminación proveniente de un lixiviado tanto en la zona saturada como en la zona no saturada.

En la figura 4.1 se pueden apreciar los mecanismos de atenuación de contaminantes en las zonas saturadas y no saturadas del agua (Rovers y Farquhar, 1973).

Figura 4.1 Mecanismos de atenuación de contaminantes



#### 4.1.1 TRANSPORTE DE LOS LIXIVIADOS EN LA ZONA NO SATURADA.

La zona no saturada, es decir, la franja de terreno situada entre la superficie del suelo y la zona saturada está caracterizada por la presencia de tres fases: líquida, sólida y gaseosa. El transporte en esta zona es esencialmente vertical; el agua y los productos disueltos (solutos) se desplazan a velocidades diferentes debido a la acción de las fuerzas ocasionadas por las tensiones superficiales. El transporte es mucho más lento que en la zona saturada de agua (Griffen et al., 1975).

En la zona no saturada, es donde se elimina la mayor parte de la contaminación acarreada por los lixiviados mediante procesos físicos, químicos y bioquímicos (Griffen et al., 1975).

Los procesos físicos de atenuación de contaminantes, que se llevan a cabo en la zona no saturada son:

a) *Filtración*: Al llevarse a cabo este proceso, los medios porosos juegan el papel de filtro para el lixiviado, atrapando una parte de la materia orgánica en suspensión y a los microorganismos.

b) *Retención capilar*: En este caso, a medida que la contaminación llega a la zona saturada, una parte de la carga contaminante es detenida en el agua capilar de la zona no saturada.

c) *Biodegradación*: Es el resultado de la transformación de los compuestos químicos debido a las enzimas. Los organismos requieren para su crecimiento de energía y carbono principalmente. En este proceso las enzimas transforman muchos compuestos introducidos en el ambiente.

Los procesos químicos que se llevan a cabo en esta zona son:

a) *Precipitación y coprecipitación*: Estos procesos se llevan a cabo dependiendo de las condiciones de pH, produciéndose una disminución importante de la carga contaminante por precipitaciones de hidróxidos metálicos y de sales como carbonatos, fosfatos y sulfatos.

b) *Intercambio de iones*: Ciertos constituyentes del suelo tienen la propiedad de intercambiar iones presentes en el lixiviado que se infiltra.

c) *Adsorción*: Las sustancias disueltas o en suspensión en el lixiviado pueden ser adsorbidas sobre las partículas que constituyen el subsuelo, esta adsorción varía dependiendo

del tipo de suelo y contaminante; un suelo puede adsorber más a medida que la superficie de contacto sea más grande.

Paralelamente a estos procesos de atenuación de los lixiviados, se desarrolla un conjunto de fenómenos químicos complejos que son particularmente importantes (Chain y Daniels, 1987). Son ejemplo de estos fenómenos químicos los siguientes:

a) *Reacciones de óxido-reducción.* Los procesos de degradación bioquímica, que tienen lugar en el seno de los residuos sólidos, ocasionan la creación de una zona deficiente en oxígeno que se constituye en un medio reductor, donde la solubilidad de muchos metales pesados es más elevada que en un medio oxidante, por lo que están capacitados para emigrar a través de la zona reductora. La eficiencia de estos procesos está ligada directamente a la naturaleza, homogeneidad y espesor de la zona no saturada.

Cuando el espesor de la zona no saturada es pequeño y el suelo es muy permeable y de granulometría gruesa, la migración del lixiviado será mayor a través de esta zona, en cambio si presenta un espesor considerable y de una permeabilidad baja, los procesos de atenuación actuarán durante el avance lento de los lixiviados.

b) *Volatilización*: La volatilización de compuestos químicos orgánicos y metales del agua a la atmósfera es importante para los que presentan alta presión de vapor o baja solubilidad.

c) *Hidrólisis*: La hidrólisis de un compuesto orgánico generalmente se debe a la introducción de un grupo hidróxilo (-OH) dentro de una estructura química, con la pérdida de un grupo funcional (-x).

#### 4.1.2 TRANSPORTE DE LOS LIXIVIADOS EN LA ZONA SATURADA.

Posterior al transporte esencialmente vertical en la zona no saturada, el lixiviado se incorpora y dispersa en el sistema de flujo en forma horizontal. En este caso, la migración y la atenuación de la contaminación están regidas por los siguientes factores:

a) *Dilución del lixiviado*. Cuando el lixiviado llega a la zona saturada se mezcla con el agua del manto freático.

b) *Dispersión*. Cuando el lixiviado llega a la zona saturada, se produce una dispersión de las sustancias en solución debido a la difusión molecular causada por la agitación térmica o también debido a las variaciones en la dispersión

cinemática por el tránsito de las sustancias disueltas entre los granos del suelo.

c) *Intercambio físico en el medio y reacciones químicas.* Los intercambios entre las sustancias en solución y los granos del suelo se efectúan bajo los efectos de las diferencias temporales de concentración. Así una solución de alta concentración pierde parte de las sustancias disueltas, que se fijan en los granos del suelo (adsorción), a reserva de recuperarlas (desorción) cuando la concentración del fluido disminuye.

## 4.2 REMOCIÓN DE METALES.

Se entiende por remoción, al proceso por medio del cual se eliminan ciertos compuestos de un líquido que circula a través de un medio poroso.

Los cuatro procesos principales para la remoción de metales son: adsorción, intercambio iónico, precipitación química y complejación de metales. El tipo de suelo es muy importante en las reacciones de metales. Las arcillas tienen muy alta capacidad de adsorción; la materia orgánica y el humus presentan una alta capacidad de intercambio.

### 4.2.1 ADSORCIÓN.

Los contaminantes disueltos interactúan con los sólidos del subsuelo a través de la adsorción, produciendo una distribución de los contaminantes entre la fase acuosa y los sólidos del subsuelo, lo que disminuye la concentración en el agua y en consecuencia se retrasa el movimiento del contaminante con respecto al flujo de la masa de agua. A este fenómeno se le llama "Retardo" y es la limitante principal del movimiento de los contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas (Mackay y Vogel, 1985).

Los principales materiales adsorbentes son las arcillas y la materia orgánica, debido a que son materiales con mayor porosidad, lo cual aumenta el área superficial accesible para la adsorción. La materia orgánica se clasifica en sustancias húmicas y no húmicas. Las sustancias no húmicas son restos alterados de plantas, animales y microorganismos, tales como celulosa, proteínas y grasas. Las sustancias húmicas son compuestos alterados o degradados en polímeros compuestos y a su vez se dividen en:

- Ácidos fúlvicos: solubles en ácidos y bases.
- Ácidos húmicos: solubles en bases pero no en ácidos.
- humus: insoluble.

De la materia orgánica, las sustancias húmicas son las más adsorbentes y pueden promover o prevenir la biodegradación en algunos casos. La adsorción con materia orgánica puede ser irreversible.

La adsorción es el proceso más importante en la inmovilización de metales traza en el suelo. Las investigaciones han demostrado que a pesar de que los metales se encuentran en pequeñas concentraciones comparadas con otros materiales disueltos, el suelo tiene una capacidad muy alta para inmovilizarlos.

Esto sugiere que el suelo tiene sitios de intercambio altamente selectivos para metales o que los metales forman compuestos insolubles en el suelo.

El mecanismo exacto no ha sido determinado, pero se sugiere que la adsorción se produce en la superficie de formas amorfas y cristalinas de óxidos de hierro, manganeso y aluminio. El proceso de adsorción de metales no es fácilmente reversible y hay indicios de que se convierten en formas no intercambiables del suelo.

Experimentalmente se han dado modelos para la predicción de la adsorción de los contaminantes del suelo, de las cuales destacan:

a) Ecuación de Lagmuir: fue desarrollada originalmente para adsorción de gases en sólidos y fue aplicada para adsorción de materia orgánica en el suelo.

La ecuación en términos de concentraciones es:

$$F = \frac{K_d K_2 C}{1 + K_2 C}$$

donde:

F= cantidad adsorbida/unidad de masa adsorbente (x/m).

K<sub>d</sub>= constante experimental que indica la cantidad de sitios de adsorción.

$K_2$ = constante experimental que indica la medida de la fuerza de enlace.

$C$ = concentración del soluto en la solución.

La ecuación está basada en tres consideraciones:

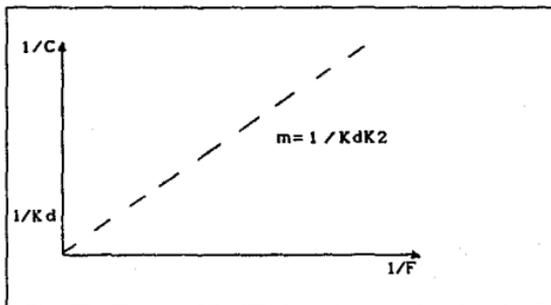
a) La energía de adsorción es constante e independiente de la cubierta del suelo.

b) La adsorción se efectúa en sitios localizados que no interactúan con las moléculas adsorbidas.

c) La adsorción máxima posible que se puede alcanzar es una monocapa.

Esta ecuación se aplica, en particular, en la adsorción de metales en el suelo.

#### GRÁFICA.



b) Ecuación de Freundlich: Expresa la capacidad de adsorción de compuestos orgánicos a partículas:

$$F = K_d C^{1/n}$$

donde:

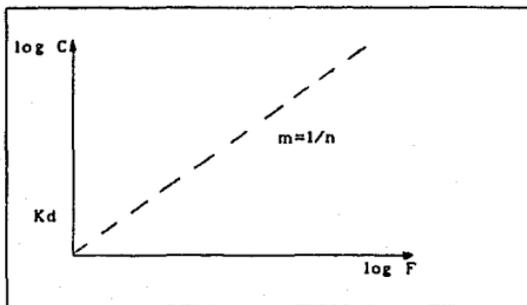
F= concentración del compuesto en la fase sólida.

C= concentración del compuesto en agua.

$K_d$  = coeficiente de partición para la adsorción, masa del soluto en fase sólida por unidad de masa sólida sobre la concentración del soluto en solución.

$1/n$ = factorial exponencial (para efectos ambientales = 1 ).

GRÁFICA.



Hay otras ecuaciones que se han establecido como el modelo de Curtis y el modelo de Roberts y Mackay.

Los factores que afectan la retención de metales en el suelo son: textura, pH, materia orgánica y contenidos de óxidos amorfos de Fe, Al y Mn. Fuller, et al., encontraron que los suelos tienen una alta capacidad de atenuar la concentración de Cu y Pb y que la retención de otros metales (Cu, Pb, Be, Cd, Zn, Ni y Hg) aumenta con el contenido de arcillas y óxidos de fierro libres en el suelo. Para compuestos aniónicos ( $\text{SeO}_3^{-2}$ ,  $\text{AsO}_4^{-3}$ ,  $\text{VO}_3^{-1}$ , y  $\text{CrO}_4^{-2}$ ), la retención en los suelos también aumenta con el contenido de arcillas y óxidos de fierro. En general la solubilidad de los metales catiónicos aumenta al bajar el pH del suelo, mientras que la solubilidad de los aniónicos aumenta a pH altos. (Asano y Pettygrove, 1984).

Los mecanismos propuestos para explicar una adsorción superior a la capacidad de intercambio iónico y la adsorción irreversible son:

a) Sorción química, particularmente en las aristas de los minerales arcillosos, involucrando los grupos hidróxilos con enlaces libres (caso del Cu y Zn).

b) Sorción específica, en las hendiduras hexagonales del mineral arcilloso.

c) Adsorción como complejos metal-ión, con  $\text{OH}^-$  y otros ligandos.

d) Precipitación con hidróxilos de sales insolubles.

A diferencia de los contaminantes orgánicos retenidos en el suelo, que gradualmente se descomponen, los metales, relativamente inmóviles, quedan depositados en el suelo, por lo que pueden tener impacto a largo plazo en los terrenos aún cuando las operaciones de recarga hubieran terminado.

#### 4.2.2 ÓXIDO-REDUCCIÓN

Los potenciales redox permiten predecir la forma en que se va a encontrar un elemento, según las condiciones oxidantes o reductivas de las aguas subterráneas.

Este comportamiento del ambiente redox es importante para predecir la movilidad de los elementos que tienen valencias variables y la solubilidad de los óxidos de metales de transición que pueden ser función de los materiales adsorbentes de la zona no saturada (Jackson, 1980).

### 4.2.3 PRECIPITACIÓN

La precipitación es la producción, por reacción química, de un compuesto poco soluble que cristaliza.

Los contaminantes pueden ser removidos de la masa de agua por precipitación directa o cuando sustituyen iones de tamaño similar en cristales ya formados (reemplazamiento) o en formación (co-precipitación).

En la remoción de contaminantes, son de importancia particular la formación de carbonatos, fosfatos, sulfuros, hidróxidos y óxidos. Es posible determinar si la especie mineral se encuentra en solución o en forma precipitada, comparando el producto de sus concentraciones molares  $[A^+][B^-]$  con el producto de solubilidad  $K_{so}$ , cuando el producto de las concentraciones es mayor al producto de solubilidad, la solución está sobresaturada y se espera que precipite (tabla 4.1).

TABLA 4.1 Producto de Solubilidad de los metales en estudio

| ELEMENTO                                 | K <sub>s</sub> |
|--|----------------|
| Cadmio CdCO <sub>3</sub>                 | 5.2 E-12       |
| Cromo Cr(OH) <sub>3</sub>                | 6.0 E-31       |
| Mercurio Hg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 8.9 E-17       |
| Plomo PbCO <sub>3</sub>                  | 7.4 E-14       |

El proceso de precipitación de metales se ilustra en la siguiente figura:

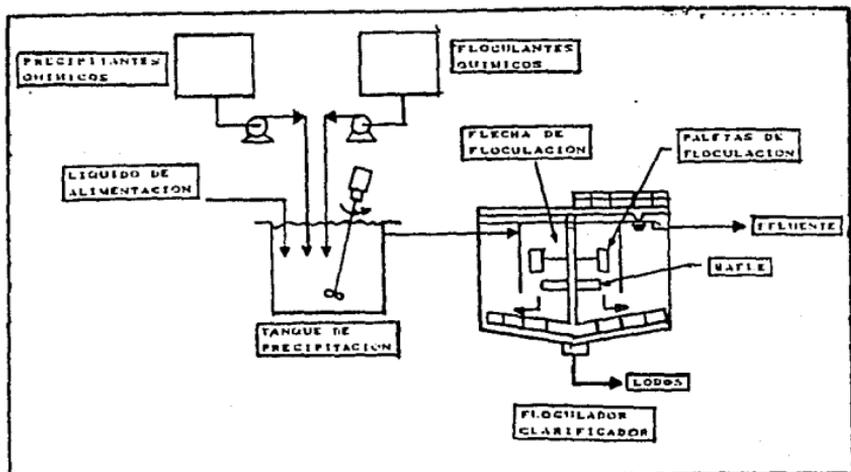


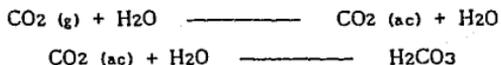
Figura 4.2

en donde un precipitante químico se adiciona al agua con metales en un tanque de agitación, los metales disueltos se vuelven insolubles por una reacción química entre los metales en solución y el precipitante, los sólidos suspendidos resultantes de esta reacción son removidos en el clarificador. Se lleva a cabo la floculación con o sin coagulante con el fin de remover todos los sólidos suspendidos. Los metales pueden ser precipitados como sulfuros, hidróxidos metálicos. y ciertos metales como carbonatos.

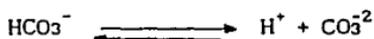
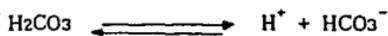
#### 4.2.3.1 PRECIPITACIÓN POR CARBONATOS

Ciertos metales como el Cadmio y el Plomo, por medio de la precipitación por carbonatos pueden producir una mayor remoción de su concentración comparando con la precipitación por hidróxilos, con la ventaja de operar a pH y densidades bajos. A pH = 10 se prefiere el método de hidróxilos y a pH = 7.5 a 8.5 se prefiere el método de carbonatos. Este tipo de precipitación no es efectivo para todos los metales.

Las aguas subterráneas contienen gases disueltos, el más importante de éstos es el CO<sub>2</sub>, mediante el cual se llevan a cabo las siguientes reacciones:



El ácido carbónico formado se disocia en dos pasos transfiriendo iones hidrógeno, por esta razón se le conoce como ácido poliprótico:



La disociación de este ácido es función del valor de pH en el agua, hasta un valor de pH de 6.5 la especie dominante que permanece en solución es el  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , para un valor mayor y hasta 10.3, la especie dominante es el ión bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  y para valores mayores de 10.3, la especie dominante es el ión carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$  (ver figura 4.3)

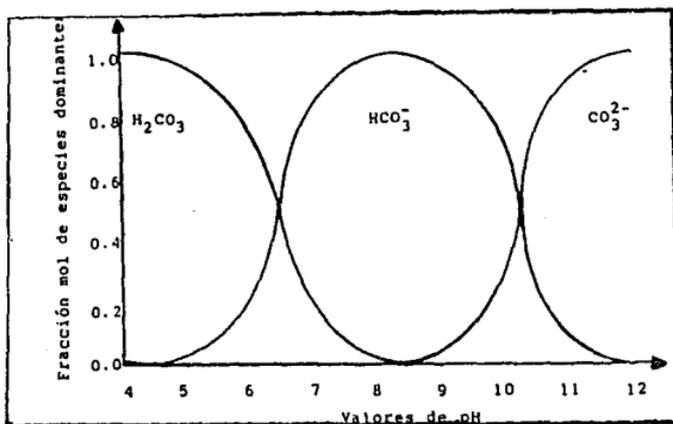


Figura 4.3 Distribución de las principales especies disueltas de carbono inorgánico en agua a 25°C (Freeze y Cherry, 1979).

#### 4.2.4 COMPLEJACIÓN DE METALES.

Muchos compuestos químicos actúan como agentes acomplejantes, previniendo el uso de los métodos de precipitación convencionales. Entre los más comunes están el Amoniaco, Cianuro y EDTA (ácido tetraetildíamida). Este tratamiento por complejación es utilizado para remover metales como el Plomo, Cobre y Estaño. Se trabaja con un pH ácido para poder romper el complejo y una vez hecho esto, se agrega un agente reductor para reducir el metal a su estado de oxidación mínimo permitiéndose así se lleve a cabo posteriormente la precipitación y remoción del metal.

En suma, se puede decir que el comportamiento químico de los metales es muy complejo. Es difícil predecir el comportamiento de su transporte en sistemas de flujo de agua subterránea, es por eso que nuestro estudio se basó en el comportamiento de estos elementos tóxicos, por un lado en lixiviados, que es la fuente de contaminación y por otro, en un sistema de agua y carbonatos de calcio que es el material del suelo que se solubiliza con mayor facilidad al contacto con agua y que se transporta en forma natural hacia las aguas subterráneas, todo esto con la finalidad de simular las condiciones químicas del transporte de lixiviados a través del suelo hacia las aguas subterráneas.

## CAPITULO 5

### DESCRIPCION DEL SITIO DE ESTUDIO.

## 5.0 INTRODUCCIÓN.

Retomando del primer capítulo del presente trabajo de tesis, la descarga sobre tierra a cielo abierto es un sistema utilizado como medio de eliminación de toda clase de basura.

En el relleno sanitario se compactan y se procura tapar con tierra, barredura de calles o ceniza los montones de basura y una vez cerrado éste puede aprovecharse como parque, jardín, área de recreo y deporte, estacionamiento de autos, etc.

Los volúmenes enormes de desechos sólidos municipales e industriales que quedan depositados en un relleno sanitario (controlado) dan lugar a la generación de lixiviados que se llegan a infiltrar a través del suelo contaminando así los mantos freáticos y alterando la calidad del agua.

Este capítulo nos presenta información sobre la localización política, geográfica e hidrogeológica del parque Cuitlahuac, anteriormente un relleno controlado de uno de los tiraderos a cielo abierto más grandes de la Ciudad de México, conocido como ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco, perteneciente a la Delegación de Iztapalapa.

## 5.1 LOCALIZACIÓN POLÍTICA Y GEOGRÁFICA. DEL EX-TIRADERO SANTA CRUZ MEYEHUALCO

El Ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco se encuentra ubicado en el Sureste de la Ciudad de México. Dentro del perímetro de la Delegación de Iztapalapa, en donde se encuentra el parque Cuitlahuac que es un área de protección ecológica donde el acceso es controlado.

El área colinda al norte con terrenos de propiedad federal, en su lado sur con la avenida Santa Cruz Meyehualco de la Unidad Habitacional del mismo nombre; por el oriente colinda con la calle Cuítlahuac de la Colonia Ejidal Santa María Aztahuacán y por el poniente con la calle Carlos L. Grácidas de la Unidad habitacional Vicente Guerrero y con la Colonia Renovación, donde viven los pepenadores que trabajaban en el tiradero. (Ver plano No.1, página 107).

Este tiradero comenzó a funcionar en 1948, quedando entonces fuera de la mancha urbana, pero con el acelerado crecimiento de la población, las áreas cercanas al lugar fueron invadidas por los asentamientos urbanos y pronto quedó rodeado.

En 1958, se llevó a cabo un control de entradas y salidas al tiradero, cercando la zona y abriendo dos entradas una al sur y otra al poniente, las cuales funcionaron hasta su

clausura.

En marzo de 1975, se instalaron 2 básculas con capacidad de 30 toneladas cada una en la puerta poniente para llevar la estadística de la basura que entraba.

Las delegaciones que descargaban sus desechos sólidos eran: Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Coyoacán, Tlalpan, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta.

En ese mismo año se abren otros sitios de disposición final y sólo las primeras ocho delegaciones continuaron depositando sus desechos en este tiradero y hasta antes de su clausura sólo las primeras seis.

La captación de desechos sólidos depositados en el tiradero no fue cuantificada desde su apertura en 1948 hasta su clausura en 1983. Pero de acuerdo al tamaño de la población del Distrito Federal, en los años que funcionó éste y por alguna información dispersa que se obtuvo, se estima que los desechos depositados ascienden a 44'712,500 toneladas, tomando como base que se depositaban 500 toneladas diarias en los primeros años de operaciones y 6000 toneladas diarias al final de las operaciones.

De acuerdo a la oficina de Disposición Final, de la Dirección Técnica de desechos Sólidos del D.D.F. el ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco tiene una superficie de 148 Ha es decir (1.48 km<sup>2</sup>).

En un principio el principal acceso era la Calzada Ermita Iztapalapa. Posteriormente se utilizó la Calzada Zaragoza, entrando a la altura del Monumento Benito Juárez.

Esta zona estuvo ocupada por una parte del Lago de Texcoco, durante la época prehispánica. Corresponde, dentro de la Cuenca de México, a la zona baja, constituida por formaciones aluviales y lacustres, además afectada por un intenso vulcanismo, correspondiente al Cuaternario. (Carta Edafológica de Iztapalapa, México D.F 1988).

El material de relleno en la zona consiste de abanicos aluviales que se depositaron sobre el valle formado por la lava incandescente de la formación tarango y de las sierras de Río Frío, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina. En la parte superior del relleno hay predominio de depósitos lacustres.

Los cortes estratigráficos que se presentan en las memorias de las perforaciones de los pozos denominados Peñón I a IX muestran grandes concentraciones de arcilla con arena o con limo, teniendo una permeabilidad media en los primeros 25

m de profundidad.

Por sus características geológicas, la zona representa un potencial importante como fuente de abastecimiento de agua.

La zona presenta suaves pendientes mayores al 10%, las mayores elevaciones cercanas al sitio son el Cerro de la Estrella al Sur y el Peñón Viejo al NE con alturas de 2461 m y 2370 m sobre el nivel del mar respectivamente.

El tipo de suelo del sitio es Solonchak Mólico. La fase química a menos de 25 cm de profundidad es fuertemente sódica (mayor de 40% de saturación de sodio intercambiable). La textura del suelo es fina en los 30 cm, superficiales. (Carta Edafológica de Iztapalapa, México D.F 1988).

Este tipo de suelo se caracteriza por tener un alto contenido de sales. Tienen un horizonte A mólico y carecen de propiedades hidromórficas dentro de los primeros 50 cm de espesor desde la superficie. (E.A. Fitz Patrick, 1980)

No hay que olvidar que esta zona fue parte del Lago de Texcoco, de ahí la presencia de sales.

El uso del suelo actual en esta área urbanizada está destinado a industrias, equipamiento, áreas verdes espacios abiertos, zona habitacional y conservación ecológica cuyos porcentajes se muestran en la figura 5.1.

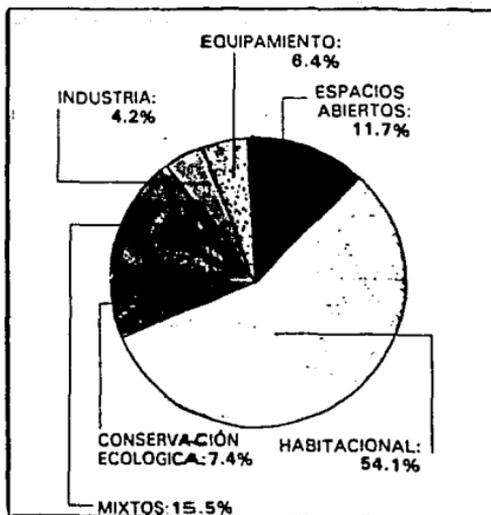


Figura 5.1 Porcentajes del uso del suelo

En cuanto a los servicios de los que dispone esta área urbanizada tenemos:

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Agua potable             | 77% |
| Drenaje y Alcantarillado | 68% |
| Electricidad             | 87% |
| Alumbrado                | 70% |
| Pavimentos               | 45% |

En cuanto a la vegetación de esta área observamos matorrales, pastizal inducido, pastizal cultivado y pastizal halófilo. Se cultiva maíz, frijol, avena, calabaza, ejote, chile, papa, garbanzo y cebada.

El tipo de ganado que se encuentra en esta zona es bovino, ovino y caprino, se observa en este área el pastoreo de ganado sobre praderas cultivadas.

Se ubica en la región hidrológica del Pánuco, en la Cuenca del Río Moctezuma y en la Subcuenca del Lago de Texcoco-Zumpango. El coeficiente de escurrimiento es de 10 - 20%.

La zona tiene material no consolidado con altas posibilidades de extracción (Carta Edafológica de Iztapalapa, México D.F 1988).

Para determinar el clima del sitio se dispusieron de los datos meteorológicos obtenidos en el Observatorio de Tacubaya, durante el período de 1971 - 1985, de las estaciones más cercanas al sitio de disposición final.

Las estaciones fueron Iztapalapa a una distancia aproximada de 3 1/4 km, Agrícola Oriental a 5 km y Los Reyes, La Paz a 6 1/2 km. Considerando a las tres estaciones para detectar si existen o no cambios bruscos meteorológicos en un radio aproximado de 6 km.

Por lo tanto se determina que es un clima templado porque la temperatura media anual está en 18 °C y la del mes más frío está entre -3 y 18°C.

Es templado húmedo con lluvias en verano, precipitación del mes más seco menor a los 40 mm, con un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% anual.

De acuerdo a las estaciones meteorológicas antes mencionadas se reporta lo siguiente:

La temperatura media anual en Iztapalapa es de 16.6 °C, en la Agrícola Oriental es de 17,2 °C y en Los Reyes es de 16,3 °C; con temperaturas del mes más frío de 13,2 °C en Diciembre, de 13,6 °C y 12,1 °C en Enero, respectivamente.

Por las tres estaciones las lluvias son de verano (jun - jul- ago), la precipitación del mes más seco es en diciembre de 3,8 mm, (4,2 mm)(5,4 mm), con un porcentaje de lluvia invernal de 3,0%, (3,5%), (4,3%) en dic - ene - feb, respectivamente.

La precipitación media anual es de 613,5 mm para Iztapalapa, de 579,6 para Agrícola Oriental y de 520,7 para Los Reyes, La Paz.

La evaporación es significativa pues de acuerdo a las estaciones de Iztapalapa y Los Reyes, La Paz es de un 300% con respecto a la precipitación reportando la media anual en el mismo período de 1649,0 mm y 1756,0 mm de evaporación respectivamente.

De éstos datos se puede inferir que los cambios meteorológicos se mantienen estables siendo la variación mínima en los meteoros no sólo en el sistema de estudio sino hasta en un radio de 6 km al oriente y al poniente.

De acuerdo a la clasificación climática de Koeppen, a los estudios climatológicos del Dr. Jauregui y a las características propias de la Ciudad de México, se establecen 5 zonas climáticas, ubicando a Santa Cruz Meyehualco en la zona oriente con los siguientes parámetros. (DDF y Colegio de México, 1987).

El nivel de contaminación es moderado (Bióxido de Azufre  $100 \text{ mg/m}^3$ ).

El grado de ventilación es bueno.

La oscilación térmica diurna es alta.

La humedad ambiente es seca.

La frecuencia de lluvias es baja.

La frecuencia de tolvaneras es alta.

La frecuencia de heladas es alta (de 20 a 30 días / año).

La frecuencia de nublado es baja.

La frecuencia de tormentas eléctricas es alta.

La temperatura máxima es de  $25$  a  $31$  °C y la mínima va de  $-3$  y  $-5$  °C a  $8$  °C.

En el período de octubre de 1975 a abril de 1976, los vientos a las 6:00 A.M. fueron de  $0,5$  m/s provenientes del norte y a las 14:00 horas fueron de  $3$  m/s provenientes del noreste.

Las tolvaneras son frecuentes principalmente durante la época de estiaje siendo favorecidas por el ahora seco Lago de Texcoco, además por ser una zona de pendientes suaves, que permiten el avance libre de los vientos provenientes de las sierras.



## 5.2 LOCALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.

### 5.2.1 LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.

La cuenca del Valle de México queda limitada al Norte por las sierras de Tenzontlalpan y Pachuca; al Sur por la sierra de Anautzín y Chichinautzín; al Oriente por los lomeríos que se desprenden de las sierras de Pachuca, envuelven los llanos de Tecocomulco, Tochac y Apan hasta llegar a la sierra de Calpulalpan, misma que después se une con las sierras de Río Frío y Nevada, al Poniente por las sierras de Ajusco, Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tepotzotlan.

La superficie de la cuenca es de 9,600 Km<sup>2</sup>, comprende extensiones territoriales de diferentes estados, integrándose con casi la totalidad del Distrito Federal, gran parte de los estados de México e Hidalgo y pequeñas porciones de Tlaxcala y Puebla.

El Distrito Federal se sitúa en la parte Suroeste de la cuenca del Valle de México, ocupando el 16% del territorio total de ésta, con 1,500 Km<sup>2</sup> de los cuales, 600 Km<sup>2</sup> se encuentran totalmente urbanizados. La mayor parte del área urbana se encuentra ubicada en la zona más plana y baja de la cuenca, en un valle cerrado a 2,240 m sobre el nivel del mar.

En la página 110 se presenta un plano de ubicación de ríos, cuencas y zonas hidrológicas.



## 5.2.2 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE MEXICO.

### 5.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO.

El acuífero de la zona sur del Valle de México ha sido dividido en tres subsistemas de acuerdo con su ubicación y tipo de rocas que lo conforman:

- a) Zona metropolitana, incluyendo Xochimilco
- b) Valle de Chalco
- c) Ex-lago de Texcoco.

La zona de estudio del presente trabajo de tesis se encuentra ubicada en el tercer subsistema correspondiente al área del ex-lago de Texcoco.

La subcuenca del vaso de Texcoco se localiza al sureste de la cuenca del Valle de México y dentro de la zona urbana de la Ciudad de México. Queda delimitada al norte por Tepexpan, Teotihuacan y Acolman y al sur por la subcuenca de Chalco.

De acuerdo a estudios recientes, podría ser geológicamente independiente del resto del valle, aunque existe una correlación hidráulica con el sistema metropolitano. Cuenta con una recarga procedente de la sierra, ubicada al oriente de Chicoloapan de Juárez, la cual fluye en dirección al vaso del ex-lago de Texcoco.

Los materiales que constituyen esta zona son de baja permeabilidad, no existen extracciones considerables y el gradiente es casi nulo; el agua en el lago aparentemente no tiene movimiento, sin embargo, en la porción oeste del vaso, a la altura del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se presenta un flujo subterráneo en dirección este-oeste, que incrementa el gradiente y pasa al acuífero de la zona metropolitana.

Las entradas de agua del acuífero son, principalmente, el flujo subterráneo procedente de las estribaciones de las sierras y de la infiltración directa del agua de lluvia. La recarga vertical puede realizarse tanto a través de las grietas existentes como a partir de las arcillas, las cuales se comportan como un acuitardo que sobreyace al acuífero granular, al descender el nivel estático del acuífero por la extracción de agua, se reduce la presión hidrostática en la base del acuitardo e inicia su aporte hacia el acuífero.

Las salidas subterráneas corresponden principalmente a la extracción de agua por bombeo.

Los cálculos anuales obtenidos en el área comprendida de el balance volumétrico son: entrada subterránea de 224 millones de  $m^3$  proveniente de las sierras; extracción por bombeo de 290 millones de  $m^3$ , cambio de almacenamiento de 26 millones de  $m^3$ , el cual se presenta como un decremento; e

infiltración de 40 millones de metros cúbicos (Ingeniería Hidráulica en México, Enero-Abril de 1992).

La figura 5.2 muestra los sistemas acuíferos del Valle de México.



### 5.2.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO.

Con los valores de la profundidad del nivel estático obtenido en la red de pozos del DDF, durante el mes de Julio de 1991, se trazó la configuración de la profundidad y del nivel estático.

En el vaso del ex-lago de Texcoco, el nivel estático se encuentra a menos de 50 m; los valores más altos se localizan al este y se hacen más someros, menores de 30 m, hacia el centro, donde el gradiente es muy bajo.

### 5.2.2.3 ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO.

La posición del nivel estático medida en los 300 pozos de la red piezométrica, se estableció teniendo como referencia el nivel del mar y utilizando las cotas de los brocales de dichos pozos, con lo cual se trazó la configuración de la elevación del nivel estático para el mes de julio de 1991 (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF).

En el vaso del ex-lago de Texcoco se detectó un flujo piezométrico del este al oeste en los alrededores de Chicoloapan. A la altura del Aeropuerto internacional, existe un flujo hacia el oeste.

En caso de que los lixiviados bajen y contaminen las aguas subterráneas, la contaminación aparecería en la zona oeste del sitio en estudio. Este tipo de análisis se llevará a cabo en estudios posteriores.

## CAPITULO 6

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

## 6.0 INTRODUCCIÓN.

La experimentación tiene como objetivo determinar el comportamiento de elementos tóxicos disueltos en lixiviados en un sistema de carbonatos.

La técnica analítica experimental usada para determinar la concentración de elementos tóxicos en función de la cantidad presente de carbonatos fué la espectofotometría de absorción atómica mencionada en el capítulo anterior.

## 6.1 EXPERIMENTACIÓN.

La experimentación se llevó a cabo mediante pruebas batch tanto de lixiviado como de agua con la finalidad de observar diferencias en el comportamiento fisicoquímico de los metales en un sistema de carbonatos, tales como la adsorción y la precipitación y así mismo poder distinguir cuando y en qué sistema (agua o lixiviado) se llevan a cabo cada uno de los fenómenos mencionados anteriormente.

Para analizar el comportamiento de los elementos tóxicos disueltos en lixiviados en un sistema de carbonatos se planteó el siguiente esquema experimental:

1) Se preparó una solución mezclando todos los elementos tóxicos en forma soluble considerados en éste estudio, a partir de soluciones estándares para absorción atómica (ver apéndice 1).

La concentración de cada elemento presente en la solución se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 6.1

| Elemento | Concentración (mg/lt)<br>$\times 10^3$ |
|----------|--|
| Arsénico | 0.22                                   |
| Bario    | 0.043                                  |
| Cadmio   | 0.043                                  |
| Cromo    | 0.22                                   |
| Mercurio | 0.0086                                 |
| Plomo    | 0.22                                   |

A esta solución preparada anteriormente, se le llamó *Solución Madre*.

2) Se preparó una solución de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) con una concentración de 1000 mg/l (ppm) a la cual se le llamó *Solución Madre de Carbonatos*.

### 3) Metodología Estadística

Fisher puso de relieve que siempre es posible eliminar más de una variable de bloque utilizando cuidadosamente diseños equilibrados. La primera estructura de este tipo fué el *cuadrado latino*.

Un cuadrado latino es una estructura  $k \times k$  que permite estudiar  $k$  tratamientos simultáneamente con dos variables de bloques. Las variables de bloques en el diseño en cuadrado latino pueden ser de la misma naturaleza o de naturaleza diferente.

La disposición del cuadrado latino se muestra en la figura 6.1 y posee la propiedad de que cada fila o cada columna recibe cada tratamiento una sola vez.

Es importante que éste diseño estadístico esté aleatorizado, lo cual se logra asignando aleatoriamente las filas y las columnas.

|       |     | Columnas |   |   |   |
|-------|-----|----------|---|---|---|
| Filas | I   | A        | B | D | C |
|       | II  | D        | C | A | B |
|       | III | B        | D | C | A |
|       | IV  | C        | A | B | D |

FIGURA 6.1 Cuadrado latino  $k \times k$

La tabla del análisis de la varianza para el diseño de cuadrado latino nos proporciona la siguiente información: suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrado medio, valor esperado del cuadrado medio y relación de cuadrados medios de las filas, columnas, tratamientos y residuos.

El número de grados de libertad de las filas, columnas y tratamientos están determinados por la siguiente expresión:  $k-1$ . Y el número de grados de libertad de los residuos están determinados por:  $(k-1)(k-2)$ .

El medio más empleado hoy en día para comprobar la significación de cada variabilidad es la prueba de F, ideada, como el método del análisis de la variación, por Fisher.

En general, la varianza mayor es la representativa de la variabilidad entre familias, y la menor, la relativa al error experimental; por tanto:

$$F = \frac{\text{Varianza mayor}}{\text{Varianza menor}}$$

$$F = \frac{\text{Varianza de subpoblaciones}}{\text{Varianza del error experimental}}$$

Cuando mayor sea el valor hallado para F más seguridad podrá tenerse de que las variabilidades consideradas son significativamente diferentes.

El valor de F seleccionado en el análisis estadístico para un valor de probabilidad de 0.05; 20 y 5 grados de independencia de las dos varianzas, es 2.71, el cual se obtiene de una tabla de F teniendo como datos los mencionados anteriormente.

Si el valor calculado por división de las varianzas determinadas en el análisis estadístico es mayor que el leído en la tabla, la variabilidad entre las subpoblaciones o familias es significativa. Si el valor calculado para F es menor que el hallado en la tabla, las diferencias aparentes entre las subpoblaciones o familias no son significativas.

4) Pruebas Batch :

a) A partir de las dos soluciones madres se preparó el siguiente cuadrado latino:

CUADRADO LATINO

CARBONATOS (PPM)

| (%)              | 0 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|------------------|---|-----|-----|-----|-----|------|
| M <sub>0</sub>   |   |     |     |     |     |      |
| E <sub>20</sub>  |   |     |     |     |     |      |
| T <sub>40</sub>  |   |     |     |     |     |      |
| A <sub>60</sub>  |   |     |     |     |     |      |
| L <sub>80</sub>  |   |     |     |     |     |      |
| E <sub>100</sub> |   |     |     |     |     |      |
| S                |   |     |     |     |     |      |

El 100% de elementos tóxicos corresponde a un valor mayor de la concentración máxima permisible de la Norma Técnica Ecológica de Residuos Peligrosos NTE-NRP-001/88.

Los valores iniciales de concentración de los elementos tóxicos se reportan en la siguiente tabla:

*M E T A L E S (mg/lit)*

| (x)       | 0 | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Cd</i> | 0 | 0.215 | 0.43  | 0.645 | 0.86  | 1.075 |
| <i>Cr</i> | 0 | 1.10  | 2.20  | 3.30  | 4.40  | 5.50  |
| <i>Hg</i> | 0 | 0.043 | 0.086 | 0.129 | 0.182 | 0.215 |
| <i>Pb</i> | 0 | 1.10  | 2.20  | 3.30  | 4.40  | 5.50  |

TABLA 6.2 CONCENTRACIONES DE METALES

b) A las pruebas batch presentadas en el cuadrado latino se les dió el siguiente seguimiento:

*Agitación.*

La agitación se realizó durante un periodo de 24 horas, con la finalidad de alcanzar la máxima solubilización de carbonatos en el equilibrio. Se ha encontrado que el equilibrio se alcanza después de 18 horas (Silva et al, 1990).

### *Filtración.*

La filtración se llevó a cabo en unidades Millipore con papel filtro GF/A, con el propósito de simular el efecto filtrante del suelo, así como representar el material que puede fluir hacia las aguas subterráneas.

La filtración dió como resultado la remoción de sólidos en suspensión provenientes de una mala solubilización de carbonatos en agua y en el caso de lixiviado materia orgánica en suspensión.

### *Digestión.*

En el proceso analítico para determinar elementos mediante el método de absorción atómica, algunos elementos requieren estar digeridos con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y con ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ).

La digestión se llevó a cabo para los siguientes elementos: Cadmio, Cromo y Plomo.

### *Conservación de las muestras para pruebas batch.*

Las muestras se depositaron en envases de plástico de 250 ml previamente enjuagados con ácido nítrico 1:1 y se mantuvieron en refrigeración a una temperatura menor de 10°C con el fin de evitar la proliferación de microorganismos y retardar durante cierto tiempo los cambios biológicos que se producen después de haber sido preparada la muestra.

### *Medición de parámetros fisicoquímicos.*

En cada muestra se determinaron 4 parámetros (pH, conductividad, temperatura y carbón orgánico total), los cuales fueron medidos en el laboratorio. Las determinaciones realizadas para dichos parámetros se llevaron a cabo con equipos específicos y siguiendo las indicaciones de los manuales correspondientes.

### *Caracterización del Lixiviado utilizado en la experimentación.*

La caracterización consistió en el análisis del mismo, determinando elementos tóxicos presentes en él, así mismo, los parámetros fisicoquímicos antes mencionados.

La determinación de elementos tóxicos presentes en el lixiviado se llevó a cabo mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica.

*Espectrofotometría de absorción atómica.*

Los procedimientos de las técnicas que se utilizaron para analizar las muestras, son los que se describen en los Métodos Estándar para Análisis de Aguas Residuales (Standar Methods for the Examination of Water and Waste Water, 1989) y los manuales del Espectrofotómetro de Absorción Atómica de marca Perkin Elmer 1100B.

## CAPITULO 7

### RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS.

## 7.0 RESULTADOS

La presentación de los resultados experimentales se encuentra clasificado no por el diseño de experimentos utilizado, sino por los metales peligrosos y los otros parámetros de control como son conductividad eléctrica, pH y materia orgánica, con la finalidad de hacer las comparaciones del comportamiento de metales en los ensayos con lixiviado y sólo con agua y tratar de distinguir el fenómeno de precipitación del de adsorción para cada contaminante, aunque se presenten mezclados, como es el caso de contaminantes que lixivian de los depósitos de desechos sólidos.

## 7.1 RESULTADOS CON RESPECTO AL CADMIO (Cd)

No existe evidencia de precipitación de cadmio provocada por el aumento de concentración de carbonatos de cadmio (FIG 7.1), por el contrario, la concentración de cadmio fue aumentando, en concentraciones superiores al cadmio agregado inicialmente. Esto indica que las sales de  $\text{CaCO}_3$  usadas aportan cadmio, probablemente porque se encuentra como traza en el reactivo. El agua utilizada también presenta un aporte de cadmio de 0.130 mg/lt, lo que se observa en la prueba correspondiente a 0,0 mg/lt de cadmio y  $\text{CaCO}_3$  (TABLA 7.1).

Cabe mencionar que este hecho es alarmante, ya que es agua de llave de Ciudad Universitaria y la concentración máxima permisible de cadmio para agua potable es de 0.005 mg/lt.

TABLA 7.1 Concentración de Cadmio soluble en agua

|  |       | <i>CARBONATOS inicial</i> |       |       |       |       |       |
|--|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>mg/lt</i>   |       | 0                         | 200   | 400   | 600   | 800   | 1000  |
| <i>C<br/>A<br/>D<br/>M<br/>I<br/>O<br/>C<br/>o<br/>n<br/>c<br/>e<br/>n<br/>t<br/>r<br/>a<br/>c<br/>i<br/>o<br/>n</i> | 0.000 | 0.130                     | 0.214 | 0.296 | 0.364 | 0.418 | 0.478 |
|  | 0.215 | 0.220                     | 0.304 | 0.310 | 0.444 | 0.508 | 0.540 |
|  | 0.430 | 0.318                     | 0.312 | 0.394 | 0.528 | 0.586 | 0.652 |
|  | 0.645 | 0.414                     | 0.412 | 0.612 | 0.540 | 0.690 | 0.684 |
|  | 0.860 | 0.514                     | 0.588 | 1.130 | 0.664 | 0.768 | 0.974 |
|  | 1.075 | 0.682                     | 0.678 | 0.752 | 0.814 | 0.870 | 0.856 |

En cambio, la materia orgánica presente en los lixiviados ejerce una notoria fuerza de adsorción sobre el cadmio, en particular cuando el cadmio agregado se encuentra en concentraciones inferiores de 0.86 mg/lt, logrando eficiencias de remoción hasta del 80% (TABLA 7.2 y FIG. 7.2).

TABLA 7.2 Concentración de Cadmio soluble en lixiviado

|              |       | <i>CARBONATOS inicial</i> |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>mg/lt</i> |       | 0                         | 200   | 400   | 600   | 800   | 1000  |
| <i>C</i>     | 0.000 | 0.016                     | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| <i>A</i>     | 0.215 | 0.066                     | 0.048 | 0.036 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| <i>D</i>     | 0.430 | 0.120                     | 0.214 | 0.088 | 0.074 | 0.048 | 0.032 |
| <i>M</i>     | 0.645 | 0.188                     | 0.182 | 0.158 | 0.154 | 0.126 | 0.098 |
| <i>n</i>     | 0.860 | 0.280                     | 0.258 | 0.230 | 0.174 | 0.210 | 0.204 |
| <i>I</i>     | 1.075 | 0.288                     | 0.316 | 0.306 | 0.286 | 0.288 | 0.346 |

En el análisis de varianza del cuadrado latino (TABLA 7.3) se encontró que no existe diferencia significativa entre los tratamientos cuando los ensayos se realizaron con agua, ya que las  $F_{exp}$  fueron menores que la  $F_{cal}$  de 2.71, es decir, desde el punto de vista estadístico la cantidad agregada de cadmio y carbonatos no intervienen en forma directa en el fenómeno de precipitación.

**TABLA 7.3** Análisis de varianza con relación a la concentración de Cadmio soluble en agua

| FV            | SC    | GL | CM   | RCM  |
|---------------|-------|----|------|------|
| Media General | 10.73 | 1  |      |      |
| Filas         | 1.13  | 5  | 0.23 | 1.12 |
| Columnas      | 0.46  | 5  | 0.09 | 0.46 |
| Residuos      | 0.20  | 20 | 0.20 |      |
| Total         | 12.52 | 31 |      |      |

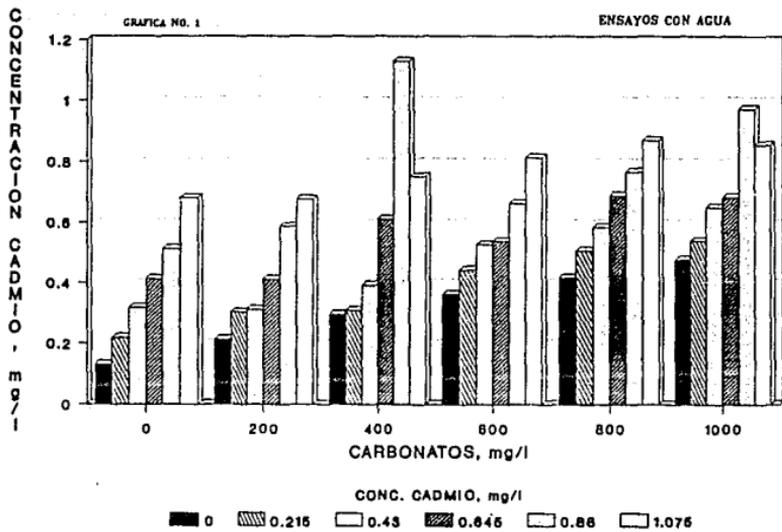
En cambio, en el análisis de varianza de los ensayos en lixiviado (TABLA 7.4), se encontraron diferencias altamente significativas con respecto a las filas, que representa los cambios en concentración de cadmio y significativas en menor grado con respecto a las columnas, que representa los cambios de carbonato.

TABLA 7.4 Análisis de varianza con relación a la concentración de Cadmio soluble en lixiviado

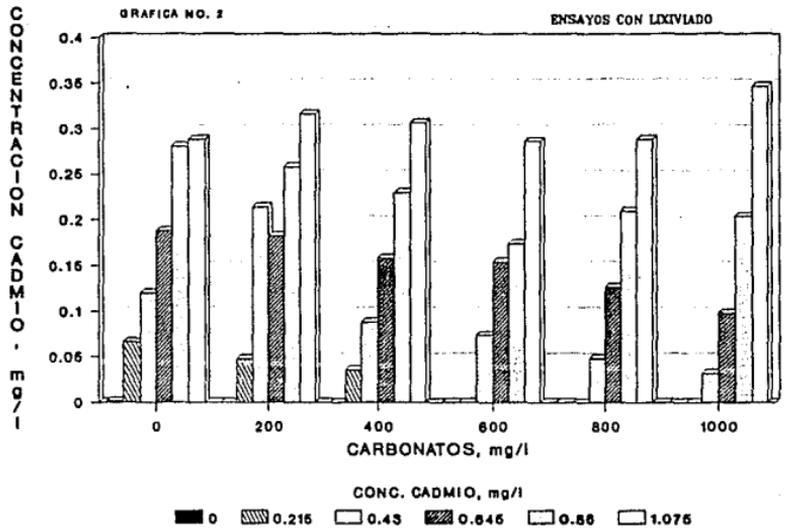
| FV            | SC   | GL | CM    | RCM   |
|---------------|------|----|-------|-------|
| Medía General | 0.65 | 1  |       |       |
| Filas         | 0.41 | 5  | 0.082 | 73.22 |
| Columnas      | 0.02 | 5  | 0.004 | 3.44  |
| Residuos      | 0.02 | 20 | 0.001 |       |
| Total         | 1.10 | 31 |       |       |

La adsorción del cadmio en lixiviados es mayor a concentraciones menores de 0.215 del metal, la capacidad de adsorción va disminuyendo a medida que aumenta el cadmio agregado y llega a su máximo cuando se agrega 1 mg/lit de Cd, manteniendo soluble entre 0.286 y 0.346 mg/lit de Cd, con lo que se logra una remoción del 55 al 65%. Además, se observa un efecto significativo debido a la concentración de carbonato de calcio, debido a la precipitación por la formación de  $\text{CdCO}_3$  ( $K_s = 5.2 \times 10^{-12}$ ), cuando el cadmio agregado es igual o menor que 0.645 mg/lit, con remociones del 50 al 70%.

## COMPORTAMIENTO DE CADMIO EN ENSAYOS CON AGUA



## COMPORTAMIENTO DE CADMIO EN ENSAYOS CON LIXIVIADO



## 7.2 RESULTADOS CON RESPECTO AL CROMO (Cr)

En los ensayos de metales disueltos en agua, existe una clara evidencia de precipitación de cromo (TABLA 7.5 y FIG 7.3), que aumenta conforme se agrega mayor cantidad de carbonatos y de cromo. Así, hay una remoción del 55 al 75% al agregar los primeros 200 mg/lt de  $\text{CaCO}_3$  cuando la concentración agregada de cromo es menor de 3.3 mg/lt, pues cuando aumenta a 4.4, se requiere agregar 600 mg/lt de  $\text{CaCO}_3$  para observar una precipitación del cromo del 50%. El agua utilizada también presenta un aporte de cromo de 0.36 mg/lt, lo que se observa en la prueba correspondiente a 0,0 mg/lt de cromo y  $\text{CaCO}_3$  (TABLA 7.5). Cabe mencionar que la concentración máxima permisible de cromo para agua potable es de 0.05 mg/lt.

TABLA 7.5 Concentración de Cromo soluble en agua

|  |     | <i>CARBONATOS inicial</i> |      |      |      |      |      |
|--|-----|---------------------------|------|------|------|------|------|
|  |     | mg/lt 0                   | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| C<br>R<br>O<br>M<br>O<br>i<br>n<br>i<br>c<br>i<br>a<br>l | 0.0 | 0.36                      | 0.16 | 0.12 | 0.10 | 0.06 | 0.04 |
|  | 1.1 | 1.24                      | 0.56 | 0.08 | 0.36 | 0.48 | 0.16 |
|  | 2.2 | 2.18                      | 0.52 | 0.38 | 0.92 | 1.04 | 0.48 |
|  | 3.3 | 3.10                      | 1.20 | 1.44 | 0.52 | 1.74 | 0.88 |
|  | 4.4 | 4.08                      | 4.02 | 4.14 | 1.20 | 1.94 | 1.34 |
|  | 5.5 | 5.24                      | 5.04 | 5.08 | 2.66 | 2.72 | 3.14 |

Al ponerse en contacto con los lixiviados, el ión cromo no presenta indicios de remoción, ni por adsorción ni por precipitación (TABLA 7.6 y FIG. 7.4). Por el contrario, al aumentar el contenido de carbonatos, aumenta la concentración de cromo soluble; es notorio que sin agregar cromo (0.0 mg de Cr inicial), el cromo soluble aumente casi en un 500% cuando se le agrega 1000 mg/lt de CaCO<sub>3</sub>.

TABLA 7.6 Concentración de Cromo soluble en lixiviado

|  |     | <i>CARBONATOS inicial</i> |      |      |      |      |      |
|--|-----|---------------------------|------|------|------|------|------|
|  |     | mg/lt 0                   | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| C<br>R<br>O<br>M<br>O<br>S<br>O<br>L<br>U<br>B<br>L<br>E | 0.0 | 0.30                      | 1.34 | 0.82 | 1.00 | 1.14 | 1.40 |
|  | 1.1 | 1.22                      | 3.12 | 1.72 | 1.94 | 2.18 | 2.26 |
|  | 2.2 | 1.86                      | 3.36 | 2.44 | 2.80 | 3.04 | 3.28 |
|  | 3.3 | 2.90                      | 3.32 | 3.26 | 3.72 | 3.80 | 3.76 |
|  | 4.4 | 4.02                      | 5.06 | 4.20 | 3.86 | 4.94 | 5.18 |
|  | 5.5 | 4.28                      | 4.70 | 5.14 | 5.32 | 5.88 | 5.84 |

En el análisis de varianza del cuadrado latino (TABLA 7.7) se encontró que existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos cuando los ensayos se realizaron con agua, ya que las  $F_{exp}$  fueron mayores que la  $F_{cal}$  de 2.71, es decir, desde el punto de vista estadístico la cantidad

agregada de cromo y de carbonatos intervienen en forma directa en el fenómeno de precipitación.

TABLA 7.7 Análisis de varianza con relación a la concentración de Cromo soluble en agua

| FV            | SC     | GL | CM    | RCM   |
|---------------|--------|----|-------|-------|
| Media General | 95.78  | 1  |       |       |
| Filas         | 65.57  | 5  | 13.12 | 20.24 |
| Columnas      | 13.28  | 5  | 2.66  | 4.10  |
| Residuos      | 12.86  | 20 | 0.65  |       |
| Total         | 187.49 | 31 |       |       |

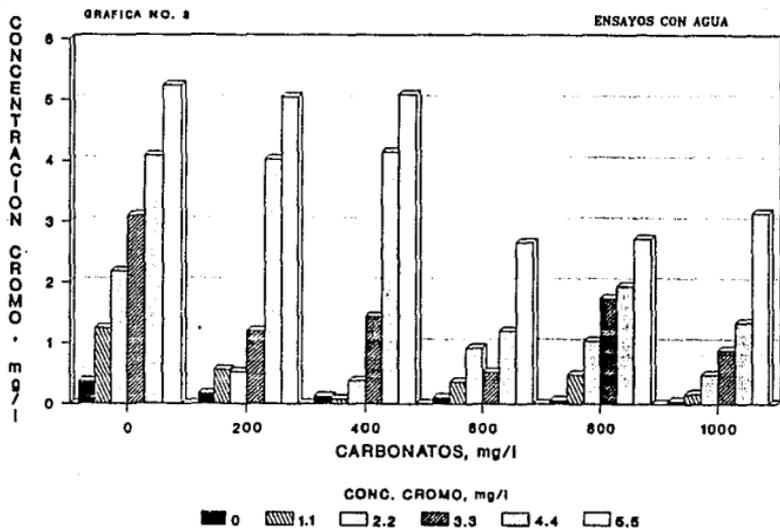
En el análisis de varianza de los ensayos en lixiviado (TABLA 7.8), se encontraron diferencias altamente significativas con respecto a las filas, que representa los cambios en concentración de cromo y con respecto a las columnas, que representa los cambios de carbonato. Sin embargo, los cambios de concentración de cromo se debieron a la cantidad que se agregó y a la liberación de cromo existente en los lixiviados y no a fenómenos de remoción como precipitación o adsorción, aumentos que fueron desde el 135% hasta el de casi 500% mencionado.

**TABLA 7.8 Análisis de varianza con relación a la concentración de Cromo soluble en lixiviado**

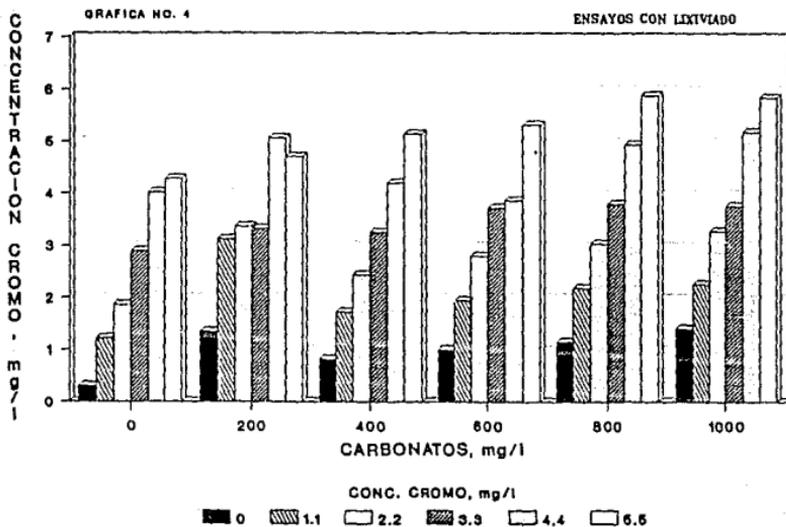
| FV            | SC     | GL | CM    | RCM    |
|---------------|--------|----|-------|--------|
| Media General | 363.03 | 1  |       |        |
| Filas         | 72.74  | 5  | 14.55 | 109.35 |
| Columnas      | 6.03   | 5  | 1.21  | 9.06   |
| Residuos      | 2.66   | 20 | 0.13  |        |
| Total         | 444.46 | 31 |       |        |

Como resultado de estos experimentos se encontró que el cromo es un contaminante potencial para las aguas subterráneas, pues se libera cuando se encuentra en lixiviados.

## COMPORTAMIENTO DE CROMO EN ENSAYOS CON AGUA



## COMPORTAMIENTO DE CROMO EN ENSAYOS CON LIXIVIADO



### 7.3 RESULTADOS CON RESPECTO AL MERCURIO (Hg)

Se puede observar en la TABLA 7.9, así como en la FIG 7.5, que el mercurio es muy poco soluble en agua y fácilmente se remueve con la adición de carbonatos.

TABLA 7.9 Concentración de Mercurio soluble en agua

| M<br>e<br>r<br>c<br>u<br>r<br>i<br>c<br>i<br>o<br>l<br>i<br>a<br>l | mg/l t | CARBONATOS inicial |      |       |         |      |      |
|--|--------|--------------------|------|-------|---------|------|------|
|  |        | 0                  | 200  | 400   | 600     | 800  | 1000 |
|  | 0.000  | 2.001              | 2.02 | 0.282 | 0.00    | 0.00 | 0.00 |
|  | 0.043  | 7.36               | 0.00 | 0.00  | 23.2    | 0.00 | 0.00 |
|  | 0.086  | 4.42               | 0.00 | 0.00  | 0.00    | 0.00 | 0.00 |
|  | 0.129  | 4.19               | 2.63 | 1.22  | 0.00    | 0.79 | 0.00 |
|  | 0.172  | 16.05              | 15.6 | 8.18  | 0.00469 | 4.42 | 7.05 |
|  | 0.215  | 6.283              | 15.5 | 15.00 | 6.05    | 7.28 | 2.63 |

NOTA: Los resultados deben multiplicarse por  $10^{-5}$

Esto mismo se observa en la TABLA 7.10 y en la FIG 7.6, por lo que considerando que la concentración máxima permisible de mercurio para agua potable es de 0.001 mg/l t, los resultados muestran que el mercurio no es un contaminante potencial cuando se presenta en este tipo de lixiviado.

TABLA 7.10 Concentración de Mercurio soluble en lixiviado

| M<br>e<br>r<br>c<br>u<br>r<br>i<br>o<br>l | mg/lt | CARBONATOS inicial |      |      |      |      |      |
|---|-------|--------------------|------|------|------|------|------|
|   |       | 0                  | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| 0.000                                     | 0.658 | 0.00               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.043                                     | 0.000 | 0.00               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.086                                     | 3.190 | 0.00               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.129                                     | 4.370 | 0.60               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.172                                     | 13.96 | 0.00               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.215                                     | 8.55  | 0.00               | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

NOTA: Los resultados deben multiplicarse por  $10^{-5}$

Debido a la baja solubilidad del mercurio, en el análisis de varianza del cuadrado latino (TABLA 7.11 y 7.12), no se encontró diferencias significativas entre los tratamientos.

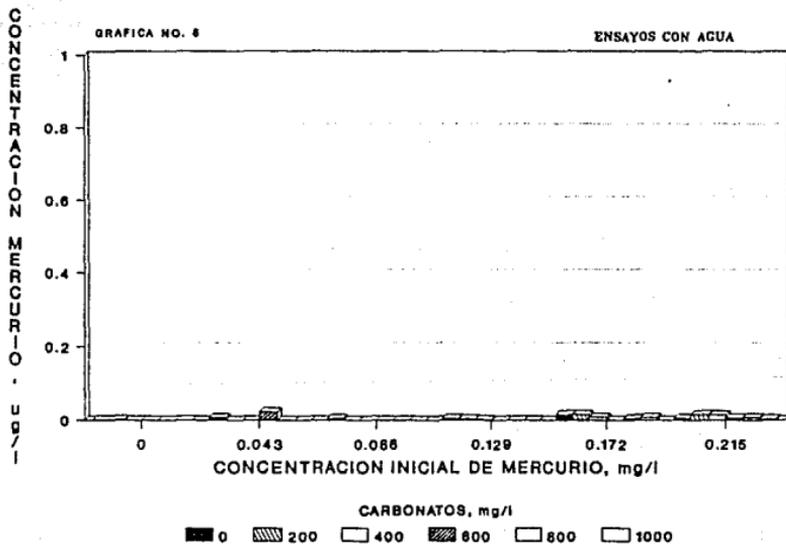
TABLA 7.11 Análisis de varianza con relación a la concentración de Mercurio soluble en agua

| FV            | SC<br>$\times 10^{-8}$ | GL | CM<br>$\times 10^{-8}$ | RCM  |
|---------------|------------------------|----|------------------------|------|
| Media General | 6.43                   | 1  |                        |      |
| Filas         | 4.34                   | 5  | 0.868                  | 2.55 |
| Columnas      | 1.26                   | 5  | 0.253                  | 0.74 |
| Residuos      | 6.81                   | 20 | 0.340                  |      |
| Total         | 18.84                  | 31 |                        |      |

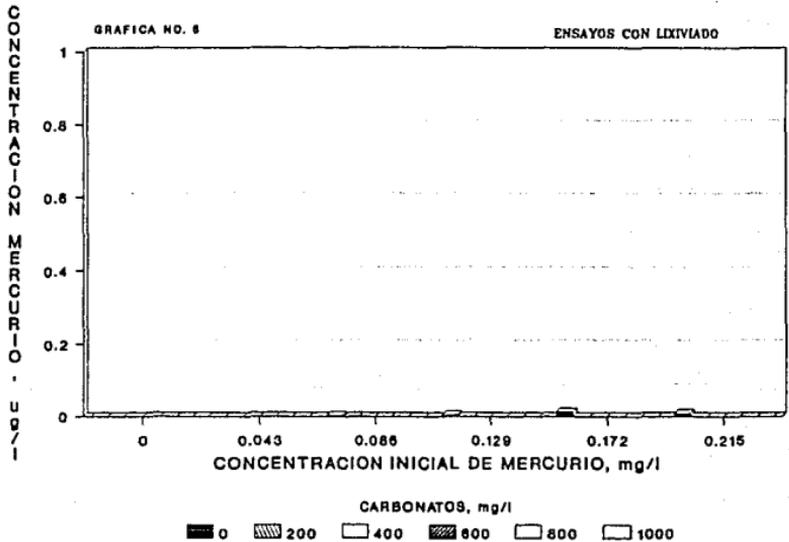
**TABLA 7.12** Análisis de varianza con relación a la concentración de Mercurio soluble en lixiviado

| FV            | SC<br>$\times 10^{-8}$ | GL | CM<br>$\times 10^{-9}$ | RCM  |
|---------------|------------------------|----|------------------------|------|
| Media General | 0.20                   | 1  |                        |      |
| Filas         | 0.23                   | 5  | 0.46                   | 0.38 |
| Columnas      | 0.00                   | 5  | 0.00                   | 0.00 |
| Residuos      | 2.48                   | 20 | 1.24                   |      |
| Total         | 2.91                   | 31 |                        |      |

# COMPORTAMIENTO DE MERCURIO EN ENSAYOS CON AGUA



## COMPORTAMIENTO DE MERCURIO EN ENSAYOS CON LIXIVIADO



#### 7.4 RESULTADOS CON RESPECTO AL PLOMO (Pb)

En el caso del plomo, es clara la evidencia de precipitación debida a la presencia de carbonatos (TABLA 7.13), llegando a eficiencias de remoción de casi el 100%, en particular cuando la cantidad agregada de  $\text{CaCO}_3$  es superior de 400 mg/lit (FIG 7.7), debido a la formación de  $\text{PbCO}_3$ , cuya constante de solubilidad es  $7.4 \times 10^{-14}$ . Nuevamente se encontró una cantidad de plomo en el agua (ensayo 0,0) superior al que establece la norma para agua potable como límite máximo, de 0.05 mg/lit.

TABLA 7.13 Concentración de Plomo soluble en agua

|   |        | CARBONATOS inicial |      |      |       |       |       |
|---|--------|--------------------|------|------|-------|-------|-------|
| P | mg/lit | 0                  | 200  | 400  | 600   | 800   | 1000  |
| l | 0.0    | 0.24               | 0.08 | 0.04 | 0.44  | 0.003 | 0.003 |
| o |        |                    |      |      |       |       |       |
| m | 1.1    | 0.36               | 0.08 | 0.04 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| o |        |                    |      |      |       |       |       |
| n | 2.2    | 0.58               | 0.08 | 0.02 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| l |        |                    |      |      |       |       |       |
| c | 3.3    | 1.00               | 0.14 | 0.86 | 0.003 | 0.1   | 0.003 |
| t |        |                    |      |      |       |       |       |
| a | 4.4    | 1.18               | 1.24 | 2.24 | 0.003 | 0.06  | 0.22  |
| l |        |                    |      |      |       |       |       |
|   | 5.5    | 1.56               | 1.46 | 1.56 | 0.06  | 0.18  | 0.003 |

Cuando el plomo se agregó al lixiviado, no se observó la respuesta esperada de precipitación (TABLA 7.14 y FIG 7.8).

En los ensayos en que se comenzó a agregar carbonatos y no se agregó plomo se encontró que se mantenía soluble una concentración cercana a 1 mg/lt, en forma constante, debido probablemente a que existía plomo adsorbido en los lixiviados, el cual se intercambiaba por el calcio de los carbonatos. Este efecto se mantuvo cuando se agregó 1.1 mg/lt de plomo, es decir, seguía constante una concentración de plomo soluble de 1 mg/lt, cualquiera que fuera la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que se agregaba. Cuando la cantidad de plomo fue superior de 2.2 mg/lt, se observó una remoción del plomo soluble, independientemente del contenido de carbonatos, la cual se atribuye a un efecto de adsorción en la materia orgánica al aumentar la competencia del plomo con los iones de calcio.

TABLA 7.14 Concentración de Plomo soluble en lixiviado

|          |              | <i>CARBONATOS inicial</i> |      |      |      |      |      |
|----------|--------------|---------------------------|------|------|------|------|------|
| <i>P</i> | <i>mg/lt</i> | 0                         | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| <i>l</i> | 0.0          | 0.16                      | 1.04 | 1.04 | 0.88 | 0.80 | 1.06 |
| <i>o</i> |              |                           |      |      |      |      |      |
| <i>m</i> | 1.1          | 0.30                      | 1.08 | 1.18 | 1.10 | 1.14 | 1.24 |
| <i>i</i> |              |                           |      |      |      |      |      |
| <i>o</i> | 2.2          | 0.46                      | 0.18 | 0.20 | 0.10 | 0.26 | 0.12 |
| <i>n</i> |              |                           |      |      |      |      |      |
| <i>i</i> | 3.3          | 0.30                      | 0.46 | 0.38 | 0.36 | 0.36 | 0.30 |
| <i>c</i> |              |                           |      |      |      |      |      |
| <i>t</i> | 4.4          | 0.48                      | 0.62 | 0.58 | 0.54 | 0.54 | 0.66 |
| <i>a</i> |              |                           |      |      |      |      |      |
| <i>l</i> | 5.5          | 0.70                      | 0.8  | 0.66 | 0.80 | 0.70 | 0.38 |

Este comportamiento del plomo hace que no se lo considere como un contaminante potencial, ya que su solubilidad no rebasó 1.24 mg/lit y en la NTE-CRP-001/88, que establece los límites máximos para residuos peligrosos, se ha establecido 5 mg/lit de Pb.

En el análisis de varianza de los ensayos con agua (Tabla 7.15) se encontró que existe significancia en cuanto a las filas, que representa los cambios de concentración de plomo y en cuanto a las columnas, que representa los cambios de carbonato.

TABLA 7.15 Análisis de varianza con relación a la concentración de Plomo soluble en agua

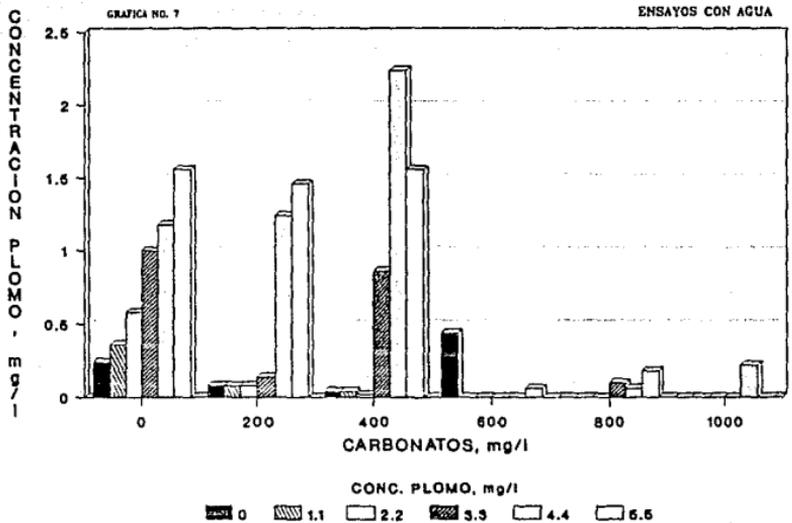
| FV            | SC    | GL | CM   | RCM  |
|---------------|-------|----|------|------|
| Media General | 5.30  | 1  |      |      |
| Filas         | 3.59  | 5  | 0.72 | 3.20 |
| Columnas      | 4.16  | 5  | 0.83 | 3.70 |
| Residuos      | 4.49  | 20 |      |      |
| Total         | 17.54 | 31 |      |      |

En cambio, en el análisis de varianza de los ensayos de lixiviado (Tabla 7.16), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

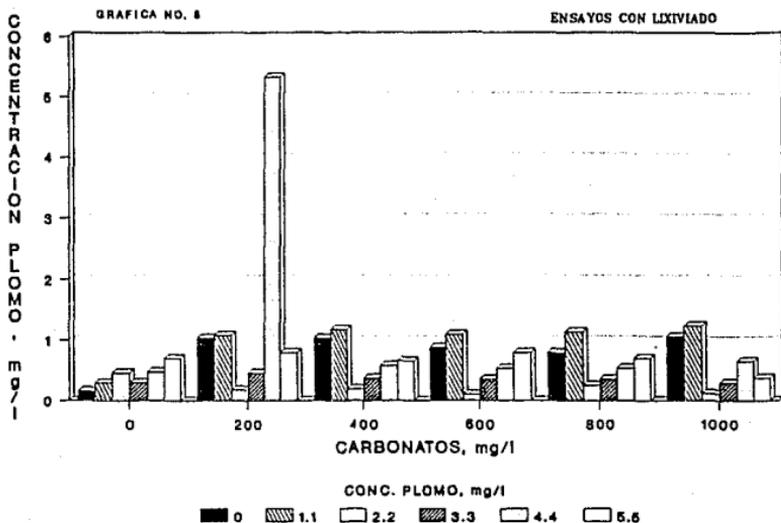
TABLA 7.16 Análisis de varianza con relación a la concentración de Plomo soluble en lixiviado

| FV            | SC    | GL | CM   | RCM  |
|---------------|-------|----|------|------|
| Media General | 20.31 | 1  |      |      |
| Filas         | 5.22  | 5  | 1.04 | 1.29 |
| Columnas      | 4.16  | 5  | 0.83 | 1.03 |
| Residuos      | 16.07 | 20 | 0.80 |      |
| Total         | 45.76 | 31 |      |      |

## COMPORTAMIENTO DE PLOMO EN ENSAYOS CON AGUA



## COMPORTAMIENTO DE PLOMO EN ENSAYOS CON LIXIVIADO



## 7.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) Y pH

La medición de la conductividad (CE) fue un factor que permitió seguir el comportamiento de los iones solubles en conjunto y distinguir cuando una porción importante de los metales se removía por precipitación. El estado soluble o precipitado, como se ha estudiado ampliamente, se encuentra estrechamente relacionado con el pH del sistema, por lo que el análisis del comportamiento de la conductividad se ha asociado a los valores de pH encontrados.

En la FIG 7.9 y en la TABLA 7.17 se observa que, en general, para una misma cantidad de carbonatos, al aumentar la cantidad de metales, la conductividad se incrementa, pero que al aumentar el contenido de carbonatos, la conductividad disminuye, con excepción de las pruebas a las que no se le agregó metal (0,i), donde la conductividad aumentó con el contenido de carbonatos. Este comportamiento indica que la mayor porción de los iones metálicos que se agregó al agua reaccionaron con los carbonatos formando sales insolubles, lo que favoreció que disminuyera la conductividad y que, cuando no hubo suficiente cantidad de metales, la conductividad aumentó con la cantidad de carbonatos que se mantuvo soluble, aunque cabe señalar que los valores alcanzados de conductividad en las pruebas (0,i) son mucho menores que los valores obtenidos cuando se agregaron metales al agua.

TABLA 7.17 Comportamiento de la conductividad en ensayos con agua.

|            |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CE (mmhos) | 0.026 | 0.060 | 0.070 | 0.070 | 0.080 | 0.090 |
| T (°C)     | 17.2  | 17.8  | 18.3  | 18.2  | 20.9  | 19.9  |
| CE (mmhos) | 0.380 | 0.150 | 0.080 | 0.160 | 0.170 | 0.190 |
| T (°C)     | 15.7  | 17.4  | 17.5  | 18.9  | 21.1  | 20.0  |
| CE (mmhos) | 0.810 | 0.170 | 0.150 | 0.260 | 0.290 | 0.280 |
| T (°C)     | 15.8  | 17.4  | 17.7  | 19.0  | 21.0  | 19.9  |
| CE (mmhos) | 1.210 | 0.260 | 0.260 | 0.370 | 0.410 | 0.410 |
| T (°C)     | 16.5  | 17.4  | 22.0  | 18.5  | 21.2  | 20.2  |
| CE (mmhos) | 1.650 | 1.140 | 0.540 | 0.470 | 0.520 | 0.790 |
| T (°C)     | 16.9  | 17.8  | 18.1  | 19.3  | 20.2  | 20.5  |
| CE (mmhos) | 3.700 | 1.400 | 1.280 | 0.640 | 0.630 | 0.640 |
| T (°C)     | 17.4  | 18.5  | 18.3  | 20.5  | 20.1  | 21.1  |

Las reacciones de metal con carbonato estuvieron favorecidas por el pH obtenido en las pruebas (TABLA 7.17). Debido a que los metales provenían de estándares, el pH en el que se encontraban disueltos era de acidez menor de 2. Al mezclarlos sólo con agua se alcanzaban pH de 2.11 a 3.02, que favorecía que los iones metálicos se mantuvieran

solubles. Al aumentar los carbonatos, el pH aumentó hasta 7.77, lo que permitió la formación de los precipitados mencionados en el párrafo anterior.

TABLA 7.18 Determinación de pH en ensayos con agua

| 0% metal   |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| pH         | 6.85 | 7.68 | 7.85 | 7.67 | 7.21 | 7.42 |
| 20% metal  |      |      |      |      |      |      |
| pH         | 3.02 | 6.51 | 7.34 | 7.77 | 6.33 | 6.80 |
| 40% metal  |      |      |      |      |      |      |
| pH         | 2.87 | 6.94 | 6.75 | 6.75 | 6.24 | 6.00 |
| 60% metal  |      |      |      |      |      |      |
| pH         | 2.63 | 5.86 | 5.87 | 6.33 | 5.79 | 6.16 |
| 80% metal  |      |      |      |      |      |      |
| pH         | 2.42 | 2.66 | 5.03 | 6.56 | 5.78 | 4.56 |
| 100% metal |      |      |      |      |      |      |
| pH         | 2.11 | 2.58 | 3.53 | 4.67 | 5.42 | 6.55 |

En los ensayos con lixiviados, los resultados fueron totalmente diferentes (FIG 7.10 y TABLA 7.19) Si con agua, los valores de CE fueron inferiores a 1.7, con excepción del

ensayo 100% metales, 0 carbonato (100,0) cuya conductividad fue de 3.7, los valores con lixiviados van de 4.4 a 17 mmhos/cm. En términos generales, la conductividad aumenta con la concentración de carbonatos, independientemente de la cantidad de metales que se agrega, resultados diferentes se encontraron sólo en las pruebas (1,200).

TABLA 7.19 Comportamiento de la conductividad en ensayos con lixiviado.

|                     |               |                |                 |                |                |                |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.900<br>13.1 | 15.600<br>14.6 | 11.000<br>115.9 | 12.100<br>16.6 | 14.200<br>18.0 | 16.500<br>20.2 |
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.500<br>12.4 | 24.000<br>14.3 | 9.900<br>15.0   | 11.000<br>15.5 | 13.000<br>17.6 | 15.000<br>20.0 |
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.440<br>12.6 | 16.000<br>14.6 | 10.000<br>14.8  | 11.100<br>16.0 | 13.600<br>17.3 | 16.000<br>19.9 |
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.300<br>13.6 | 8.000<br>15.1  | 9.000<br>15.6   | 10.800<br>16.5 | 14.600<br>19.0 | 16.000<br>20.0 |
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.600<br>13.6 | 15.000<br>16.2 | 10.000<br>16.5  | 11.100<br>16.7 | 13.200<br>19.0 | 16.500<br>20.6 |
| CE(mmhos)<br>T (°C) | 4.400<br>14.6 | 9.000<br>16.9  | 9.100<br>17.4   | 10.800<br>19.2 | 14.600<br>19.6 | 17.000<br>21.1 |

Por otro lado, el pH se mantuvo casi constante, con valores entre 8.46 y 9.03, independientemente de la cantidad de metales y de carbonatos que se agregó (TABLA 7.20).

TABLA 7.20 Determinación de pH en ensayos con lixiviados

0% metal

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.46 | 8.66 | 8.94 | 8.70 | 8.79 | 8.63 |
|----|------|------|------|------|------|------|

20% metal

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.58 | 8.81 | 8.76 | 8.86 | 8.66 | 8.65 |
|----|------|------|------|------|------|------|

40% metal

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.82 | 8.85 | 8.77 | 8.70 | 8.90 | 8.66 |
|----|------|------|------|------|------|------|

60% metal

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.75 | 8.65 | 8.81 | 8.67 | 8.66 | 8.68 |
|----|------|------|------|------|------|------|

80% metal

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.64 | 8.65 | 8.88 | 9.08 | 8.77 | 8.66 |
|----|------|------|------|------|------|------|

100% metal

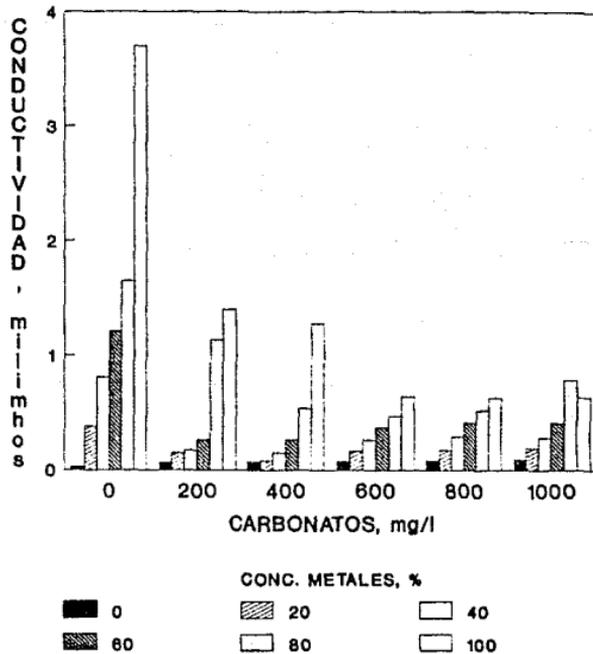
|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8.46 | 8.58 | 8.84 | 8.97 | 8.85 | 8.63 |
|----|------|------|------|------|------|------|

Esto se explica porque en los lixiviados el contenido de sólidos disueltos es muy grande, lo que favorece los valores de conductividad altos. Al agregar carbonatos, aumentó el

contenido de sólidos. Se puede pensar, como en el caso del plomo, que hubo intercambio de  $\text{Ca}^{2+}$  por otros iones que favorecieron el aumento de la conductividad, sin embargo, al comparar con los resultados de los iones individuales, no existe un aumento generalizado de los metales solubles con el aumento de los carbonatos, por lo que esta segunda hipótesis es descartada. Una tercera hipótesis, similar a la primera sugiere que los lixiviados adsorben preferentemente cationes, en este caso a los metales, pero dejan libres los aniones, lo que es congruente con los resultados de metales individuales, la respuesta de conductividad en lixiviados y al hecho de que en los ensayos sin carbonatos (I,0), la conductividad se mantuviera casi constante, con valores de 4.3 a 4.9 mmhos/cm.

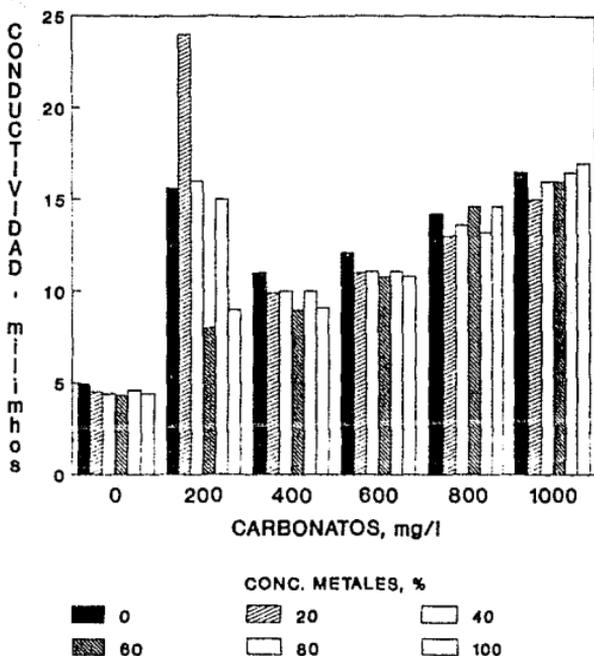
# COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN ENSAYOS CON AGUA

GRAFICA NUM. 9



## COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN ENSAYOS CON LIXIVIADO

GRAFICA NUM. 10



## 7.6 RESULTADOS REFERENTES AL CARBONO

En estos resultados (TABLAS 7.21, 7.22 y 7.23) sólo se observa el efecto del aumento de carbonatos en el aumento de carbono total y carbono orgánico en los ensayos con lixiviados. Los resultados en agua no son claros, aunque se alcanza a distinguir una tendencia a aumentar el contenido de carbono conforme aumentan los carbonatos. Todos los resultados están reportados en partes por millón de carbono.

TABLA 7.21 CARBON ORGÁNICO TOTAL

### SISTEMA LIXIVIADO

#### CARBONATOS (PPM)

| (%)              | 0   | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|
| M <sub>0</sub>   | 745 | 1170 | 1975 | 2600 | 2750 | 3414 |
| E <sub>20</sub>  | 681 | 1319 | 1875 | 2275 | 2700 | 3103 |
| T <sub>40</sub>  | 702 | 978  | 1725 | 2350 | 2525 | 3207 |
| A <sub>60</sub>  | 723 | 1148 | 1925 | 2475 | 2625 | 3440 |
| L <sub>80</sub>  | 702 | 1128 | 1800 | 2050 | 2575 | 3414 |
| E <sub>100</sub> | 681 | 1106 | 1575 | 2075 | 2650 | 3078 |
| S                |     |      |      |      |      |      |

## SISTEMA AGUA

**CARBONATOS (PPM)**

| (%)                     | 0  | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|------|
| <i>M</i> <sub>0</sub>   | 36 | 129 | 44  | 124 | 98  | 253  |
| <i>E</i> <sub>20</sub>  | 31 | 59  | 59  | 166 | 84  | 70   |
| <i>T</i> <sub>40</sub>  | 26 | 31  | 59  | 54  | 54  | 91   |
| <i>A</i> <sub>60</sub>  | 26 | 41  | 72  | 119 | 36  | 41   |
| <i>L</i> <sub>80</sub>  | 36 | 62  | 52  | 70  | 49  | 49   |
| <i>E</i> <sub>100</sub> | 36 | 44  | 62  | 44  | 54  | 47   |
| <i>S</i>                |    |     |     |     |     |      |

TABLA 7.22 CARBONO INORGÁNICO

## SISTEMA LIXIVIADO

**CARBONATOS (PPM)**

| (%)                     | 0  | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|------|
| <i>M</i> <sub>0</sub>   | 34 | 112 | 44  | 118 | 100 | 264  |
| <i>E</i> <sub>20</sub>  | 29 | 61  | 61  | 166 | 34  | 68   |
| <i>T</i> <sub>40</sub>  | 28 | 31  | 59  | 58  | 54  | 95   |
| <i>A</i> <sub>60</sub>  | 27 | 41  | 70  | 125 | 36  | 41   |
| <i>L</i> <sub>80</sub>  | 36 | 60  | 51  | 70  | 49  | 50   |
| <i>E</i> <sub>100</sub> | 35 | 47  | 62  | 44  | 57  | 48   |
| <i>S</i>                |    |     |     |     |     |      |

SISTEMA AGUA

CARBONATOS (PPM)

| (%)              | 0  | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|------------------|----|-----|-----|-----|-----|------|
| M <sub>0</sub>   | 34 | 125 | 44  | 120 | 97  | 212  |
| E <sub>20</sub>  | 30 | 58  | 59  | 112 | 34  | 74   |
| T <sub>40</sub>  | 26 | 27  | 56  | 52  | 51  | 88   |
| A <sub>60</sub>  | 25 | 40  | 72  | 111 | 29  | 36   |
| L <sub>80</sub>  | 32 | 62  | 51  | 72  | 45  | 48   |
| E <sub>100</sub> | 34 | 45  | 61  | 43  | 50  | 47   |
| S                |    |     |     |     |     |      |

TABLA 7.23 CARBONO ORGÁNICO

SISTEMA LIXIVIADO

CARBONATOS (PPM)

| (%)              | 0    | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| M <sub>0</sub>   | 711  | 1058 | 1931 | 2482 | 2650 | 2150 |
| E <sub>20</sub>  | 652  | 1258 | 1814 | 2109 | 2666 | 3035 |
| T <sub>40</sub>  | 674  | 947  | 1666 | 2292 | 3112 | 696  |
| A <sub>60</sub>  | 1107 | 1855 | 2350 | 2589 | 3399 | 3166 |
| L <sub>80</sub>  | 666  | 1068 | 1749 | 1980 | 2526 | 3364 |
| E <sub>100</sub> | 646  | 1071 | 1513 | 2031 | 2593 | 3030 |
| S                |      |      |      |      |      |      |

## SISTEMA AGUA

**CARBONATOS (PPM)**

| (%)                    | 0 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|------------------------|---|-----|-----|-----|-----|------|
| <b>M<sub>0</sub></b>   | 2 | 4   | 0   | 4   | 1   | 41   |
| <b>E<sub>20</sub></b>  | 1 | 1   | 0   | 24  | 0   | 0    |
| <b>T<sub>40</sub></b>  | 0 | 4   | 3   | 2   | 3   | 3    |
| <b>A<sub>60</sub></b>  | 1 | 1   | 0   | 8   | 7   | 5    |
| <b>L<sub>80</sub></b>  | 4 | 0   | 1   | 0   | 4   | 1    |
| <b>E<sub>100</sub></b> | 2 | 0   | 1   | 1   | 4   | 0    |
| <b>S</b>               |   |     |     |     |     |      |

Los resultados se obtuvieron por diferencia entre el carbono total y el inorgánico.

## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

## 8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los residuos sólidos ocasionan graves problemas en la Ciudad de México, uno de los principales es la generación de lixiviados que llegan a contaminar las aguas subterráneas, utilizadas para consumo como agua potable.

Con los resultados obtenidos experimentalmente y con las consideraciones del lugar de estudio, ex-tiradero Santa Cruz Meyehualco, a continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta primera parte del estudio.

### 8.1 CONCLUSIONES

- Los lixiviados de la zona de estudio contienen metales tóxicos, sin embargo, no se clasifica como residuo peligroso por metales ya que éstos se encontraron en concentraciones inferiores del límite máximo permisible para su disposición en rellenos sanitarios. La presencia de metales se debe a que en la Ciudad de México no existe una separación eficiente de los residuos sólidos municipales de los industriales, ni se cuentan con sitios de disposición especiales para residuos industriales.

Además, se encontró que los lixiviados del ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco tienen un pH básico, de 8.5 en promedio, lo cual no es común, ya que los lixiviados suelen tener pH de 5.4 en promedio.

- El lixiviado generado depende de la precipitación pluvial que se presenta en cada zona, del material de desecho que se esté disponiendo, de la eficiencia de la operación y de la calidad del material de cubierta.

- El cadmio y el mercurio pueden considerarse como elementos contaminantes no potenciales, ya que pueden ser removidos principalmente por adsorción en la materia orgánica.

- El contacto de carbonatos con el lixiviado hace que el plomo se solubilice en una concentración promedio de 1 mg/lt. Sin embargo, al contener una cantidad de plomo mayor de 2 mg/lt, se precipita entre el 70 y el 90% del plomo, el cual se mantiene en concentraciones inferiores de 1 mg/lt. Esto permite que no se le considere peligroso en términos de la norma de residuos peligrosos NTE-CRP-001/88, cuyo límite máximo es de 5 mg/lt de plomo.

- En cambio, el cromo resulta ser un elemento contaminante, ya que se mantiene soluble en el lixiviado, aún en presencia de carbonatos, esto lo posibilita a transportarse fácilmente

hacia las aguas subterráneas. La concentración encontrada en los lixiviados de la zona de estudio permite clasificarlo como no peligroso por el cromo, sin embargo, a diferencia de los otros metales, un aumento en residuos sólidos que contengan cromo puede hacer que el lixiviado se clasifique como residuo peligroso.

- El comportamiento de los metales se encuentra muy relacionado con el pH básico del lixiviado, el cual además presenta un efecto amortiguador cuando se le agrega ácido. Así se observa que el cadmio, mercurio y plomo tienden al estado sólido a pH básicos, mientras que el cromo tiende a estar disuelto.

## 8.2 RECOMENDACIONES

### 8.2.1 RECOMENDACIONES GENERALES

- Es sumamente importante lograr la separación de los desechos industriales, preferentemente por giro, de forma que puedan tener un método adecuado de tratamiento previo a su disposición.
- Se recomienda que los rellenos sanitarios posean un colector de lixiviados para así poder tratarlos y evitar en cierta manera el transporte de contaminantes hacia las aguas subterráneas.
- Cuando los residuos sólidos tienen un alto contenido de mercurio y/o cadmio, el método de remoción recomendable de estos metales en los lixiviados es por adsorción, por ejemplo, puede estudiarse la adsorción en carbón activado.
- Cuando los residuos sólidos tienen un alto contenido de plomo, puede estudiarse la remoción por precipitación química, en particular si el contenido de materia orgánica es bajo, o puede reducirse primero mediante otro método, por ejemplo, mediante oxidación.

- Los residuos sólidos con alto contenido de cromo deben ser separados y tratados mediante otro proceso, como puede ser la reducción química.

- En la zona de estudio, debido a que se trata de un tiradero de basura clausurado, que actualmente está generando lixiviados en una región con gran extracción de agua subterránea destinada al consumo como agua potable, se recomienda la extracción de lixiviados y su tratamiento, para disminuir, en lo posible, su transporte hacia las aguas subterráneas.

- Deben realizarse estudios de transporte de lixiviado en columnas empacadas con suelo, para conocer la capacidad de remoción del suelo respecto a metales, cuando éstos se encuentran en una matriz tan compleja como son los lixiviados y predecir la contaminación que puede llegar a las aguas subterráneas debidas a los depósitos de residuos sólidos.

## 8.2.2 RECOMENDACIONES AL TRABAJO EXPERIMENTAL

- A lo largo del desarrollo experimental, se presentaron serias dificultades con la solubilidad de ciertas sales metálicas, por lo que se recomienda, consultar previamente las constantes de solubilidad en el agua o en su defecto utilizar soluciones estándares del metal en forma soluble.
- El uso del Espectrofotómetro de Adsorción Atómica requiere de cierto conocimiento y habilidad para su manejo, por lo que se requiere de una persona capacitada para garantizar la calidad de resultados.
- Se recomienda que las muestras por analizar se encuentren entre los límites máximos y mínimos de lectura para el Espectrofotómetro de Adsorción Atómica.
- Se recomienda utilizar un antiespumante para evitar la producción de espuma en el lixiviado, ya que esta no permite tener buenas lecturas en el aparato.
- Se recomienda trabajar con todo el equipo de protección necesario en el laboratorio (bata, guantes, goggles y tapabocas), ya que los reactivos utilizados poseen una alta toxicidad.

## APENDICES

## APENDICE 1

### PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN MADRE DE ELEMENTOS TÓXICOS.

La solución madre de elementos tóxicos se preparó a partir de una solución estándar de cada uno de los elementos para absorción atómica de 1000 ppm, siguiéndose el siguiente esquema:

- 1) Se tomaron volúmenes diferentes de cada de las soluciones estandares, dichos volúmenes se reportan en la siguiente tabla:

| Elemento | Volumen (ml) |
|----------|--------------|
| Arsénico | 50           |
| Bario    | 10           |
| Cadmio   | 10           |
| Cromo    | 50           |
| Mercurio | 2            |
| Plata    | 50           |
| Plomo    | 50           |
| Selenio  | 10           |
| TOTAL    | 232          |

2) Con el volumen total y considerando que 1 ml de solución estándar es igual a 1 mg de metal, se procedió a realizar el siguiente cálculo:

*Ejemplo: Para el caso del Cr.*

$$\frac{50 \text{ mg}}{232 \text{ ml}} = 0.22 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$$

A continuación se reportan los cálculos de las concentraciones para los demás elementos.

| Elemento | Concentración<br>(mg/ml) |
|----------|--------------------------|
| Arsénico | 0.22                     |
| Bario    | 0.043                    |
| Cadmio   | 0.043                    |
| Cromo    | 0.22                     |
| Mercurio | 0.0086                   |
| Plata    | 0.22                     |
| Plomo    | 0.22                     |
| Selenio  | 0.43                     |

3) Se tomó un volumen de 2.5 ml de la solución estándar preparada y se aforó con 50 ml de agua o lixiviado y 50 ml de solución de carbonato de calcio en agua o lixiviado según sea el caso, esta nueva solución tiene la concentración máxima permisible para residuos peligrosos y forma el 100% de metal en el cuadrado latino.

*Ejemplo:*

*Para el caso del Cr.*

$$0.22 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \times 2.5 \text{ ml} = 0.55 \text{ mg}$$

$$\frac{0.55 \text{ mg}}{100 \text{ ml}} = 0.0055 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$$

$$0.0055 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} = 5.5 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ (ppm)}$$

Esta última concentración corresponde al límite máximo permisible para residuos peligrosos.

## APENDICE 2

### TÉCNICAS ANALÍTICAS EXPERIMENTALES.

Actualmente, con las técnicas analíticas disponibles, se pueden hacer determinaciones de elementos presentes en lixiviados tales como: arsénico, bario, calcio, cromo, fierro, magnesio, manganeso, mercurio, plomo, potasio, etc. Las concentraciones de estos elementos se deben conocer específicamente debido a el impacto potencial que tienen sobre la salud, así como otros efectos no deseables.

Entre las pruebas más comunes que se llevan a cabo, se encuentran pruebas que se basan en la medida de factores asociados, es decir, a menudo es imposible o poco práctico, medir las características de interés primordial del lixiviado, pero se pueden medir otros parámetros que se pueden asociar a ellas. Estas mediciones algunas veces se usan para aplicarles un factor de correlación determinado, con el fin de calcular una concentración estimada para el constituyente de interés. Dentro de estas pruebas están:

- a) Determinación de la conductividad para estimar los sólidos disueltos en el lixiviado.
- b) El uso del contenido de carbono orgánico total (COT), para correlacionarlo con la demanda bioquímica de Oxígeno

(DBO), la demanda de carbono orgánico (DCO) y así estimar la cantidad de materia orgánica.

c) Espectrofotometría de absorción atómica.

d) Determinación del pH con la finalidad de predecir la solubilidad de elementos tóxicos disueltos en lixiviados y así mismo, el comportamiento del sistema carbonato-bicarbonato.

e) Determinación del potencial.

## FACTORES FISICOQUÍMICOS Y PRUEBAS ANÁLITICAS.

### TEMPERATURA.

La temperatura es una propiedad termodinámica que determina la energía cinética molecular promedio. La temperatura influye en gran proporción en las propiedades físicas, químicas y biológicas, por lo que es muy importante hacer una determinación precisa de ella. La temperatura alta intensifica el desarrollo de microorganismos y suele aumentar los problemas de olor y color.

## CONDUCTIVIDAD.

Este parámetro es importante, ya que pone de manifiesto la presencia de iones, su concentración, y su movilidad. El valor de la conductividad se puede relacionar con la variación en otros parámetros, como es el de los sólidos disueltos. La conductividad es una expresión numérica que indica la habilidad de una solución acuosa para transmitir la corriente eléctrica.

La determinación de la conductividad generalmente se realiza midiendo la resistencia o la conductancia de una solución.

## pH.

El potencial de hidrógeno nos indica el grado de acidez o alcalinidad del lixiviado, o la actividad del ión hidrógeno ( $H^+$ ).

## CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT).

Refleja la concentración de sustancias orgánicas naturales (sustancias húmicas), lo cual varía de acuerdo con las estaciones. Salvo en circunstancias especiales, no se detectan cambios importantes en la concentración de

sustancias potencialmente peligrosas y una sola medición no tiene ninguna trascendencia como factor relacionado con la salud. La medición del COT puede ser útil para otros propósitos pero, si se usara este valor para confirmar que no existen cantidades excesivas de ningún compuesto, habría que reducir el COT a concentraciones muy por debajo de los límites de detección del equipo actual.

### ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

La espectrofotometría de absorción atómica es un método de análisis relativamente nuevo, pero es de gran importancia e interés en la ingeniería ambiental debido a su versatilidad para medir cantidades traza de la mayoría de los elementos en el agua. Elementos tales como el cobre, hierro, magnesio, níquel y zinc pueden ser determinados con gran exactitud en un pequeño rango de concentración (mg/l).

Un sistema de absorción atómica consiste en una unidad de flama y un prisma. El sistema de absorción atómica tiene una fuente de luz que emite una luz intensa estableciendo una longitud de onda particular. Cada elemento tiene longitudes de onda características. La fuente de luz con la longitud de onda característica del elemento que ha de ser determinado se dirige directamente hacia la flama y la medida de su intensidad se realiza con la longitud de onda particular del

elemento. El decremento observado en la intensidad con la fuente de luz y el elemento a determinarse, da una medida de la concentración del elemento.

Una desventaja de este método es que una diferente fuente de luz debe ser usada para cada elemento.

La absorción depende de la presencia de átomos libres sin excitar en la flama, y éstos se encuentran en mayor abundancia que los átomos excitados.

#### SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE MUESTREO.

Se recopiló información acerca de las técnicas de muestreo y preservación de muestras. Se tomó como base el Manual de Técnicas de Muestreo de Aguas y Determinaciones en el Campo (SARH, 1982).

Para la obtención de datos que representen las características del lixiviado, es necesario un muestreo adecuado del sistema que se desea utilizar. Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora de muestreo y tener el volumen suficiente para efectuar en él, las determinaciones correspondientes.

## PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Las técnicas de preservación retardan durante cierto tiempo los cambios químicos y biológicos que se producen después de que se toma la muestra. En general mientras más corto sea el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y su análisis, más confiables serán los resultados obtenidos.

Para la preservación de las muestras se utilizaron envases de plástico enjuagados con una solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 1:1. Las muestras recolectadas se filtraron y se diluyeron con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ) hasta un pH menor de 2, posteriormente se almacenaron en un cuarto frío a una temperatura de 5 °C.

## MÉTODO ESTADÍSTICO.

### CUADRADO LATINO.

Fisher puso de relieve que siempre es posible eliminar más de una variable de bloque utilizando cuidadosamente diseños equilibrados. La primera estructura de este tipo fué el *cuadrado latino*.

Un cuadrado latino es una estructura  $k \times k$  que permite estudiar  $k$  tratamientos simultáneamente con dos variables de bloques. Las variables de bloques en el diseño en cuadrado latino pueden ser de la misma naturaleza o de naturaleza diferente.

La disposición del cuadrado latino se muestra en la figura 5.7.1 y posee la propiedad de que cada fila o cada columna recibe cada tratamiento una sola vez.

Es importante que éste diseño estadístico esté aleatorizado, lo cual se logra asignando aleatoriamente las filas y las columnas.

|       |     | Columnas |   |   |   |
|-------|-----|----------|---|---|---|
| Filas | I   | A        | B | D | C |
|       | II  | D        | C | A | B |
|       | III | B        | D | C | A |
|       | IV  | C        | A | B | D |

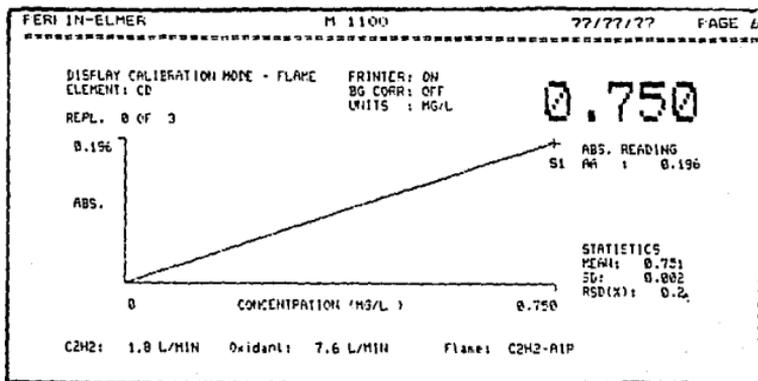
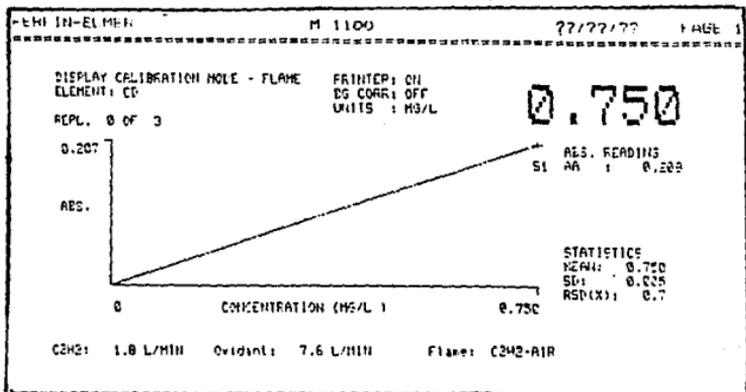
FIGURA 5.7.1 Cuadrado latino  $k \times k$

La tabla del análisis de la varianza para el diseño de cuadrado latino nos proporciona la siguiente información: suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrado medio, valor esperado del cuadrado medio y relación de cuadrados medios de las filas, columnas, tratamientos y residuos.

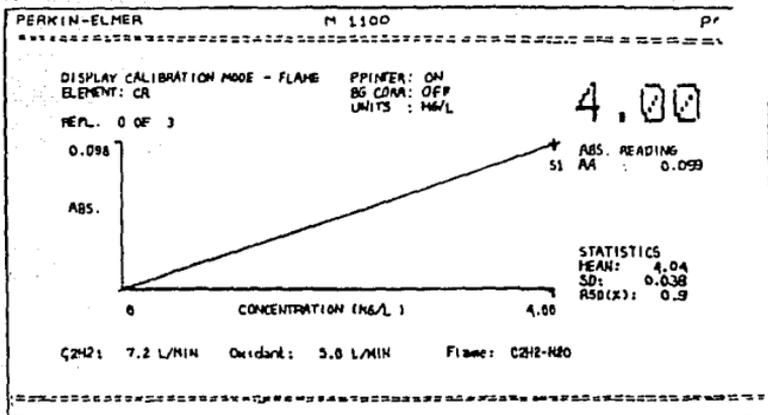
El número de grados de libertad de las filas, columnas y tratamientos están determinados por la siguiente expresión:  $k-1$ . Y el número de grados de libertad de los residuos están determinados por:  $(k-1)(k-2)$ .

GRÁFICAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL ESPECTOFOTÓMETRO  
DE ADSORCIÓN ATÓMICA.

CADMIO



# CROMO



# MERCURIO

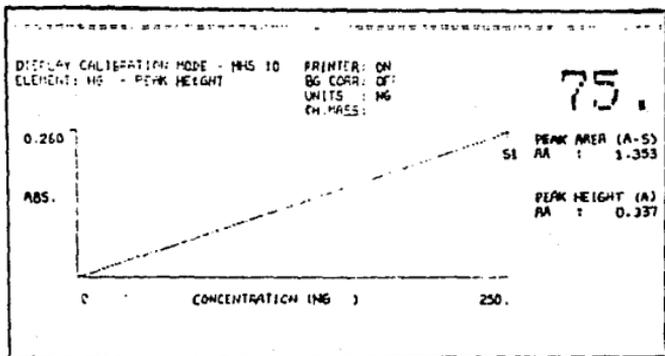




TABLA PARA LOS VALORES DE LA PRUEBA F

| Valor de $F_{\alpha}$ número de grados de independencia para la variación mayor o del factor |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $F_{\alpha}$   | 3     |       | 4     |       | 7     |       | 8     |       |
|  | 0.05  | 0.01  | 0.05  | 0.01  | 0.05  | 0.01  | 0.05  | 0.01  |
| 1  | 230   | 5.764 | 234   | 5.819 | 237   | 5.928 | 239   | 5.981 |
| 2  | 19.10 | 99.30 | 19.33 | 99.33 | 19.36 | 99.34 | 19.37 | 99.36 |
| 3  | 9.31  | 28.24 | 9.34  | 27.91 | 9.38  | 27.67 | 9.41  | 27.49 |
| 4  | 6.26  | 13.32 | 6.16  | 15.21 | 6.09  | 14.98 | 6.04  | 14.80 |
| 5  | 5.05  | 10.97 | 4.95  | 10.67 | 4.88  | 10.45 | 4.82  | 10.27 |
| 6  | 4.39  | 8.75  | 4.28  | 8.47  | 4.21  | 8.26  | 4.15  | 8.10  |
| 7  | 3.97  | 7.46  | 3.87  | 7.19  | 3.79  | 7.00  | 3.73  | 6.84  |
| 8  | 3.69  | 6.63  | 3.58  | 6.37  | 3.50  | 6.19  | 3.44  | 6.03  |
| 9  | 3.48  | 6.06  | 3.37  | 5.80  | 3.29  | 5.62  | 3.23  | 5.47  |
| 10   | 3.33  | 5.64  | 3.22  | 5.39  | 3.14  | 5.21  | 3.07  | 5.06  |
| 11   | 3.20  | 5.32  | 3.09  | 5.07  | 3.01  | 4.88  | 2.95  | 4.74  |
| 12   | 3.11  | 5.06  | 3.00  | 4.82  | 2.92  | 4.65  | 2.85  | 4.50  |
| 13   | 3.02  | 4.86  | 2.92  | 4.62  | 2.84  | 4.44  | 2.77  | 4.30  |
| 14   | 2.96  | 4.69  | 2.85  | 4.46  | 2.77  | 4.28  | 2.70  | 4.14  |
| 15   | 2.90  | 4.56  | 2.79  | 4.33  | 2.70  | 4.14  | 2.64  | 4.00  |
| 16   | 2.85  | 4.44  | 2.74  | 4.20  | 2.65  | 4.03  | 2.59  | 3.89  |
| 17   | 2.81  | 4.34  | 2.70  | 4.10  | 2.62  | 3.95  | 2.55  | 3.79  |
| 18   | 2.77  | 4.25  | 2.66  | 4.01  | 2.58  | 3.85  | 2.51  | 3.71  |
| 19   | 2.74  | 4.17  | 2.63  | 3.94  | 2.55  | 3.77  | 2.48  | 3.63  |
| 20   | 2.71  | 4.10  | 2.60  | 3.87  | 2.52  | 3.71  | 2.45  | 3.56  |
| 21   | 2.68  | 4.04  | 2.57  | 3.81  | 2.49  | 3.65  | 2.42  | 3.51  |
| 22   | 2.66  | 3.99  | 2.55  | 3.76  | 2.47  | 3.59  | 2.40  | 3.45  |
| 23   | 2.64  | 3.94  | 2.53  | 3.71  | 2.45  | 3.54  | 2.38  | 3.41  |
| 24   | 2.62  | 3.90  | 2.51  | 3.67  | 2.43  | 3.50  | 2.36  | 3.38  |
| 25   | 2.60  | 3.86  | 2.49  | 3.63  | 2.41  | 3.46  | 2.34  | 3.32  |
| 26   | 2.59  | 3.82  | 2.47  | 3.59  | 2.39  | 3.42  | 2.32  | 3.29  |
| 27   | 2.57  | 3.79  | 2.46  | 3.56  | 2.37  | 3.39  | 2.30  | 3.26  |
| 28   | 2.56  | 3.76  | 2.44  | 3.53  | 2.36  | 3.36  | 2.29  | 3.23  |
| 29   | 2.54  | 3.73  | 2.43  | 3.50  | 2.35  | 3.33  | 2.28  | 3.20  |
| 30   | 2.53  | 3.70  | 2.42  | 3.47  | 2.34  | 3.30  | 2.27  | 3.17  |
| 32   | 2.51  | 3.66  | 2.40  | 3.42  | 2.32  | 3.25  | 2.25  | 3.12  |
| 34   | 2.49  | 3.61  | 2.38  | 3.38  | 2.30  | 3.21  | 2.23  | 3.08  |
| 36   | 2.46  | 3.54  | 2.35  | 3.32  | 2.26  | 3.15  | 2.19  | 3.02  |
| 38   | 2.44  | 3.48  | 2.32  | 3.26  | 2.24  | 3.10  | 2.17  | 2.96  |
| 40   | 2.42  | 3.44  | 2.30  | 3.22  | 2.22  | 3.05  | 2.14  | 2.92  |
| 50   | 2.40  | 3.41  | 2.29  | 3.18  | 2.20  | 3.02  | 2.13  | 2.88  |
| 60   | 2.37  | 3.34  | 2.25  | 3.12  | 2.17  | 2.95  | 2.10  | 2.82  |
| 80   | 2.35  | 3.25  | 2.21  | 3.04  | 2.12  | 2.87  | 2.05  | 2.74  |
| 100  | 2.30  | 3.20  | 2.19  | 2.99  | 2.10  | 2.82  | 2.03  | 2.69  |
| 200  | 2.26  | 3.11  | 2.14  | 2.90  | 2.05  | 2.73  | 1.98  | 2.60  |
| 500  | 2.22  | 3.04  | 2.10  | 2.83  | 2.02  | 2.66  | 1.95  | 2.53  |
| ∞  | 2.21  | 3.02  | 2.09  | 2.80  | 2.01  | 2.64  | 1.94  | 2.51  |

Valores de  $F_{\alpha}$  número de grados de independencia para el error experimental

## GLOSARIO

## GLOSARIO.

**ACUÍFEROS:** Son aquellos estratos que pueden proporcionar agua en una cantidad aprovechable; los hay confinados, semiconfinados y libres.

**ACUITARDOS:** Son los lechos que tienen una permeabilidad suficiente para transmitir agua en cantidades significativas para necesidades regionales pero cuya permeabilidad no es la suficiente para permitir la continua producción de pozos.

**AGUA MAGMÁTICA:** Es el agua que asciende desde el interior de la Tierra y que aún no se encuentra dentro del ciclo hidrológico.

**AGUA SUBTERRÁNEA:** Es la porción de agua subsuperficial que está a mayor presión atmosférica y que mantiene completamente saturadas a las formaciones geológicas.

**AGUA SUPERFICIAL:** Es la porción de agua que cubre la superficie de la Tierra, tales como ríos, mares, lagos, etc.

**ANOREXIA:** Falta anormal del apetito.

**BROCAL:** Antepecho que rodea la boca de un pozo.

**CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL AGUA:** Es la cantidad de agua que los residuos sólidos y el material de cobertura pueden absorber.

**CAPILARIDAD:** Es la propiedad que tienen ciertos líquidos de ascender por tubos delgados, debido a su tensión superficial.

**CUENCA HIDROLÓGICA:** Son divisiones de una región hidrológica y existen por lo menos dos cuencas por cada región.

**DESCARGA:** Es cuando las aguas desembocan en un cuerpo receptor de agua.

**DESECHO SÓLIDO:** Es cualquier material o residuo de un proceso de producción, de transformación o de utilización que no posee valor para quien lo genera por lo que lo elimina, además de que son productos inevitables de toda actividad humana.

**DISNEA:** Dificultad al respirar.

**ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL:** Es la cantidad de agua de lluvia que se pierde antes de que tenga oportunidad de infiltrarse

en el suelo.

**ESTRIBACIONES:** Ramales cortos de montañas que arrancan de una cordillera.

**EUTROFICACIÓN:** Es el proceso mediante el cual, el agua debajo de la superficie limosa es pobre en oxígeno y, por consiguiente, incapaz de soportar formas de vida que son útiles para el hombre. Es un proceso lento que dura cientos o miles de años y forma parte de la transformación general del lago a pantano y finalmente, en prado.

Este proceso se da cuando los elementos nutritivos inorgánicos tales como compuestos de fósforo, nitrógeno, potasio, azufre e hierro aumentan en el agua, las algas crecen y cubren la superficie del agua. A medida que las algas se mueren, se convierten en alimento para las bacterias y la descomposición bacteriana como sabemos consume oxígeno, produciendo la eutroficación en un lago.

**EVAPOTRANSPIRACIÓN:** Es la combinación de los fenómenos de evaporación y transpiración que lleva a cabo un líquido sobre una superficie.

**FOSA SÉPTICA:** Pozo que recibe los residuos y los descompone por un procedimiento bioquímico.

**HELMINTO:** Nombre de los parásitos intestinales como la Tenia y la Triquina.

**HIDRARGIRISMO:** Intoxicación por mercurio, se presenta cuando el paciente ha inhalado vapores de mercurio o ha utilizado compuestos de mercurio, intoxicándose por vía interna o externa.

**HIDROGEOLOGÍA:** Es la aplicación de los métodos de investigación de la geología, y el estudio de las aguas subterráneas.

**HIDROLOGÍA:** Es la ciencia que trata de las propiedades, ocurrencia, circulación y distribución del agua, sobre la corteza terrestre y debajo de ella, su presencia en la atmósfera y sus relaciones con el medio ambiente.

**HUMUS:** Está formado por la descomposición de materias orgánicas de origen generalmente vegetal.

**INFILTRACIÓN:** Paso lento de un líquido a través de los poros de un cuerpo.

**INTERSTICIOS:** Pequeños intervalos de distancia entre las partes de un todo.

**INTRUSIÓN SALINA:** Acción de introducir sales en un cuerpo.

**LIMO:** viene del latín limus = lodo. Es una especie de barro.

**LITOLÓGÍA:** Parte de la geología que estudia las rocas.

**LOMERÍO:** Es un conjunto de lomas. en una unidad de lomerío las pendientes del terreno fluctúan entre 20 y 10% y los afloramientos de rocas son discontinuos, pero el espesor y continuidad del suelo son mayores que en el caso de la unidad de montaña, por eso parte del agua precipitada se retiene, dando por resultado un volumen bajo de agua de escurrimiento.

**METALES TRAZA:** Se refiere a pequeñas cantidades de metales.

**NAUSEABUNDO:** Que produce náuseas, vómito y mareos.

**NIVEL FREÁTICO:** Es una superficie de contacto irregular entre las zonas saturada y no saturada; bajo el nivel freático se encuentra el agua subterránea.

**NMP:** Número más probable.

**OCLUIR:** Obstruir o cerrar un conducto.

**PERMEABILIDAD:** La palabra permeable significa penetrable;

un cuerpo es permeable si permite el paso de los fluidos.

La permeabilidad de las rocas es la propiedad de dejarse atravesar por el agua.

**PIEZÓMETRO:** Instrumento que permite medir la presión experimentada por los líquidos.

**POROSIDAD:** Es el volumen de los espacios vacíos en relación al volumen total del terreno considerado.

**POZO:** Estructura para extraer agua de acuíferos profundos en los que el diámetro de perforación es estrecho, generalmente se encuentran sellados en la parte superior y constan de ademe metálico y equipo de bombeo.

**PRECIPITACIÓN:** Depósito sólido que se forma en un líquido, cuando la concentración de los iones rebasa el producto de solubilidad, o sea, la máxima concentración estable que puede existir disuelta en un volumen determinado en condiciones de presión y temperatura reguladas.

**PRECIPITACIÓN QUÍMICA:** Separación en forma sólida de un cuerpo disuelto en un líquido en donde se efectúa una reacción química.

**PRESIÓN HIDROSTÁTICA:** Es el peso de una columna de fluido

sobre la unidad de área.

**RELLENO SANITARIO:** Es un método de Ingeniería para disponer adecuadamente de los desechos sólidos en el suelo, esparciéndolos en capas delgadas, compactándolos con una capa de tierra al término de las operaciones diarias o a intervalos más frecuentes, según las necesidades. Trae como consecuencia, la formación de lixiviados, que resultan de la degradación de los residuos y de la filtración del agua de lluvia.

**TOXICIDAD:** Carácter de lo que es tóxico o venenoso.

**SITIOS DE DISPOSICIÓN:** Son los lugares en donde se colocan los desechos sólidos para su eliminación, a fin de evitar efectos nocivos a la salud y/o al medio ambiente.

**SUBSUELO:** Terreno que se está debajo de una capa de tierra laborable.

**SUELO:** Es la capa que cubre la superficie de la Tierra, es un material poroso de muy diversas propiedades. Su fase sólida se compone de productos inorgánicos derivados del fracturamiento de las rocas o material transportado y de productos orgánicos de la flora y la fauna.

**ZONA SATURADA:** Es aquella que se caracteriza por tener todos los poros llenos de agua; sus límites se fijan inmediatamente debajo de la zona no saturada y arriba de una capa impermeable en la profundidad.

**ZONA NO SATURADA:** Es aquella que se extiende desde la superficie del terreno hasta un nivel de profundidad tal que todos los poros o espacios abiertos se encuentran llenos o saturados de agua o de aire y, en menor grado de agua.

TABLA DE UNIDADES

| SÍMBOLO           | SIGNIFICADO                    |
|-------------------|--------------------------------|
| cm                | centímetro                     |
| mm                | milímetro                      |
| m                 | metro                          |
| km                | kilómetro                      |
| Ha                | Hectárea                       |
| ml                | mililitro                      |
| lt                | litro                          |
| mg                | miligramo                      |
| km <sup>2</sup>   | kilómetro cuadrado             |
| g/cm <sup>3</sup> | gramo sobre centímetro cúbico. |
| m/s               | metro sobre segundo            |
| ppm               | partes por millón              |
| mmhos             | milimhos                       |
| %                 | por ciento                     |
| 1/Ω cm            | uno sobre ohmio por centímetro |
| °C                | grado centígrado.              |

Las abreviaciones presentadas en el cuadrado latino son las siguientes:

FV= Fuente de variación.

SC= Suma de cuadrados.

GL= Grados de libertad.

CM= Cuadrados medios.

RCM= Relación de cuadrados medios.

## BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFÍA.

- 1.-Ander y Sonnessa (1985)  
Principios de Química.  
Limusa, primera edición.  
México.  
p.p 723-736.
- 2.-Asano T. and Pettygrove (1984).  
Artificial Recharge of Groundwater.  
Butterworth Publishers.  
Boston, U.S.A.
- 3.-Becerril Albarran Josefina Paz (1991).  
Estudio de la Calidad del Agua en Pozos cercanos al  
Tiradero de Santa Catarina.  
Tesis, UNAM (1991).
- 4.-Canter, L.W., Knox, R.C and Fair Child D.M.  
Groundwater Quality Protection.  
Lewis Publishers (1987).

- 5.-Chang, A.C. and Page, A.L (1985).  
Soil Deposition of Trace Metals during Groundwater  
Recharge using Surface Spreading.  
Asano, Artificial Recharge of Groundwater.  
Butterworth Publishers, Boston, USA.
- 6.-Cheremisnoff Paul N. and Kenneth A. Gigliello  
(1967).  
Leachate from Hazards Wastes Sites.  
Technomic Publishing Co. Inc.  
Lancaster, Pennsylvania.
- 7.- Code of federal regulations.  
Protection of Environmental.  
U.S Government printing office  
Washington, July, 1988.  
p.p 494-498.
- 8.-De la Loma José Luis (1982).  
Experimentación Agrícola.  
Uthea (Unión Tipográfica Editorial Hispano  
America).  
México, Agosto 1992.  
p.p 97-107; 173-185; 190-194.

9.-Diario Oficial de la Federación (1988).

Reglamento de la Ley General de la Salud en materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios.

Primera sección, Enero (1988).

10.-Diario Oficial de la Federación (1988).

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Primera sección, Junio (1988).

11.-Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

SEDUE (1984).

12.-Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

SEDUE (1988).

13.-Eduardo Gómez (1967).

Curso de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas.  
Universidad del Ecuador.

Organización Mundial de la Salud (OMS).

- 14.-Fair, G.M., Geyer J.C and Okun D.A. (1984).  
Purificación de Aguas. Tratamiento y Remoción de  
Aguas Residuales.  
Editorial Limusa. México.  
p.p. 11-47; 107-131; 217-275.
- 15.-Fitz Patrick (1980).  
El suelo y sus propiedades.  
Editorial Mc Graw Hill.  
p.p. 120-125.
- 16.-Freeze Allan and Cherry John (1979).  
Groundwater.  
Prentice Hall.  
p.p. 83-99; 103-189; 268-301; 402-457.
- 17.-Fuad David Gidi (1991).  
Control de la contaminación del agua en México.  
Información Científica y Tecnológica.  
Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología.  
Febrero, 1991.  
p.p 27-30.

18.-George, E.P. Box, William, G. Hunter y J. Stuart  
Hunter (1988).

Estadística para Investigadores.

Editorial Reverté S.A. Primera edición.

Barcelona, España.

p.p 255-333.

19.-Griffen, R.A. et al. (1975).

Attenuation of Pollutants in Municipal Landfill.

Leachate by Passage Through Clay.

Illinois State Geological Survey.

September, 1975.

20.-Guías para la Interpretación de Cartografía (1990).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e  
Informática INEGI.

Aguascalientes, Ags.

p.p 7-22.

21.-Harry M. Freeman (1988).

Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and  
Disposal.

Mc Graw Hill, U.S.A.

p.p 2.7-2.13; 7.21-7.51.

22.-Haxo, H.E.; White, R.M.; Haxo, P.D. and Fong, M.A.  
(1983).

Liner Materials Exposed to Municipal Solid Waste  
Leachate.

PB 83-147-801, NTIS, Springfield, V.A.

23.-Ingeniería Hidráulica en México (1992).

Comisión Nacional del Agua

Volúmen VII, número I.

Enero-Abril, 1992.

24.-Iturbe Argüelles Rosario (1981).

Análisis de remoción de contaminantes en el agua.

Tesis, UNAM.

25.-Iturbe R.et al. (1990).

Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Modelación del Transporte de Contaminantes en la  
zona no saturada.

p.p 14-30. p 14-30.

Abril, 1990.

26.-Jackson (1980).

Aquifer Contamination and Protection.

Project 8.3 of The International Hydrological Programs.

UNESCO, France.

27.-Jimenez Cisneros (1991).

Tratamiento no convencional para la remoción de contaminantes tóxicos prioritarios presentes en las aguas residuales.

Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Noviembre, 1991.

28.-J. Porras Martín y Jean Pierre Thauvin (1978).

Aguas Subterráneas. Problemas Generales de Contaminación.

CIFCA, Madrid.

p.p 57-81.

29.-Krone, R.B., Orlab, G.T. and Hodgkinson (1968).

Movement of Coliform Bacteria through porous media. Sewage Industrial Wastes, 30.

p.p 1-13.

- 30.-Lamb James C. (1985).  
Water Quality and its control.  
J. Wiley, New York.  
p.p 106-170.
- 31.-Los Desperdicios Urbanos; Análisis de las  
soluciones actuales, aplicación al problema del D.F.  
Editado por Estudios y Proyectos A.C.  
México 1985.
- 32.-Mackay, D.M., Roberts, P.V. y Cherry, J.A. (1985).  
Transport of Organic Contaminants in Groundwater.  
Journal of Environmental Science and Technology.  
Vol. 19, núm. 5, U.S.A.  
p.p 384-392.
- 33.-Mackay D.M. y Vogel, T.M. (1986).  
Groundwater Contamination by Organic Chemicals:  
uncertainties in assessing impact.  
School of Public Health.  
U.C.L.A., Los Angeles California, 90024, USA.

- 34.- Manejo de los desechos sólidos: El caso del D.F  
Ediciones INAP (Instituto nacional de Admisnis-  
tración Pública.  
México, 1988.  
Departamento del distrito Federal.
- 35.-Moderey Roscan Laura Elena (1965).  
Estudio Preliminar sobre las Aguas Subterráneas en  
México.  
Tesis, UNAM (1965).
- 36.-Monasterio Ortiz (1989).  
Manejo de desechos industriales peligrosos en  
México.  
Publicación IMIQ.  
p.p 24-26.
- 37.-Mora R. Judith (1991).  
A cuentagotas. El problema del agua en el valle de  
México.  
Información Científica y Tecnológica.  
Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología.  
Febrero, 1991.  
p.p 22-26.

- 38.-Monroy G. y Dordelly L. (1988).  
Análisis y Evaluación de los procesos de  
Tratamiento y Disposición Final de los Desechos  
Sólidos en la Ciudad de México.  
Tesis Universidad Panamericana, 1988.
- 39.-Mortimer C.E (1983).  
Química.  
Grupo Editorial Iberoamericana, México.  
p.p 596-633.
- 40.-Nick H. Proctor Ph. D. and James P. Hughes M.D  
(1978).  
Chemical Hazards of The Workplace.  
J.B Lippincott Company, U.S.A.  
p.p 139-141; 175; 307-310; 320-322.
- 41.-Perrier, E. and Gibson, A. (1980).  
Hidrologic Simulation on Solid Waste Disposal  
Sites.  
MERL, Cincinnati, OH.

42.-Phillip L. Williams and James L. Bursan (1985).  
Industrial Toxicology. Safety and Health  
Applications in the Workplace.  
V.N.R( Van Nostrand Reinhold).  
New York.  
p.p 197-210.

43.-Plano de Usos del suelo.  
Delegación de Iztapalapa.  
DDF, 1988.

44.-Reunión Regional del Distrito Federal.(1992)  
Documentos Relativos al manejo de residuos sólidos  
SMISA, A.C., Agosto 1992.

45.-Rodante Ramón H.C. (1990)  
Las 3 R's del manejo de los desechos sólidos :  
Reducir, Reutilizar y Reciclar.  
IMIQ (Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos).  
p.p 24-28.

- 46.-Rosario Iturbe y Ana Elisa Silva (1989).  
Revisión Bibliográfica sobre Contaminación de  
Suelos y Acuíferos.  
Ingeniería Hidráulica en México.  
Volumen IV, número 3.  
p.p 51-56.
- 47.-Rovers, F. and Farquhar, G. (1973).  
Infiltration and Landfill behavior.  
Journal of Environmental Engineering Division.  
October. 1973.
- 48.-Rovers, F. and Farquhar, G. (1974).  
Evaluating Contaminant Attenuation in the Soil to  
improve Landfill selection and design.  
Proc. Intern. Conf. Land for Waste Management.  
Ottawa, Canada.
- 49.-Sawyer Clair N. y Mc. Carty Perry L.(1978)  
Water Resources and Environmental Engineering,  
Mc Graw Hill.  
3<sup>a</sup> edition, New York.  
p.p. 271-404

- 50.-Sienko Michell J. y Plane Robert A. (1987).  
Química. Principios y Aplicaciones.  
Mc Graw Hill de México, S.A de C.V.  
p.p 431-445.
- 51.-Snoeyink, V.L. and Jenkins D. (1987).  
Water Chemistry.  
Wiley. U.S.A.  
p.p 13-16; 273-250; 416-451.
- 52.-Standar Methods for the Examination of Water and  
Waste Water.  
American Public Health Association  
17<sup>th</sup> edition, 1989.
- 53.-Tejeda González Carlos (1991).  
Ingeniería Ambiental.  
El Riego con Aguas Residuales en México.  
SMISAAC  
p.p 6-15.

- 54.-Turk Amos y Wittes Janet (1988).  
Ecología, Contaminación - Medio ambiente.  
Editorial Interamericana, primera edición.  
México, D.F. 1988.  
p.p 126-130; 141-151.
- 55.-Turpin M.S., Vidales A.H., Felipe L.S., Martínez R.S. y Alvarez C.M. (1990).  
Evaluación de la producción de lixiviados en un relleno sanitario parte uno y dos.  
Congreso Nacional de Ingeniería Ambiental y la Salud.  
Oaxaca, septiembre, 1990.
- 56.-Watty, B.(1982)  
Química Analítica.  
Primera Edición, Alhambra.  
México, D.F  
p.p. 129-153; 609-613.
- 57.-Zapata Dushka (1991).  
Una Sociedad Desechable.  
Libertas, octubre 1991.  
p.p 17-18.