

34



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

## ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE METALES PESADOS A TRAVÉS DEL SUELO

### T E S I S



EXAMEN DE PROFESIONALES  
FAC. DE QUÍMICA

Que para obtener el título de  
INGENIERA QUÍMICA

Presenta:

Sara Galván Lañado

México, D.F., 1994

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



## **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).

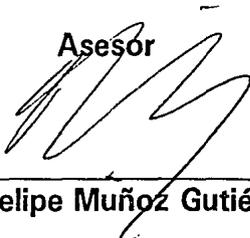
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

## JURADO ASIGNADO

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Presidente</b>    | Dra. Ma. del Carmen Durán<br>Domínguez de Bazúa |
| <b>Vocal</b>         | M. I. Felipe Muñoz Gutiérrez                    |
| <b>Secretario</b>    | Dr. Víctor Manuel Luna Pabello                  |
| <b>1er. Suplente</b> | Ing. José Flavio Rosales Oscos                  |
| <b>2do. Suplente</b> | QFB. Landy Irene Ramirez Burgos                 |

**Sitio donde se desarrolló el tema:** Coordinación de Mecánica, Fuidos y Térmica. Instituto de Ingeniería, UNAM

**Asesor**



---

**M. I. Felipe Muñoz Gutiérrez**

**Sustentante**



---

**Sara Galvan Lañado**

*Con profundo agradecimiento:*

*A Dios,*

Por permitir la llegada de este momento y darme una nueva luz en mi vida.

*A mis padres,*

Mario y Tony, por el amor, apoyo y cariño que siempre me han brindado, gracias a ustedes hoy tengo un sueño hecho realidad.

*A mis hermanos,*

David, Isaac y Tere, por todos los grandes momentos que hemos compartido, los quiero mucho.

*A mis amigos,*

Por la linda amistad que nos une.

A México por se parte de ti, eres extraordinario.

## **Un agradecimiento especial**

### A la UNAM

Por brindarme la oportunidad de un desarrollo profesional.

### Al M. I. Felipe Muñoz G.

Por el lindo equipo de trabajo que se ha formado, gracias por su paciente y valiosa ayuda.

Al Instituto de Ingeniería por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

# *INDICE*

|  | <b>PAGINA</b> |
|--|---------------|
| <b>RESUMEN</b>   |               |
| <b>I INTRODUCCION</b>  | <b>1</b>      |
| <b>II GENERALIDADES</b>  | <b>3</b>      |
| 2.1. Almacenes de los desechos industriales                          | 3             |
| 2.2. Propiedades del suelo   | 7             |
| 2.3. Problemática de los compuestos tóxicos lixiviables              | 10            |
| <b>III RECUBRIMIENTOS DEL FONDO DE LOS ALMACENES</b>                 | <b>14</b>     |
| 3.1. Membranas orgánicas   | 15            |
| 3.2. Arcillas  | 16            |
| 3.3. Atenuación  | 18            |
| <b>IV CENIZAS PRODUCIDAS EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA</b>   | <b>20</b>     |
| 4.1. Tipos de carbón   | 22            |
| 4.2. Propiedades de las cenizas                                      | 23            |
| 4.3. Cantidades producidas   | 26            |
| 4.4. Almacenes usados  | 27            |
| 4.5. Lixiviados de las cenizas                                       | 29            |
| <b>V MODELOS DE TRANSPORTE DE METALES PESADOS A TRAVES DEL SUELO</b> | <b>33</b>     |
| 5.1. Flujo de fluidos a través del suelo                             | 33            |
| 5.2. Transporte difusivo   | 37            |
| 5.3. Transporte difusivo convectivo                                  | 58            |
| 5.4. Transporte en medio poroso con gradientes de temperatura        | 78            |

|            |                                       |           |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>VI</b>  | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> | <b>86</b> |
| <b>VII</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                   | <b>88</b> |

# ***RESUMEN***

Se describen los principales almacenes de residuos industriales, así como las características de los recubrimientos usados en los mismos, haciendo énfasis en el uso de arcillas.

El interés del trabajo es analizar el transporte de arsénico, zinc, cadmio y selenio a través de arcilla. Estos elementos se hallan comúnmente en los "lixiviados" producidos por las cenizas generadas en la combustión del carbón.

Se proponen tres modelos teóricos aplicables al transporte del arsénico y de los metales a través del suelo: el difusivo, el difusivo-convectivo y el combinado de calor y masa. Los dos primeros son resueltos para un tipo de suelo arcilloso.

Los modelos resueltos predicen que el arsénico, zinc, cadmio y selenio (que se encuentran a una concentración inicial de 0.103, 0.416, 0.48, 0.048 mg/L, respectivamente) se diluyen prácticamente a cero a una cierta profundidad del suelo. El selenio, a pesar de que se encuentra en menor cantidad, es él que requiere mayores profundidades. El arsénico, por ser un compuesto tóxico, de gran peligro para las aguas subterráneas, puede ser controlado con el uso de arcilla; su concentración se anula a una profundidad de 4 y 8 cm según el modelo teórico usado para un período de 10 años.

# *CAPITULO I*

## *INTRODUCCION*

La cantidad y origen de los desechos industriales es de enorme magnitud y sumamente amplia ya que comprenden desechos gaseosos, líquidos y sólidos provenientes de operaciones de industrias de transformación, de conversión de energía y otras, como: enfriamiento, lavados, descargas, extracciones, combustión, impregnación, tratamiento químico, tratamiento físico y operaciones similares. Ante la amplitud de los desechos es lógico que las propiedades de los mismos también sea muy variada.

Una vez que se genera el desecho se tiene la necesidad de estabilizarlo y disponer de él. Generalmente su estabilización da como productos finales gases y sólidos. Para la disposición de estos últimos existen depósitos o almacenes que varían en tamaño y complejidad dependiendo de la cantidad y tipo de desecho. Los más simples son los tiraderos a cielo abierto donde se arrojan los desechos sólidos, sin más cuidado que confinarlos en un área determinada.

Un depósito de este tipo, pero mejor diseñado, construido y operado lo constituye el relleno sanitario para basuras no tóxicas. También se han diseñado almacenes en recintos cerrados y recipientes enterrados ó sumergidos a grandes profundidades. Esto último es muy usado para materiales radioactivos. Los desechos líquidos se vierten al drenaje cuando es posible o se envían a canales y lagunas de retención buscando su degradación. Los gases se envían a la atmósfera siempre y

cuando cumplan con ciertos requisitos o normas sobre toxicidad y explosividad. Cuando se encuentran en concentraciones por encima de los límites permisibles entonces se tienen que tratar física o químicamente antes de su disposición.

Los desechos sólidos depositados sobre el suelo son arrastrados por el agua que fluye a través de éste, produciéndose mediante una serie de procesos físicos, químicos y bioquímicos (si hay materia orgánica presente) una solución con gran cantidad de compuestos denominada "lixiviado" (palabra derivada del latín "lixivia", lejía). Este puede contener sales, hidrocarburos, ácidos, álcalis, plaguicidas, metales pesados, desechos radioactivos, productos farmacéuticos y gérmenes. Cuando el "lixiviado" llega al fondo del depósito tenderá a transportarse hacia el suelo atravesando los impermeabilizantes sintéticos o naturales. Existen en la literatura reportes del transporte de "lixiviados" a través del suelo y del uso de diversos impermeabilizantes, naturales y sintéticos, para la atenuación del transporte. Una manera práctica de atenuar el transporte de algunos de los elementos que constituyen el "lixiviado" es utilizar un impermeabilizante de arcilla localizado en el fondo del almacén que contiene a los desechos.

Es de primordial importancia determinar la formación o la producción de sustancias peligrosas o tóxicas en los "lixiviados" y su posterior transporte a través del suelo por el potencial peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

En este trabajo se desea determinar el transporte o migración de ciertos elementos que se encuentran en los "lixiviados" de las cenizas provenientes de la combustión del carbón utilizado en la generación de energía eléctrica. El objetivo final es estimar los perfiles de concentración de las sustancias variando con el tiempo y la profundidad de una capa de arcilla.

Para alcanzar el objetivo se hará un estudio de los diferentes almacenes y depósitos más utilizados en la actualidad, así como el uso de ciertos tipos de recubrimientos empleados como medios atenuantes del transporte de los contaminantes. También se analizará la formación de "lixiviados" y sus características.

Después se estudiarán las características del carbón usado en las plantas generadoras, las cenizas producidas y sus almacenes; y finalmente se describirán y plantearán modelos de transporte a través del suelo aplicables a un medio poroso considerando los mecanismos de difusión y difusión-convección. Los modelos se plantearán en primera instancia para un medio isotérmico y posteriormente se hará un breve análisis para el caso de que haya gradientes de temperatura.

# *CAPITULO II*

## *GENERALIDADES*

### **2.1. ALMACENES DE DESECHOS INDUSTRIALES**

Los depósitos y/o almacenes más utilizados para la disposición final de los desechos industriales son:

#### **RELLENOS SANITARIOS**

El relleno sanitario es un método de ingeniería recomendado para la disposición final de los desechos sólidos que no contienen sustancias tóxicas (como era originalmente la basura doméstica) y que comprende el esparcimiento y compactación de los desechos en celdas y su recubrimiento con tierra, de manera que no sean un peligro para la salud pública y el ambiente.

Los rellenos sanitarios, en general, han sido clasificados en tres categorías [1]:

**CLASE I:** acepta toda clase de desechos sólidos y líquidos, incluyendo los peligrosos y excluyendo los radioactivos.

**CLASE II:** acepta desechos sólidos domésticos así como industriales no peligrosos y escombros o materia de demolición; genera gases.

**CLASE III:** acepta escombros y material de demolición, no genera gases.

Los aspectos más importantes que se deben considerar para la instalación de un relleno son: selección del sitio, método y operación del relleno, presencia y control de gases y "lixiviados".

Los aspectos técnicos más importantes para la selección del sitio y su operación son:

1. Localización del sitio adecuado: uso del suelo, tenencia de la tierra, vías de comunicación, disponibilidad de compra, cohesión, topografía, relieve, sismicidad, etc.
2. Estudios geohidrológicos e hidrológicos: geología, climatología, flora y fauna, estratigrafía, hidrología y geohidrología.
3. Estudio de mecánica de suelos.
4. Diseño de capas y celdas, del método de relleno, del recubrimiento, de vialidad y de operación.
5. Captación y uso del biogás generado.

Los métodos utilizados para disponer de los desechos sólidos mediante un relleno sanitario son: método de trinchera, método de área y método combinado. El método seleccionado dependerá de las características del suelo del sitio elegido y de la cantidad y características de los desechos [1].

Los factores más importantes que se deben considerar para el diseño y operación de un relleno son mostrados en la tabla 1 [2].

Las obras complementarias que puede requerir un relleno son: estructuras para la captación y desviación de aguas pluviales, estructuras para la captación de biogás, obras de captación de "lixiviados", cobertizo para equipo, cimentación de la báscula y cerca fija y móvil.

La figura 1 muestra el diseño de un relleno sanitario típico [2].

## **RELLENOS PARA DESECHOS PELIGROSOS**

Este tipo de relleno es una variación del relleno sanitario para la disposición de materiales peligrosos.

El relleno puede ser cubierto con arcilla, plástico u otro material impermeable para prevenir el transporte de los residuos a través del suelo. Los materiales a disponerse deben ser identificados cuidadosamente y tomar todas las precauciones necesarias. Se deben instalar sistemas de control y monitoreo de gases y "lixiviados". En la figura 2 se muestra un relleno sanitario para residuos peligrosos [3, 4].

**TABLA 1. DISEÑO Y OPERACION DE RELLENOS [2]**

| FACTOR                           | OBSERVACIONES   |
|----------------------------------|---|
| <b>* Diseño</b>                  |   |
| Accesos                          | Pavimentar todos los caminos de acceso al sitio y las áreas de descarga.  |
| Diseño y construcción de celdas  | Varían dependiendo del terreno, del método de relleno y de los gases que se generan.  |
| Material de recubrimiento        | Aproximadamente 1 m <sup>3</sup> de material puede ser requerido por 4 a 6 m <sup>3</sup> de desechos. Se pueden instalar selladores para evitar infiltraciones de la superficie. |
| Drenaje                          | Instalar franjas de drenaje para desviar efluentes acuosos.   |
| Requerimiento de equipo          | Varía con el tamaño del relleno.  |
| Prevención del fuego             | Colocar sistemas de agua contra incendios, realizar una separación apropiada de las celdas para evitar incendios si ocurriera una combustión.                                     |
| Protección de aguas subterráneas | Desviar los "lixiviados" de los manantiales subterráneos; se requiere instalar sellos para el control de "lixiviados" y sistemas de monitoreo de gases y aguas subterráneas.      |
| Area de terreno                  | Debe ser lo suficientemente grande para almacenar todos los desechos.   |
| Método de relleno                | La selección varía según el tipo de terreno y el material de cubierta.  |
| Control de basuras               | Usar franjas móviles en las áreas de descarga para almacenar la basura que se pudiera generar.  |
| Plan de operación                | Debe incluir un tratamiento de lodos y recuperación de gases.   |
| Esparcimiento y compactación     | Generalmente se compactan y esparcen en capas de aprox. 6 m.  |
| Area de descarga                 | Debe ser lo más pequeña posible.  |
| <b>* Operación</b>               |   |
| Comunicaciones                   |   |
| Días y horas de operación        |   |
| Disposición de empleados         |   |
| Equipo de mantenimiento          |   |
| Registros de operación           | Tonelaje, transacciones y cualquier operación realizada debe ser registrada.  |
| Chatarra                         | Esta debe tratarse lejos del sitio y de las áreas de descarga.  |
| Básculas                         | Esencial para el control de los registros.  |

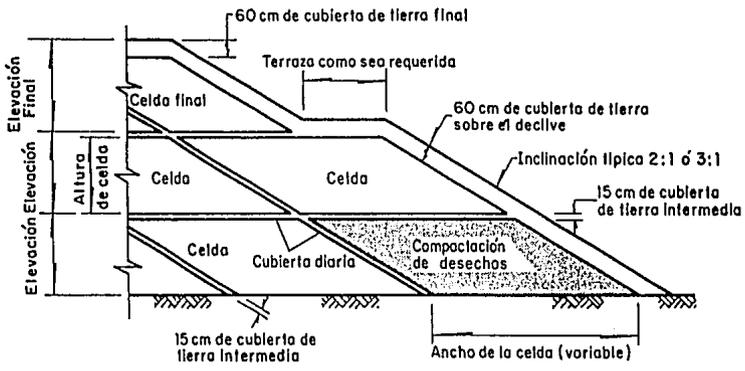


Fig. 1 Parte seccional de un relleno sanitario [2]

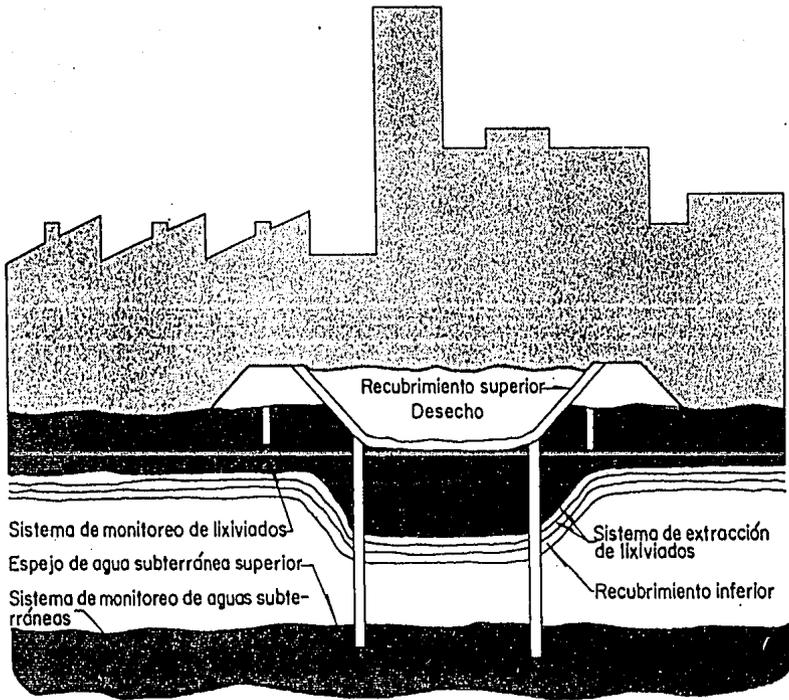


Fig. 2 Relleno para desechos peligrosos [3]

## 2.2. PROPIEDADES DEL SUELO

Los suelos proceden de la alteración fisicoquímica de las rocas que se transforman en elementos de dimensiones más o menos grandes, compuestos de sílice, calcio, feldespatos, mica y minerales arcillosos. Los elementos de origen rocoso son arrastrados por las aguas y los agentes atmosféricos originando así suelos blandos sedimentarios y granulares o cohesivos. Una vez formado el suelo por los agentes de procesos de intemperismo (procesos de formación del suelo), se tiene una mezcla de materiales difícil de definir, cuyas propiedades dependen de su composición y de la manera en que estén ligados sus componentes. El suelo está constituido por tres fases: una sólida, una líquida y una gaseosa; en la primera se considera a los componentes inorgánicos (óxidos e hidróxidos de Si, Al,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ; carbonatos, sulfatos, fosfatos, cloruros, sulfuros, silicatos, arcillas minerales) y orgánicos (grasas, ceras, resinas, carbohidratos, proteínas, materia orgánica humidificada) y la segunda al agua y la solución del suelo. La fase sólida posee mayor estabilidad y esta propiedad sirve para la caracterización del suelo. Las fases líquida y gaseosa son extremadamente inestables. La fase sólida es muy heterogénea y está formada por una mezcla de materiales que se diferencian en su composición, constitución y propiedades. A todos estos fragmentos se les puede separar y caracterizar de acuerdo a su tamaño, origen y propiedades. A este respecto se tienen los siguientes tipos de suelo [5]:

- bloques rocosos de dimensiones superiores a 200 mm;
- las gravas, que varían de 200 a 20 mm;
- las gravillas, con tamaños entre 20 y 2 mm;
- las arenas, entre 2 mm y 50  $\mu$ ;
- los limos, entre 50  $\mu$  y 5  $\mu$ ;
- las arcillas, cuyas partículas tienen dimensiones inferiores a 5  $\mu$ .

Las partículas menores de 0.2  $\mu$  constituyen los coloides.

### EL AGUA DEL SUELO

Los intersticios que quedan entre los granos están llenos de agua, aire y vapor de agua. Se dice que el suelo está "saturado" si el agua ocupa todo el volumen de estos huecos, no existiendo aire o vapor de agua. Como la superficie de los granos del suelo está cargada negativamente, los cationes  $\text{H}^+$  de las moléculas polarizadas del agua intersticial entran en contacto con estos granos y las moléculas se colocan en torno a los mismos, con una disposición muy cerrada. Estas

moléculas forman capas superpuestas o "adsorbidas" cuyo conjunto puede alcanzar un espesor del orden de 50 Å; es lo que se denomina "agua de constitución" o "agua sólida".

El agua "libre" u ordinaria se encuentra a más de 1 Å de la superficie de las partículas. Los intersticios contienen, pues, a partir de la superficie de las partículas, en primer lugar agua adsorbida, después agua más o menos viscosa hasta 1 Å y, a partir de esta distancia, agua libre y vapor de agua. Este "complejo de adsorción" tiene escasa influencia en los limos y en las arenas, pero su papel es fundamental en el comportamiento de las arcillas.

## **TEXTURA DEL SUELO**

Se refiere a la porción relativa de arena, limo y arcilla en el suelo. Específicamente la clasificación de texturas se basa en la cantidad de partículas menores de 2 mm de diámetro. Si las partículas mayores de 2 mm están presentes en cantidades significativas, al nombre de la textura se le agrega un adjetivo apropiado como gravoso o pedregoso. Las fracciones del suelo se denominan por separado, según su tamaño (arena, limo y arcilla). En la figura 3 [5] se muestra el triángulo de las diferentes clases de texturas del suelo mostrando los límites de arena, limo y arcilla.

La textura del suelo es una característica en extremo importante. Afecta las propiedades físicas, químicas y mecánicas. En términos generales, los suelos se dividen en suelos de textura gruesa y textura fina. En los suelos de textura fina predomina la arcilla y tiene una mayor superficie activa que los suelos arenosos; poseen mayor capacidad de adsorción. El espacio poroso en un suelo arenoso puede ser bajo, pero una gran porción está compuesta por poros grandes, los cuales son muy eficaces para el movimiento de agua y aire. El porcentaje de volumen ocupado por poros pequeños en suelos arenosos es bajo y por ello su baja capacidad de retención acuosa. En contraste, los suelos superficiales de textura fina tienen más espacio poroso y una porción relativamente grande de ellos se compone de poros pequeños lo que produce un suelo con mayor capacidad para retener el agua. El agua y el aire se mueven a través del suelo con dificultad, debido a que hay pocos poros grandes. Por lo tanto, el tamaño de los espacios porosos en los suelos puede ser tan importante como la cantidad total de poros.

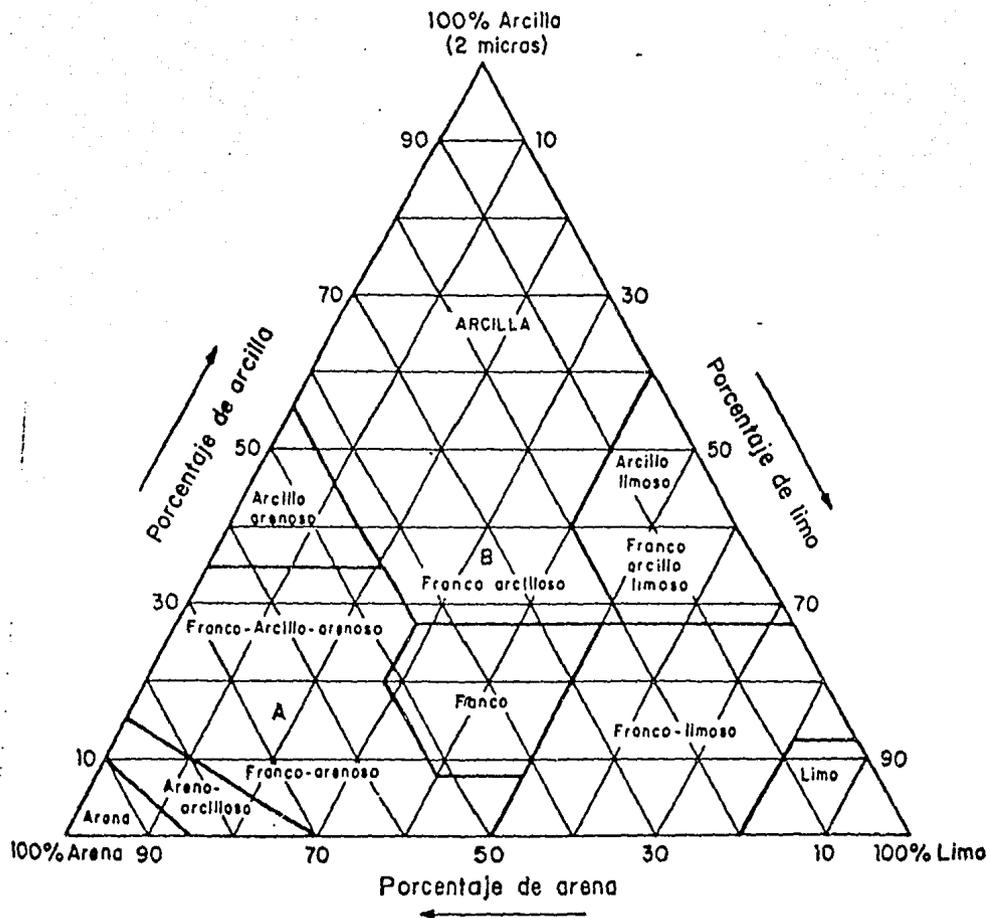


Fig. 3 Triángulo de texturas mostrando los límites de arena, limo y arcilla contenidos en las diferentes clases de suelos [5]

## **pH DEL SUELO**

La reacción del suelo o pH es quizá la característica del suelo más comúnmente medida. Es el criterio usado para juzgar si el suelo es ácido o alcalino. El pH para suelos ácidos varía comúnmente de 4 a 7 unidades. Valores más bajos de 4 se obtienen solamente cuando los ácidos libres están presentes. Valores arriba de 7 indican alcalinidad, aunque es posible que cantidades apreciables de "acidez del suelo", en términos de capacidad amortiguadora o dependiente del pH, puedan existir en suelos alcalinos. El pH del suelo es el resultado de reacciones químicas complejas donde se suceden disociaciones iónicas que, obrando en distintos sentidos, dan como resultado final el pH del suelo. La acidez del suelo se debe a varias fuentes como el humus o materia orgánica, arcilla aluminosilicatada, óxidos de hierro y aluminio hidratados, sales solubles y CO<sub>2</sub>.

## **2.3. PROBLEMATICA DE LOS COMPUESTOS TOXICOS LIXIVIABLES**

Se define como "lixiviado" al líquido que se ha percolado a través de un desecho sólido y que acarrea consigo materiales disueltos, coloidales o en suspensión. Puede decirse que, cuando la capacidad de adsorción se satura, una percolación adicional tiene el efecto de desplazar violentamente la cantidad de humedad. La humedad desplazada de esta manera es el "lixiviado".

En un buen diseño, un depósito debe contemplar la consideración de la generación potencial del "lixiviado", así como la forma en que se pueda canalizar una descarga de este tipo por medio de drenajes apropiados y colectores.

El proceso de lixiviación generalmente consta de las siguientes etapas: filtración, absorción, adsorción, precipitación química y acción bacteriológica.

Los principales problemas ambientales asociados con la disposición inadecuada de elementos tóxicos son daños al suelo y contribución a la contaminación del agua. Uno de los más serios problemas es probablemente el transporte de "lixiviados" que contienen metales pesados y otros compuestos tóxicos hacia el suelo y aguas profundas.

El término "metales pesados", según Wild [6], se refiere a los metales que tienen una densidad alta, usualmente entre 5 y 6 g/cm<sup>3</sup>. También se refiere a los metales que provienen de los desechos industriales de los cuales el metaloide arsénico As; cadmio, Cd; cromo, Cr; plomo, Pb; mercurio, Hg; níquel, Ni y zinc, Zn, son considerados como los elementos más peligrosos al ambiente. Las concentraciones de estos elementos en el suelo difieren grandemente por el tipo de rocas y las propiedades del suelo. En las rocas ígneas estos elementos se incorporan en la estructura de sus minerales cuando el magma se cristaliza. En las rocas sedimentarias, la concentración de estos elementos es determinada por los minerales que contienen y por la adsorción del agua que contiene sedimentos depositados. Los suelos reciben estos elementos químicos debido a la actividad volcánica, sobre todo arsénico, mercurio y selenio, y principalmente por la disposición de los desechos domésticos e industriales; así, la mayoría de los metales son depositados como desechos sólidos en los sitios de rellenos. En la tabla 2 se muestra la concentración promedio de los elementos, considerados como los más peligrosos, en la corteza terrestre y en el suelo.

**TABLA 2. CONCENTRACIONES PROMEDIO DE ALGUNOS ELEMENTOS PELIGROSOS [6]**

| ELEMENTO | CORTEZA TERRESTRE (µg/g) | ROCAS CON ALTA CONCENTRACION | SUELOS (µg/g) | SUELOS <sup>a</sup> (kg/ha) |
|----------|--------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|
| As       | 1.5                      | Lutita y arcillas            | 0.1-50        | 0.2-100                     |
| Cd       | 0.1                      | "                            | 0.01-2.4      | 0.02-4.8                    |
| Cr       | 100                      | Ultrabásica                  | 5-1500        | 10-3000                     |
| Cu       | 50                       | Básica                       | 2-250         | 4-500                       |
| Hg       | 0.05                     | Areniscas                    | 0.01-0.3      | 0.02-0.6                    |
| Ni       | 80                       | Ultrabásica                  | 2-1000        | 4-2000                      |
| Pb       | 14                       | Básica                       | 2-300         | 4-600                       |
| Zn       | 75                       | Lutita y arcillas            | 10-300        | 20-600                      |

<sup>a</sup>Concentración del elemento por hectárea calculada para un suelo de 15 cm de profundidad y una densidad de 1.3 g/cm<sup>3</sup>

Elementos tales como el arsénico, cadmio y selenio tienden a depositarse en las superficies de las partículas y llegan a causar problemas. La mayoría de los constituyentes de los "lixiviados" son insolubles y solo una fracción de materiales solubles son potencialmente peligrosos. Con una alta alcalinidad del agua en contacto con los "lixiviados" se inhibe la disolución de muchos metales

pesados. Los elementos que generalmente exceden las concentraciones permitidas en el "lixiviado" son el cromo y el selenio, pero su concentración puede reducirse con procesos de percolación.

Los "lixiviados" son diluídos a través del paso por el suelo ya que los procesos de adsorción que ocurren retardan el movimiento de los materiales potencialmente peligrosos hacia los mantos subterráneos.

La remoción efectiva de los "lixiviados" depende de las características mencionadas del suelo como son: textura, densidad, pH y materia orgánica entre otras. La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas y químicas en los suelos están gobernadas no solo por la composición química sino también por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren dichas reacciones. Las partículas de arena sirven como estructura alrededor de la cual está asociada la parte más activa del suelo. Así, las arenas aumentan el tamaño de los espacios porosos entre las partículas facilitando de esa manera el movimiento del aire y del agua. La fracción de arcilla en la mayoría de los suelos está compuesta de minerales que difieren en su composición y propiedades. La cantidad de arcilla en el suelo tiene una gran influencia sobre su capacidad total de retención de agua.

El uso de arcilla es un método favorable para la reducción o eliminación de percolaciones de "lixiviados", también el uso de membranas puede ser útil sólo que tiene un alto costo.

Lo importante en el control de movimiento de "lixiviados" es la eliminación de infiltraciones del agua superficial la cual contribuye al volumen del "lixiviado". Con el uso de una capa impermeable de arcillas, una adecuada inclinación de la superficie y un adecuado drenaje, la superficie de infiltración puede ser controlada.

De acuerdo con todo lo anterior las interacciones que pueden ocurrir entre los compuestos tóxicos lixiviables con el suelo son:

**REACCIONES DE INTERCAMBIO IONICO.** El intercambio se efectúa cuando una molécula cargada, presente en el "lixiviado", pasa a través de una partícula de suelo, la cual está cargada opuestamente. Por ejemplo, las arcillas y los materiales orgánicos poseen una gran cantidad de campos que tienen cargas opuestas debido a sus estructuras moleculares. Lo que sucede muy a menudo es que estos campos se ocupan con los iones que van con una percolación natural de agua o humedad a través del suelo lo que limita un poco la adsorción de los "lixiviados". Se puede medir escalarmente la cantidad de partículas cargadas positivamente que pueden ser adsorbidas por los

minerales arcillosos o, en general, suelos con moléculas cargadas negativamente. La particularidad de retener partículas cargadas en las arcillas es muy importante, no sólo en el mecanismo de renovación del "lixiviado" sino también en el aumento de fertilidad de los suelos. El proceso de intercambio catiónico es potencialmente capaz de retener la mayoría de los iones contaminantes.

**PRECIPITACION QUIMICA.** Como resultado de las acciones bacteriológicas o químicas que tienen lugar durante el curso de la percolación a través del suelo, algunos constituyentes del "lixiviado", inicialmente en solución, pueden ser precipitados en una forma insoluble; el precipitado normalmente se desplaza hacia el fondo de la superficie que lo contiene. Las sales insolubles son fácilmente filtradas a través de las capas del suelo. El factor principal de las condiciones de precipitación es el pH. En general, mientras más alto es el pH en el complejo suelo-humedad, mayor será la tendencia a que tenga lugar la precipitación [7].

**INTERACCIONES CON MICROORGANISMOS.** Ciertos materiales como el hierro, manganeso y cobre son esenciales en el metabolismo para sintetizar biogás de los microorganismos del suelo. El orden decreciente de toxicidad de metales para las bacterias es  $\text{Ag} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zr} > \text{Pb} > \text{Be} > \text{Cr}^{3+} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Li}$  [7].

**VARIABLES EXTERIORES.** Existen factores tales como la temperatura, humedad, oxígeno y el sol que pueden afectar los factores del suelo. La humedad puede afectar la adsorción y el intercambio iónico de los "lixiviados". La falta o exceso de oxígeno puede generar reacciones de óxido-reducción con los microorganismos degradantes.

Son diversas las variables que pueden interaccionar para cambiar la calidad y cantidad de los "lixiviados". Los parámetros que generalmente influyen en la composición del "lixiviado" son las sales orgánicas e inorgánicas, metales pesados, plaguicidas, compuestos químicos y/o tóxicos, pH, virus y bacterias patógenas .

## ***CAPITULO III***

# ***RECUBRIMIENTOS DE FONDO DE LOS ALMACENES***

Como se mencionaba en los dos primeros capítulos, es común que los depósitos que contienen desechos sólidos o líquidos requieran un recubrimiento para controlar las pérdidas de compuestos tóxicos que pudieran contaminar el área circundante o hacer fallar alguna instalación. Ciertos tipos de recubrimientos reducen, además, la erosión de los bordos debida a la acción del oleaje o de la lluvia y sirven de protección contra la socavación de zapatas y cimentaciones de los elementos estructurales que se encuentren dentro del almacenamiento. Para analizar las posibilidades de éxito de un sistema de impermeabilización, es necesario considerar que el recubrimiento y el medio en que se instalan trabajan en conjunto. El punto más importante es que el recubrimiento se coloca sobre una base estable aún en estado saturado. Los recubrimientos más comunes son las membranas orgánicas y las arcillas.

### 3.1. MEMBRANAS ORGANICAS

Las membranas sintéticas orgánicas [8] pueden clasificarse en dos grandes grupos: las fabricadas a base de plásticos y las hechas con elastómeros. Estas membranas son las más populares cuando se busca obtener una permeabilidad prácticamente nula. Se adquieren en grandes hojas que facilitan su instalación. Si se seleccionan e instalan adecuadamente, estas membranas pueden resistir el ataque de la mayoría de los productos químicos y dan lugar a infiltraciones muy bajas.

Bajo la denominación de plásticos se incluyen usualmente el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno (PE) y sus derivados; el término elastómeros se aplica al hule butilo, etilenopropileno (EPT), dieno-etilenopropileno (EPDM) y el policloropreno (neopreno).

El polietileno es un material relativamente económico, con las desventajas de ser poco resistente a la abrasión, susceptible a la luz solar (por lo que requiere de una cubierta de suelo; esto sucede en la mayoría de las membranas) y depende fundamentalmente del acondicionamiento del suelo para evitar rupturas y el traslape de juntas para evitar fugas. A medida que la película de polietileno aumenta su espesor se hace más rígida a tal punto que una película de 8 mm es casi el límite práctico de su utilización como recubrimiento. El material es resistente a casi todo, sin embargo tiene baja resistencia a los hidrocarburos y a los aceites. El polietileno clorosulfonado resiste ataques químicos, clima adverso y no requiere cubierta protectora pero presenta problemas en el curado; en México se le conoce como "Hypalon".

El PVC es ligeramente más económico que el polietileno, presenta susceptibilidad al envejecimiento y a la luz solar y por ello no se debe usar expuesto directamente a la atmósfera, salvo en instalaciones temporales (menos de dos años). Si se minimiza la intemperización con una cubierta y su espesor es superior a 0.25 mm, el PVC se considera satisfactorio.

El hule butilo proviene de una reacción de copolimerización. En una de las mayores instalaciones realizadas en el mundo se usó un recubrimiento de este material. Dentro de esta misma categoría se encuentra el etilenopropileno (EPT) y el monómero dieno-etileno propileno (EPDM). Este último es el único material que puede emplearse para altas temperaturas (de 80 a 100 grados).

El neopreno es un producto cuyo costo es alto, presenta una buena resistencia a los hidrocarburos, ácidos y otros productos

químicos. Se fabrica con espesores de 20 y 45 mm.

La selección del tipo de membrana para una obra en particular debe tomar en cuenta múltiples factores. A continuación se presenta los principales criterios de selección en orden decreciente de importancia:

1. Alta resistencia a la tensión, flexibilidad y elongación sin falla.
2. Resistencia a la abrasión, al punzonamiento y a los efectos de agua de desecho.
3. Buena resistencia al intemperismo.
4. Inmunidad al ataque de bacterias y hongos.
5. Densidad  $> 1$ .
6. Color: negro (para absorber rayos ultravioletas).
7. Espesor mínimo: 0.4 mm.
8. Composición uniforme y ausencia de defectos físicos.
9. Resistencia a variaciones de temperatura y a condiciones ambientales.
10. Fácil reparación.
11. Económico.

### 3.2. ARCILLAS

Las arcillas están formadas por granos finos ( $5 \mu$  a  $2 \mu$ ), elementos muy finos ( $2 \mu$  a  $0.2 \mu$ ) y partículas coloidales (inferiores a  $0.2 \mu$ ), estas últimas tienen actividad superficial considerable. Todas estas partículas están formadas por "minerales arcillosos": caolinita, illita y montmorillonita o bentonita, que son silicatos de aluminio, manganeso o hierro cristalizados. Estos elementos se agrupan en capas sucesivas formando estructuras arracimadas. El espesor de las mismas y de su agua asociada es de  $7 \text{ \AA}$  para la caolinita,  $10 \text{ \AA}$  para la illita y  $14 \text{ \AA}$  para la montmorillonita. Algunas de las propiedades esenciales de las partículas más finas de las arcillas son [5]:

- a) Están cargadas negativamente en su superficie y se desplazan en zig-zag, con un movimiento browniano, excepto las partículas más pesadas que se sedimentan.
- b) Si se añade un electrólito a la solución, las partículas se vuelven inertes y se depositan dando lugar a estructuras floculares. Si se realiza una consolidación progresiva de la arcilla, ejerciendo una presión creciente en la superficie del medio arcilloso, los flóculos se transforman en una estructura más compacta.

- c) Una vez consolidada con una presión inferior a  $10 \text{ kg/cm}^2$ , la arcilla puede ser arrollada en pequeños cilindros dentro de un cierto intervalo de humedades, lo que define su dominio plástico.
- d) La cohesión de la arcilla se debe a la interacción de las capas adsorbidas.

Las partículas arcillosas están cargadas de electricidad negativa en su superficie lateral, pero también poseen electricidad positiva en sus extremos. Por otra parte, es posible que la cohesión de los suelos no se deba esencialmente a la interacción de las capas adsorbidas sino a las fuerzas atractivas o repulsivas de naturaleza eléctrica. Por esta razón la arcilla seca compacta posee cohesión incluso en ausencia total de agua libre o adsorbida.

Un recubrimiento de arcilla [9] consiste en una o más capas de suelo cohesivo compactado para disminuir la permeabilidad. El propósito de un recubrimiento de arcilla para un desecho es servir como una barrera entre los materiales de desecho y el medio ambiente hidrogeológico reduciendo la filtración por su baja permeabilidad y dando un soporte al almacenamiento.

Un recubrimiento de arcilla es usualmente construido de suelo natural que contiene cantidades apreciables de partículas de arcilla; en algunos casos otros materiales, como bentonita, son mezclados con el suelo cuando este no contiene suficiente cantidad de arcilla. Estos recubrimientos son diseñados para demorar la descarga de "lixiviado" el mayor tiempo posible y tener una estructura lo suficientemente estable que le dé soporte al depósito. Debe tenerse en cuenta que ningún material es completamente impermeable y, por tanto, una cantidad de "lixiviado" entrará al subsuelo, la cual depende de la calidad del material que se use, la forma de colocación y el acondicionamiento del suelo. Estos dos últimos puntos son de especial relevancia ya que debe calcularse si el peso del depósito puede provocar movimientos o fracturas de la capa básica de arcilla, que favorezcan la penetración del "lixiviado". La arcilla se recomienda cuando existe ese material cerca de la zona de aplicación. Se logran permeabilidades de  $10^{-7}$  a  $10^{-10}$  m/s. Es susceptible a fracturas y movimientos del terreno.

Los aspectos fundamentales que deben considerarse para el diseño de un recubrimiento de arcillas son:

1. Estabilidad del recubrimiento contra movimientos del suelo como fallas, asentamientos y elevaciones (movimientos telúricos).
2. Resistencia al flujo de fluidos (por ejemplo, permeabilidad).
3. Compatibilidad del material del recubrimiento con los desechos que contiene.

#### 4. Durabilidad del recubrimiento.

El sistema de recubrimiento con el más largo registro de operación exitosa es el de arcilla compactada. Además, este tipo de recubrimiento resulta frecuentemente ser el más económico. Una capa de arcilla nunca es totalmente impermeable, por lo que deja pasar una cantidad limitada de líquido. Estas infiltraciones pueden ser inferiores a las que se presentan con otros sistemas más costosos a consecuencia de defectos de instalación o de fabricación. La clave del éxito de esta técnica está en la selección adecuada del tipo de suelo, en su preparación y el método de colocación [9]. En la figura 4 se muestra el diseño de un sistema de recubrimiento.

### 3.3. ATENUACION

Es la disminución temporal o permanente de la concentración de soluto transportado a través del suelo, debido a procesos físicos, químicos y biológicos. Las reacciones químicas y biológicas pueden producir precipitación y filtración de algunos elementos, adsorción e intercambio catiónico de solutos iónicos y polares en las superficies de la arcilla mineral o la degradación de formas orgánicas activas a inertes. Varios mecanismos de atenuación son reversibles y dependen de la concentración y de cambios en la química, pH y temperatura. El orden de atenuación en las arcillas, de mayor a menor, es: montmorilonita, illita y caolinita.

Con estas bases sobre almacenes de residuos industriales, propiedades del suelo, problemática de los compuestos tóxicos lixiviables y tipo de recubrimientos para almacenes, en el próximo capítulo se presentan las características de un residuo particular, las cenizas provenientes de la combustión de carbón usado para generar energía eléctrica.

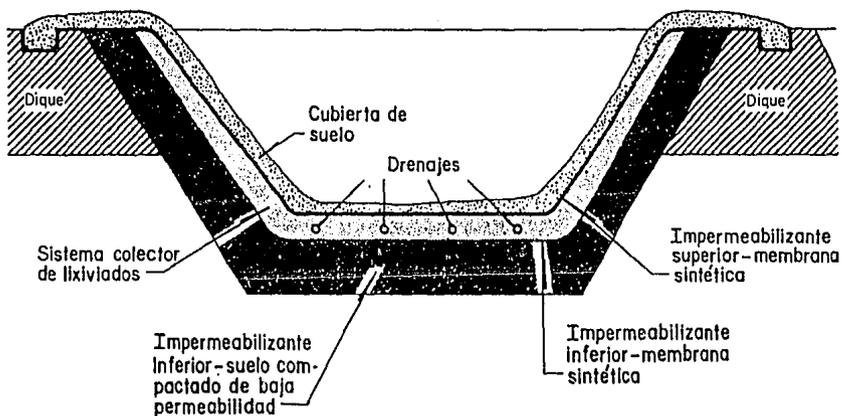


Fig. 4 Sección transversal de un sistema de recubrimiento [9]

## ***CAPITULO IV***

# ***CENIZAS PRODUCIDAS EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA***

La operación de las centrales termoeléctricas (CT) para la producción de energía eléctrica implica la generación de calor a partir de carbón, petróleo u otro combustible para producir vapor de agua pura. El vapor se utiliza para accionar turbinas que a su vez están acopladas a los generadores. Después de accionar las turbinas, el vapor se condensa y se vuelve a utilizar como agua de alimentación de calderas, mientras que las cenizas recuperadas de los gases de combustión y del fondo de los generadores de vapor se almacenan en silos para su almacenamiento o posterior disposición final.

Las cenizas arrastradas por los gases de combustión pueden ser retiradas con la utilización de un lavador de gases, un precipitador electrostático o separadores ciclónicos. Los separadores de ciclón apartan las cenizas de los gases, se añade agua a dicha ceniza y la mezcla se bombea a un depósito de decantación. La ceniza se sedimenta y el agua se separa.

En la figura 5 se muestra un diagrama de flujo del manejo del carbón en una central termoeléctrica.

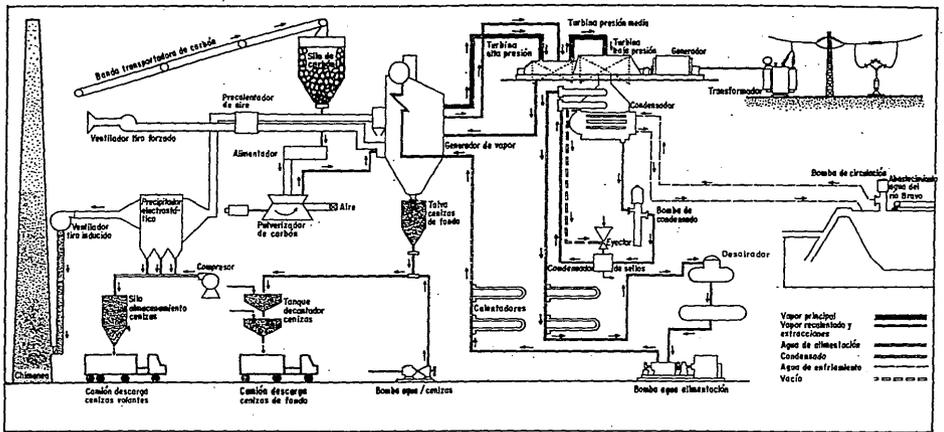


Fig.5 Diagrama de flujo del manejo de carbón en una central termoelectrica [1]

## 4.1. TIPOS DE CARBON

El carbón mineral es un compuesto heterogéneo, cuyos componentes principales son: carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, nitrógeno y minerales incombustibles que constituyen las cenizas. Los tipos de carbón que generalmente se utilizan, clasificados de acuerdo a su origen, son: antracita, bituminoso, subbituminoso y lignito [10].

Los carbones bituminosos están clasificados, en cuanto a su tipo, por la relativa cantidad de constituyentes petrográficos "antraxilón" (del griego "anthrax", carbón) y materia "atrita" (del latín "attritus", que tiene atricción) o finamente dividida. En los carbones "bandeados", ambos constituyentes se presentan en proporción variada. Los carbones no bandeados son las hullas grasas y el lignito. El carbón bituminoso es el más importante y el más utilizado como combustible. Los carbones bituminosos con contenidos bajos de compuestos volátiles se denominan carbones semibituminosos. Por los altos porcentajes de carbono fijo que contienen producen poco humo durante la combustión. La antracita se denomina comúnmente como "carbón duro" por sus características de resistencia y dureza y se distingue por su apariencia lustrosa y textura uniforme, arde lentamente y a altas temperaturas. La antracita es primariamente un combustible doméstico; su producción ha disminuido debido al aumento del consumo de aceites, carbón bituminoso y gas.

Generalmente el costo del carbón es menor que el costo del combustóleo o gas natural y este es el motivo primordial de su uso. El carbón es el más abundante y también el más complicado y problemático en su manejo de los combustibles. Su uso implica instalaciones de almacenamiento y manejo, preparación antes de quemarlo usando trituradores o pulverizadores, equipo de eliminación de ceniza y recolectores de polvo. Los factores más importantes que se deben considerar para cada carbón son: poder calorífico, características y contenido de las cenizas [10]. En la tabla 3 se muestran los principales tipos de carbón, con sus características y el % de cenizas que contienen.

En la tabla 4 se muestran las características fisicoquímicas del carbón utilizado en la Central Termoeléctrica (CT) de Río Escondido, ubicada en el estado de Coahuila, México [11].

**TABLA 3. TIPOS DE CARBON [10]**

| CLASE             | %<br>CARBONO<br>FIJO | %<br>MATERIA<br>VOLATIL | PODER<br>CALORIFI-<br>CO, kJ/kg | % CENIZA | CARAC-<br>TER  |
|-------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|----------|--|
| Antracita         | 92-98                | 2-8                     | -----                           | 4-19     | seco y no<br>aglomerante                                       |
| Bitumino-<br>so   | 69                   | 31                      | 32,512                          | 3-32     | No se altera<br>por los<br>agentes<br>atmosféricos.            |
| Subitumi-<br>noso | -----                | -----                   | 22,062-<br>25,544               | 3-16     | No<br>aglomerante.<br>Alterado por<br>agentes<br>atmosféricos. |
| Lignito           | -----                | -----                   | 19,274                          | 4-19     | -----  |

## 4.2. PROPIEDADES DE LAS CENIZAS

Las cenizas residuales se dividen en ceniza volante y ceniza de fondo o de escorias de calderas. La ceniza volante es la que es arrastrada con los gases de combustión y se retiene en un colector o en un precipitador electrostático. La ceniza de fondo es creada de partículas fundidas las cuales son lo suficientemente pesadas para no salir con la corriente de gases de combustión y son recolectadas en el fondo del quemador. La división de cenizas es importante ya que los constituyentes peligrosos que contengan van a variar según su tipo.

### PROPIEDADES FISICAS

La ceniza volante consiste principalmente de pequeñas esferas vídriosas; las cuales tienen un diámetro de 0.5 a 100 micras. Tienen un color brillante que va de gris a negro, siendo el color más intenso a medida que aumenta el contenido de carbón. El pH varía generalmente de 8 a 12. La ceniza volante tiene un material silíceo que no tiene valor para cementos, pero en presencia de humedad puede reaccionar químicamente con hidróxidos y formar componentes cementantes.

**TABLA 4. CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS PROMEDIO DE LOS CARBONES DE RIO ESCONDIDO [11]**

|   |                 |                  |
|---|-----------------|------------------|
| <b>CARBON ANALISIS PRIMARIO</b>                       |                 | <b>% PESO</b>    |
| Humedad total   |                 | 4.16             |
| Materia volátil                                       |                 | 30.50            |
| Ceniza  |                 | 33.27            |
| Carbono fijo  |                 | 32.07            |
| Poder calorífico superior, J/g                        |                 | 19,149           |
| <b>ANALISIS ELEMENTAL</b>                             |                 | <b>% PESO</b>    |
| Hidrógeno   |                 | 3.49             |
| Carbono   |                 | 47.20            |
| Nitrógeno   |                 | 1.23             |
| Oxígeno   |                 | 9.59             |
| Azufre  |                 | 1.01             |
| Cloro   |                 | 0.05             |
| <b>CENIZA ANALISIS MINERAL</b>                        |                 | <b>% PESO</b>    |
| Hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 |                 | 4.34             |
| Calcio CaO  |                 | 0.31             |
| Magnesio MgO  |                 | 1.01             |
| Sodio Na <sub>2</sub> O                               |                 | 0.83             |
| Potasio K <sub>2</sub> O                              |                 | 0.80             |
| Sílice SiO <sub>2</sub>                               |                 | 63.03            |
| Aluminio Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               |                 | 27.36            |
| Titanio TiO <sub>2</sub>                              |                 | 0.77             |
| Fósforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                 |                 | 0.09             |
| Azufre SO <sub>3</sub>                                |                 | 0.25             |
| Otros   |                 | 1.21             |
| <b>OTRAS DETERMINACIONES Y CONCEPTOS PRELIMINARES</b> |                 | <b>% PESO</b>    |
| Humedad de equilibrio                                 |                 | 6.0              |
| Índice de expansión libre                             |                 | 1.0              |
| Índice de molienda                                    |                 | 53               |
| Razón de sílice                                       |                 | 0.92             |
| Relación base/ácido                                   |                 | 0.08             |
| Factor de escoriación                                 |                 | 0.03             |
| Azufre (sulfato)                                      |                 | 0.05             |
| Azufre (pirítico)                                     |                 | 0.39             |
| Azufre (orgánico)                                     |                 | 0.38             |
| <b>PUNTO DE FUSION DE LA CENIZA EN °C</b>             |                 |                  |
| <b>ATMOSFERA</b>                                      | <b>OXIDANTE</b> | <b>REDUCTORA</b> |
| Deformación inicial                                   | 1505            | 1512             |
| Temperatura de suavizado                              | 1517            | 1517             |
| Temperatura hemisférica                               | 1517            | 1517             |
| Temperatura de fluido                                 | 1517            | 1517             |

La ceniza de fondo está formada por materia sólida de calderas de fondo seco o de fondo húmedo. En el primer caso son partículas angulares de color gris o negro. Las cenizas de fondo seco tienen superficies porosas y reflectoras. Las escorias de caldera consisten en partículas angulares negras con una apariencia lisa y brillante. Las cenizas de fondo son más grandes que las volantes.

## **CONSTITUYENTES QUIMICOS**

Los constituyentes inorgánicos de las cenizas son los mismos que se encuentran en las rocas y en el suelo. Los mayores componentes son óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. Estos compuestos comprenden el 90% de la composición de las cenizas

## **ELEMENTOS TRAZA**

Varios de los elementos traza que conciernen al ambiente tienden a estar asociados con las superficies de las partículas. El As, Se, Cd y Zn se ubican principalmente en la capa superficial, el Cr, Cu y Pb están igualmente distribuidos en el centro que en la superficie y el Ni se asocia al centro de la partícula. En general, la concentración de estas trazas puede llegar a ser alta y depende de la calidad del carbón. Así, las características de los "lixiviados" depende de la solubilidad de estos metales en los estanques de almacenamiento.

En la tabla 5 se muestran las características fisicoquímicas de las cenizas (volantes y de fondo) producidas por la Central Termoeléctrica (CT) de Rfo Escondido [12].

## **APLICACIONES**

Las cenizas pueden utilizarse como ingrediente puzolánico (de Puzol, pueblo de Italia) en el cemento "portland", para preparar áridos de poco peso, como relleno mineral en pavimentos de asfalto, como sustituto de cemento en el hormigón, como relleno para la mejora de tierras, como lechada en los pozos petrolíferos, como acondicionador del suelo para la agricultura, para fabricar ladrillos, como material de obstrucción en las capas de asiento de carreteras, en el asfalto para tejados y revestimientos y como coagulante en el tratamiento de aguas residuales.

## SISTEMA DE MANEJO DE CENIZAS

La materia residual de la combustión comprende los minerales incombustibles del carbón o cenizas y los rechazos de los pulverizadores. La ceniza de fondo se colecta debajo del hogar de la caldera en el precalentador de aire, mientras que la ceniza volante es colectada en las tolvas de los precipitadores electrostáticos. Ambos tipos de cenizas, luego de su colección, son transportadas a un punto común donde son combinadas para su disposición final. Los materiales rechazados por los pulverizadores se unen con la ceniza de fondo.

### 4.3. CANTIDADES PRODUCIDAS

Para estimar la producción de cenizas totales generadas, se deben considerar los siguientes parámetros: capacidad instalada de la planta (MW), factor de servicio, poder calorífico (kJ/kg), eficiencia térmica (kJ/kWh), ceniza de fondo, ceniza volante, eficiencia del precipitador electrostático, densidad de la ceniza de fondo y de la ceniza volante y la densidad promedio ponderada. Así se tiene lo siguiente:

Consumo anual de carbón(ton/año):

$$\begin{aligned} & (\text{capacidad instalada, kW}) * (\text{días/año}) * (\text{horas/días}) * (\text{factor de servicio}) \\ & * (\text{eficiencia térmica, kJ/kWh}) * (1/\text{poder calorífico, kg/kJ}) \end{aligned}$$

Cenizas producidas:

$$\text{ceniza total} = (\text{consumo de carbón}) * (\% \text{ cenizas})$$

$$\text{ceniza de fondo recuperada} = (\text{ceniza total}) * (\% \text{ ceniza de fondo})$$

$$\begin{aligned} \text{ceniza volante recuperada} &= (\text{ceniza total}) * (\% \text{ de ceniza volante}) \\ &* (\text{eficiencia del precipitador}) \end{aligned}$$

$$\text{ceniza arrojada a la atmósfera} = (\text{ceniza total}) * (\% \text{ ceniza volante}) * (1 - \text{eficiencia del precipitador})$$

$$\text{ceniza para disposición final} = (\text{ceniza total} - \text{ceniza arrojada})$$

$$\begin{aligned} \text{volumen de cenizas totales} &= (\text{ceniza para disposición}/\text{densidad} \\ &\text{promedio ponderada}) \end{aligned}$$

Generalmente se producen cenizas equivalentes del 20 al 25% del carbón quemado.

**TABLA 5. CARACTERISTICAS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO PRODUCIDAS POR LA CENTRAL TERMoeLECTRICA (CT) RIO ESCONDIDO [12]**

| <b>CENIZAS VOLANTES</b>                |                                | <b>% PESO</b> |
|--|--------------------------------|---------------|
| Sílice                                 | SiO <sub>2</sub>               | 62.10         |
| Alúmina                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.25         |
| Sesquióxido de hierro                  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.00          |
| Anhídrido titánico                     | TiO <sub>2</sub>               | 1.05          |
| Cal                                    | CaO                            | 1.90          |
| Magnesia                               | MgO                            | 1.00          |
| Oxido de potasio                       | K <sub>2</sub> O               | 1.40          |
| Oxido de sodio                         | Na <sub>2</sub> O              | 0.80          |
| Anhídrido sulfúrico                    | SO <sub>3</sub>                | 1.35          |
| Masa volumétrica                       |                                | 2.05          |
| Humedad                                |                                | 0.15          |
| Pérdidas por llama                     |                                | 1.65          |
| Superficie específica                  |                                | 3522          |
| <b>CENIZAS "SINTERIZADAS" DE FONDO</b> |                                | <b>% PESO</b> |
| Sílice                                 | SiO <sub>2</sub>               | 62.8          |
| Alúmina                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 24.8          |
| Sesquióxido de hierro                  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.6           |
| Anhídrido titánico                     | TiO <sub>2</sub>               | 1.6           |
| Cal                                    | CaO                            | 2.0           |
| Magnesio                               | MgO                            | 1.0           |
| Oxido de potasio                       | K <sub>2</sub> O               | 1.5           |
| Oxido de sodio                         | Na <sub>2</sub> O              | 0.9           |
| Anhídrido sulfúrico                    | SO <sub>3</sub>                | 0.4           |
| Pérdidas por llama                     |                                | 0.2           |

#### **4.4. ALMACENES USADOS**

Para la disposición final de cenizas generalmente se usan métodos de eliminación de cenizas por vía húmeda en estanques de tierra o de vía seca usando métodos de rellenos.

Para la disposición en estanques de tierra generalmente se utiliza un sistema húmedo para acarrear la ceniza a los estanques y el agua utilizada puede ser reciclada o descargada. Estos sistemas trabajan más fácilmente si usan sistemas con fuerzas gravitacionales. En algunos casos es útil construir estanques con cuencas inclinadas para mejor manejo de las cenizas y un rápido deshidratado de ellas. Estos estanques consisten en una capa de arcilla con un dique en la parte central para evitar infiltraciones, también incluyen estructuras de concreto para soportar las tuberías. Estos estanques deben ser lo

suficientemente grandes para que existan las condiciones aerobias en la superficie y la instalación de aireadores mecánicos para el control de olores.

Las técnicas de relleno varían de acuerdo a su utilidad y pueden consistir en un simple relleno o un depósito no cubierto en donde sólo se requiere compactar la ceniza para depositarla. Algunas CT llegan a reducir al mínimo los "lixiviados" usando estas técnicas. Las áreas tales donde hay grava en desuso u hoyos de arcilla o tierra profunda pueden ser adecuados para la disposición de las cenizas. Las cenizas pueden ser mezcladas con agua y ser bombeadas hasta estos puntos de disposición si se encuentran en un área cercana, pero para grandes distancias las cenizas se tienen que transportar en vehículos adecuados. En estos depósitos el suelo se usa como una cubierta tradicional para depósitos de residuos sólidos y se le da una pendiente para canalizar las corrientes de agua y evitar la infiltración.

Para este sistema de disposición se requiere el uso de capas impermeabilizantes para reducir el "lixiviado" al acuífero; sin embargo, las características de tipo y espesor varían de acuerdo con el sistema de disposición. Otros materiales comunes para impermeabilizar pueden ser el polietileno, cloruro de polivinilo (PVC), concreto y asfalto.

Debe tenerse en cuenta que ningún material es completamente impermeable y por tanto una cantidad de "lixiviado" entrará al subsuelo, la cual depende de la calidad del material que se use, la forma de colocación y el acondicionamiento del suelo. Estos dos últimos puntos son importantes ya que debe estimarse si el peso del depósito puede provocar movimientos o fracturas de la capa básica de arcilla, que favorezca la penetración del "lixiviado". En consecuencia, en estos depósitos se considera el uso de un sistema colector de "lixiviados" con la finalidad de monitorearlos. La construcción de estos sistemas consiste en la excavación de una zanja, la colocación de tubos perforados y la cobertura de tubos con grava. Los sistemas usados en Estados Unidos de América consisten generalmente en tubos centrales de 20 a 30 cm de diámetro con tubos laterales de 10 a 15 cm. Los "lixiviados" son conducidos por gravedad, generalmente a una central de bombeo para su extracción y posterior tratamiento, estabilización y disposición controlada.

## 4.5. LIXIVIADOS DE LAS CENIZAS

La constitución de "lixiviados" de cenizas se ha tratado de determinar mediante pruebas y experimentos, así como por muestreos en la base de los depósitos.

Harris y Silberman [13] realizaron un estudio de "lixiviados" de elementos traza de cenizas usando una especie de suero canino. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

Estos lixiviados consisten entre el 40 y 90% de Co, Ni, Cu y Zn y consecuentemente entre 60 y 10% de Al, Fe, V y Pb. Comúnmente, las cenizas de carbón consisten primariamente en compuestos de silicato de aluminio por el alto nivel de aluminio y silicio. Así, el contenido de elementos traza va a depender de la composición del mineral del combustible utilizado [13].

**TABLA 6. ANALISIS DE LIXIVIADOS DE CENIZAS POR SUERO CANINO [13]**

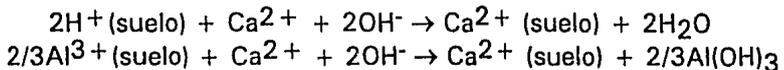
| ELEMENTOS PRINCIPALES | CONCENTRACION EN LAS CENIZAS |
|-----------------------|------------------------------|
|                       | %                            |
| Aluminio              | 29.05                        |
| Calcio                | 4.93                         |
| Fierro                | 6.68                         |
| Magnesio              | 1.31                         |
| Silicio               | 56.01                        |
| ELEMENTOS TRAZA       | $\mu\text{g/g}$              |
| Arsénico              | 42.3                         |
| Cobalto               | 3.61                         |
| Cromo                 | 17.5                         |
| Cobre                 | 53.5                         |
| Manganeso             | 8.74                         |
| Níquel                | 10.2                         |
| Plomo                 | 2.26                         |
| Vanadio               | 21.5                         |
| Zinc                  | 437                          |

Sakata [14] también hizo un estudio de lixiviados de cenizas encontrando que las cenizas generan alta cantidad de "lixiviados" alcalinos que contienen Ca, Mg, K, Na, y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La distribución de la concentración de estas sustancias y del pH a través del suelo muestran que las cenizas de carbón producen "lixiviados" alcalinos formados por compuestos de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  los cuales forman una corriente descendente con el agua "filtrante".

El contenido de calcio de una muestra obtenida de un depósito fue menor que el contenido de calcio de una muestra de cenizas antes de ser depositada. Esta diferencia puede deberse a la transformación de óxido de calcio soluble en agua a carbonato de calcio por presencia de dióxido de carbono del ambiente.

Los "lixiviados" de las cenizas de carbón se mueven corriente abajo a través de la capa del suelo. La velocidad promedio de infiltración es de 20 cm/año.

El pH de las capas de suelo está en un intervalo de 5.7 a 8.1. La distribución vertical del pH y el intercambio de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  en las capas del suelo muestran que la neutralización de los "lixiviados" alcalinos es debida a un intercambio iónico de compuestos de  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  contenidos en el suelo con el  $\text{Ca}^{2+}$  contenido en los "lixiviados" de cenizas y que la neutralización ocurre entre la interfase del suelo y las cenizas. Las reacciones que ocurren son:



También los compuestos de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  de los "lixiviados" son adsorbidos por la capa de suelo a través de un intercambio iónico.

Otras características importantes de la ceniza son el tamaño y área superficial. Se tiene conocimiento de que la concentración de As, Si, Cd, Zn, Cu, Ni, Mo, Se, Sb y Pb aumenta marcadamente conforme disminuye el tamaño de partícula. Estos elementos traza llegan a concentrarse sobre partículas más pequeñas por tener mayor área superficial [15].

Fruchter y Zachara [16] realizaron un estudio del comportamiento de elementos producidos por la ceniza volante y de fondo como As, B, Cd, Cr, Cu, Mo, Se, Zn y S. De acuerdo a esto, mencionan que los constituyentes mayores de los "lixiviados" son aluminio, calcio, azufre, hierro y silicio; como constituyentes menores están: bario, estroncio, cromo y cobre y como elementos traza están: arsénico, bario, cadmio, molibdeno y selenio. Los resultados experimentales mostraron que las concentraciones de Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, S, Si y Sr están controladas por reacciones específicas de solubilidad que se llevan a cabo formando los diferentes compuestos mostrados en la tabla 7. Los elementos traza aparentemente no pueden ser controlados con este tipo de reacciones ya que en el estudio realizado más bien se presentaron fenómenos de precipitación y adsorción.

**TABLA 7. COMPUESTOS FORMADOS POR ELEMENTOS DE LIXIVIADOS [16]**

| ELEMENTO | COMPUESTO   |
|----------|---|
| Al       | Al(OH) <sub>3</sub> (am) (pH 6-9)<br>Al(OH) <sub>3</sub> (c) (pH > 9) |
| Fe       | Fe(OH) <sub>3</sub> (am)  |
| Ca, S    | CaSO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O                                 |
| Ba, Sr   | (Ba,Sr)SO <sub>4</sub>  |
| Cu       | CuO(c)  |
| Cr       | Ba(S, Cr)O <sub>4</sub>   |

Francis y Boegly [17] en su estudio sobre "lixiviados" muestran que los compuestos de mayor cantidad son Fe y Al en un 10% y Si en un 20% y forman una alta concentración de sulfatos (5000-10000 mg/L).

De acuerdo a Silva *et. al.* [15] se realizó un estudio de muestreo de las cenizas depositadas en la planta termoeléctrica de Rfo Escondido. Se tomaron muestras en cuatro estratos representativos del depósito con las siguientes profundidades:

| Horizonte | Profundidad          | Punto de muestreo |
|-----------|----------------------|-------------------|
| A         | 0 a 20 cm            | 10 a 15           |
| B         | 20 a 30 cm           | 22 a 28           |
| C         | 30 a 190 cm          | 55 a 70           |
| D         | 190 a 600 cm         | 190 a 220         |
| NF        | Nivel freático a 6 m |                   |

Los análisis se realizaron mediante los métodos de difracción de rayos X, microscopio electrónico y absorción atómica. Los resultados de los minerales encontrados fueron: óxido de silicio (57.18%), óxido de aluminio (29.9%) y óxido de calcio (2.02%) y de los elementos detectados en la ceniza volante, donde predominan las esferas pequeñas (2 a 10  $\mu$ m), mostraron que la concentración de elementos como As, Ba y Cr es mayor que en la ceniza de fondo y que la lixiviación del As es mayor en la ceniza volante, favorecida por la posición de éste en la superficie de las partículas. El Ba se encuentra en mayor concentración en la ceniza volante; sin embargo, se tiene mayor contenido en el "lixiviado" de la ceniza de fondo, influenciado por el tamaño y la forma de sus partículas. El análisis químico se muestra en las tablas 8 y 9 [15].

**TABLA 8. ANALISIS QUIMICO DE LA CENIZA VOLANTE [15]**

| ELEMENTO | "LIXIVIADO"<br>mg/L | TOTAL<br>mg/kg |
|----------|---------------------|----------------|
| Ba       | <0.003              | 50.88          |
| Cd       | <0.004              | 0.26           |
| Cr       | <0.01               | 2.47           |
| As       | 0.113               | 8.52           |
| Hg       | <0.001              | <0.02          |
| Ag       | <0.001              | 0.03           |
| Pb       | <0.03               | 2.96           |
| Se       | <0.002              | <0.04          |
| Sb       | <0.02               | <0.4           |

Por otra parte, la morfología de las cenizas determina las cantidades de metales traza que pueden lixiviar y solubilizar por los porcentajes relativos de cenósferas y plerósferas. Las cenósferas son esferas pequeñas que tienden a flotar, determinan la cantidad de material suspendido en el agua y son la fuente principal de elementos traza solubles. Las plerósferas, que son esferas grandes y huecas o rellenas, son pesadas pero igualmente responsables de la mayoría de las partículas suspendidas; su contribución disminuye con el tiempo ya que tiende a sedimentarse.

**TABLA 9. ANALISIS QUIMICO DE LA CENIZA DE FONDO [15]**

| ELEMENTO | "LIXIVIADO"<br>mg/L | TOTAL<br>mg/kg |
|----------|---------------------|----------------|
| Ba       | 0.99                | 32.6           |
| Cd       | 0.039               | 0.4            |
| Cr       | <0.01               | 0.9            |
| As       | 0.035               | 5.6            |
| Hg       | <0.001              | <0.02          |
| Ag       | <0.001              | 0.19           |
| Pb       | 0.15                | 3.35           |
| Se       | <0.002              | <0.04          |
| Sb       | <0.02               | <0.4           |

Finalmente, la cantidad de elementos traza lixiviables de cenizas volantes depende de la solubilidad y especies químicas de cada elemento.

Toda esta información es relevante, ya que explica que ciertos elementos están en posición favorable de ser móviles y disponibles en los ecosistemas terrestres, como los metales pesados de la superficie que son rápidamente lixiviables y originan la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

## ***CAPITULO V***

# ***MODELOS DE TRANSPORTE DE METALES PESADOS A TRAVES DEL SUELO***

### **5.1. FLUJO DE FLUIDOS A TRAVES DEL SUELO**

El suelo es un sistema trifásico disperso (sólido, líquido y gas). Como un medio poroso, el suelo contiene un amplio intervalo de tamaños de poro que afectan la hidráulica. En un suelo insaturado los poros contienen aire y agua. El agua es mantenida por las fuerzas resultantes de tensión superficial, cohesión, adhesión y atracción eléctrica molecular. La energía para retener líquido en el suelo se denomina potencial de presión del agua  $E_p$ , y es menor que la presión atmosférica.

La fuerza que mantiene el agua en el suelo es inversamente proporcional al radio del poro. Debido a que los poros son irregulares y se encogen o agrandan cuando el suelo se seca o humedece, la curva de desorción es distinta de la de adsorción (i. e. ocurre histéresis). Es evidente que la estructura y textura del suelo afectan fuertemente el movimiento del agua. En saturación, el potencial de presión se iguala a cero o a la presión atmosférica. Cuando el potencial de presión aumenta (llega a ser menor que la presión atmosférica) los poros son

deshidratados. En adición al potencial de presión, el agua del suelo se sujeta a varios campos de fuerza que causan que su energía difiera de la de un cuerpo de agua libre. Ya que la velocidad del agua del suelo es muy lenta y la  $\Delta E_c$  es proporcional a  $v^2$ , se considera despreciable. Entonces solamente se considera el potencial,

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_o, \quad (5.1)$$

donde  $\phi_t$  = potencial del agua del suelo;  $\phi_g$  = potencial gravitacional;  $\phi_o$  = potencial osmótico y  $\phi_p$  = potencial de presión.

El potencial de presión es menor que la presión atmosférica cuando el suelo es insaturado e igual o, más grande que, la presión atmosférica cuando el suelo está saturado. El potencial osmótico resulta de la presencia de solutos en el agua del suelo y no afecta significativamente el flujo másico del agua. Sin embargo, las concentraciones de solutos provenientes de aguas de desecho pueden afectar el movimiento de masa. El potencial gravitacional resulta de la elevación relativa del agua con respecto a una referencia. La energía potencial del agua puede ser expresada de varias maneras; como energía potencial por unidad de volumen con dimensiones de presión (Pa) y como energía potencial por unidad de peso con dimensiones de longitud (m). Esta última es comúnmente seleccionada y se expresa como:

$$H = H_g + H_p + H_o, \quad (5.2)$$

donde  $H$  = cabeza hidráulica total;  $H_g$  = cabeza gravitacional;  $H_p$  = cabeza de presión y  $H_o$  = cabeza osmótica. La cabeza de presión es negativa si el suelo es insaturado y cero o positiva si es saturado. En suelo saturado la cabeza de presión es frecuentemente referida como la cabeza de sumersión. El potencial osmótico no es expresado en términos de cabeza hidráulica y se supone despreciable en la mayoría de los casos [7].

La conductividad hidráulica ( $K$  en  $m/s$  o  $m^3/s/m^2$ ) indica la facilidad con que el agua pasa a través del suelo. La permeabilidad es un término que puede ser sinónimo con  $K$ , pero se refiere usualmente a un flujo en medio poroso saturado. La  $K$  saturada se supone constante si no ocurre alguna deformación o cambio en la distribución de poros y la concentración del soluto no cambia. Sin embargo, conforme se drena el agua, ésta se deposita o almacena en poros que son progresivamente

más pequeños, la K disminuye y es una función del potencial de presión. En las figuras 6 y 7 [7] se muestran esquemáticamente las relaciones de las cabezas según se trate de suelo saturado e insaturado, respectivamente.

## MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

Según la ley de Darcy,

$$J = K \frac{dH}{dL}, \quad (5.3)$$

donde J = flujo de agua por unidad de área, m/s o m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> y dH/dL = gradiente de cabeza hidráulica total, el gasto másico G por unidad de área es

$$G = J\rho = \rho K \frac{dH}{dL}, \quad (5.4)$$

donde  $\rho$  = densidad del agua y G está en kg/m<sup>2</sup> s.

El flujo de agua en el suelo cambia con el tiempo y el gradiente de cabeza hidráulica  $\nabla H$  y K varían en el espacio. Introduciendo la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K(H_p) \nabla(H)), \quad (5.5)$$

donde  $\partial \theta / \partial t$  = cambio en el contenido del agua del suelo con el tiempo y  $K(H_p)$  = conductividad hidráulica como función de la cabeza de presión.

En el suelo insaturado, donde  $\nabla H_G$  es despreciable comparado a  $\nabla H_p$  y  $\nabla H_0$ , la ecuación 5.5 se reduce a

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(H_p) \nabla H_p], \quad (5.6)$$

que, para un sistema unidimensional queda

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(H_p) \frac{\partial H_p}{\partial x} \right]. \quad (5.7)$$

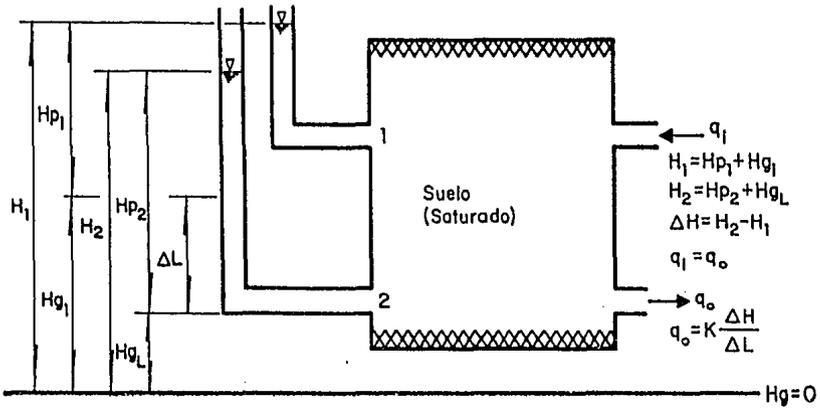


Fig. 6 Caracterización de condiciones de energía y flujo en una columna de suelo saturado [7]

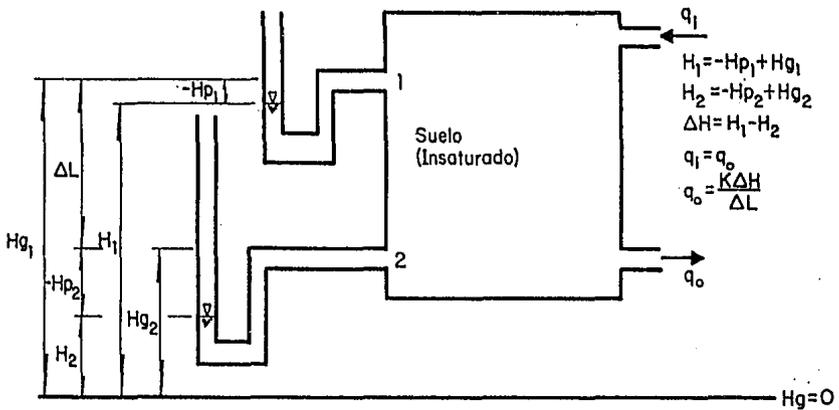


Fig. 7 Caracterización de condiciones de energía y flujo en una columna de suelo insaturado [7]

## 5.2. TRANSPORTE DIFUSIVO

El transporte másico del agua a través del suelo está controlado por la conductividad hidráulica como se vió anteriormente; sin embargo, el transporte de soluto a través del suelo está dominado por la difusión [18, 19, 20], cuya "constante" de proporcionalidad es precisamente el coeficiente de difusión.

La difusión de un compuesto químico o especie química en solución (i.e., un soluto) ocurre en respuesta a un gradiente de concentración de acuerdo con la primera ley de Fick que, para una dimensión, se puede escribir como

$$J = -D_o \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.8)$$

donde J = flujo másico, C = concentración del soluto en la fase líquida, x = dirección del transporte y  $D_o$  = coeficiente de difusión del soluto en solución libre.

Si se considera que la fuerza motriz para las moléculas o iones es el gradiente en el potencial químico [21] ó la conductividad iónica equivalente [22] ó la resistencia viscosa de las moléculas de solvente [23], el coeficiente de difusión se puede expresar, respectivamente, como

$$D_o = \frac{uRT}{N}, \quad (5.9)$$

$$D_o = \frac{RT(\lambda_o)}{(F^2)abs(\omega)}, \quad (5.10)$$

$$D_o = \frac{RT}{6\pi N\eta r}, \quad (5.11)$$

donde R = constante universal de los gases; T = temperatura absoluta; N = número de Avogadro; u = movilidad absoluta;  $\lambda_o$  = conductividad iónica limitante; F = Constante de Faraday; abs( $\omega$ ) = valor absoluto de la valencia iónica;  $\eta$  = viscosidad absoluta de la solución y r = radio iónico molecular o hidratado. Algunos valores de  $D_o$  calculados con la ecuación 5.10 se muestran en la tabla 10.

**TABLA 10. COEFICIENTES DE AUTODIFUSION PARA ALGUNOS IONES A DILUCION INFINITA EN AGUA A 25°C [19]**

| ANION                         | $D_0 \cdot 10^{10}, m^2/s$ | CATION           | $D_0 \cdot 10^{10}, m^2/s$ |
|-------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| OH <sup>-</sup>               | 52.8                       | H <sup>+</sup>   | 93.1                       |
| F <sup>-</sup>                | 14.7                       | Li <sup>+</sup>  | 10.3                       |
| Cl <sup>-</sup>               | 20.3                       | Na <sup>+</sup>  | 13.3                       |
| Br <sup>-</sup>               | 20.8                       | K <sup>+</sup>   | 19.6                       |
| I <sup>-</sup>                | 20.4                       | Rb <sup>+</sup>  | 20.7                       |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 11.8                       | Cs <sup>+</sup>  | 20.5                       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 19.0                       | Be <sup>2+</sup> | 5.98                       |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 10.6                       | Mg <sup>2+</sup> | 7.05                       |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 9.22                       | Ca <sup>2+</sup> | 7.92                       |
|                               |                            | Sr <sup>2+</sup> | 7.90                       |
|                               |                            | Ba <sup>2+</sup> | 8.46                       |
|                               |                            | Pb <sup>2+</sup> | 9.25                       |
|                               |                            | Cu <sup>2+</sup> | 7.13                       |
|                               |                            | Fe <sup>2+</sup> | 7.19                       |
|                               |                            | Cd <sup>2+</sup> | 7.17                       |
|                               |                            | Zn <sup>2+</sup> | 7.02                       |
|                               |                            | Ni <sup>2+</sup> | 6.79                       |
|                               |                            | Fe <sup>3+</sup> | 6.07                       |
|                               |                            | Cr <sup>3+</sup> | 5.94                       |
|                               |                            | Al <sup>3+</sup> | 5.95                       |

En el suelo los solutos se difunden más lentamente que en solución debido a que las trayectorias son más tortuosas y a que las partículas sólidas del suelo ocupan parte del área transversal, según se muestra en la figura 8.

Debido a la reducción en el área de flujo, la concentración  $C$ , de la especie que se difunde, es la concentración en la fase líquida del espacio de poro y la ec. 5.8 se modifica de la siguiente manera

$$J = -D_0 \theta \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.12)$$

donde  $\theta$  = contenido volumétrico del agua =  $nS_r$ ;  $n$  = porosidad total y  $S_r$  = grado de saturación del suelo. Por esto, el flujo máximo para la difusión ocurriría cuando el suelo está saturado ( $S_r = 1.0$ ).

La tortuosidad del suelo se toma en cuenta incluyendo un factor de tortuosidad,  $\tau$  [24], de tal forma que la ec. 5.12 se transforma en

$$J = -D_0 \tau \theta \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.13)$$

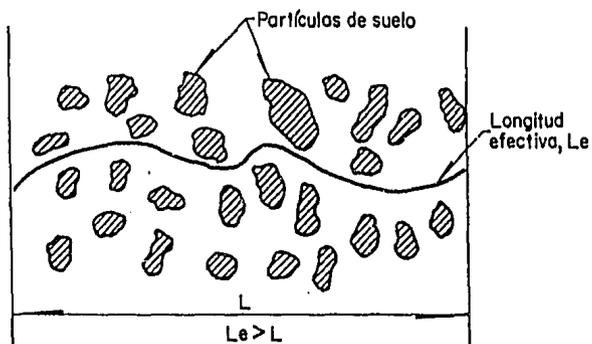


Fig. 8 Longitud efectiva del transporte a través del suelo [19]

Otros dos factores que tienden a reducir el transporte difusivo de solutos en el suelo son: la fluidez o movilidad,  $\alpha$  [25], debido al aumento de la viscosidad del agua adyacente a la superficie de la arcilla mineral relativa a la del agua másica y la exclusión de aniones,  $\gamma$  [26], que resulta en arcillas y esquistos compactados cuando las partículas de arcilla son estrechadas tanto que la capa doble difusiva de iones asociada con las partículas ocupa mucho del espacio de poro. Si se toman en cuenta estos factores entonces se tiene que

$$J = -D_o \tau \alpha \gamma \theta \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.14)$$

En general, y debido a las dificultades en su medición, se acostumbra usar un factor de tortuosidad aparente,  $\tau_a$ , que engloba a los otros factores y entonces se tiene que

$$J = -D_o \tau_a \theta \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.15)$$

Algunos valores de  $\tau_a$  se muestran en la tabla 11.

Para transporte transitorio de algún soluto o sustancia se puede aplicar la 2a. ley de Fick,

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (5.16)$$

donde  $D_s$  = coeficiente de difusión efectivo del soluto,  $x$  = coordenada espacial (puede ser la profundidad y puede suponerse positiva hacia abajo),  $C$  = concentración y  $t$  = tiempo

Según Johnston *et. al.* [27],  $D_s$  se puede estimar con la siguiente ecuación

$$D_s = \frac{D_o \tau}{1 + \left(\frac{\rho_r}{n}\right) K_D} = \frac{D_o \tau}{R}, \quad (5.17)$$

donde:

$\tau$  = Tortuosidad del suelo.

$\rho_r$  = Densidad real del suelo.

$K_D$  = Coeficiente de distribución definido como la concentración de equilibrio del soluto en la fase sólida dividida por la concentración del soluto en la fase solución.

**TABLA 11. FACTORES DE TORTUOSIDAD APARENTE REPRESENTATIVOS [19]**

| Suelos                                | Saturado o insaturado            | $\tau_a$   |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------|
|                                       | (a) Trazador de $^{36}\text{Cl}$ |            |
| Mezclas de bentonita y arena [28].    | Saturado                         | 0.59-0.84  |
| Mezclas iguales de bentonita y arena. | "                                | 0.08-0.12  |
| Mezclas de bentonita y arena [29].    | "                                | 0.04-0.49  |
|                                       | (b) Trazador de $^{14}\text{C}$  |            |
| Limo arenoso                          | Insaturado                       | 0.21-0.35  |
| Arena                                 | "                                | 0.025-0.29 |
| Limo de arcilla fangosa               | "                                | 0.064-0.26 |
| Arcilla                               | "                                | 0.091-0.28 |
| Limo de fango                         | "                                | 0.031-0.57 |
| Limo de arcilla fangosa; limo arenoso | Saturado                         | 0.08-0.22  |
| Arcilla fangosa                       | "                                | 0.13-0.3   |
| Arcilla                               | "                                | 0.28-0.31  |
|                                       | (c) Trazador de $\text{Br}^-$    |            |
| Limo de arcilla fangosa; limo arenoso | Saturado                         | 0.19-0.30  |
| Limo arenoso                          | "                                | 0.25-0.35  |
|                                       | (d) Trazador $^3\text{H}$        |            |
| Mezclas de bentonita y arena          | Saturado                         | 0.33-0.7   |
| "                                     | "                                | 0.01-0.22  |

Los elementos más contaminantes a analizar presentes en los lixiviados de las cenizas de carbón son: arsénico (As), zinc (Zn), cadmio (Cd) y selenio (Se).

El cálculo de  $D_0$  se puede realizar en función de la viscosidad absoluta de la solución, el volumen molar del soluto y la conductividad iónica equivalente. Así, para sustancias como As y Se que forman soluciones no electrolíticas [30],  $D_0$  se puede calcular con la ecuación de Wilke y Chang para soluciones diluidas [31]:

$$D_o = \frac{7.4 \times 10^{-8} (E_B M_B) \left(\frac{1}{2} T\right)}{V_A^{0.6} \mu}, \quad (5.18)$$

donde, para el agua como solvente a 25°C, se obtienen las siguientes propiedades:

|       |  |             |
|-------|--|-------------|
| $\mu$ | = Viscosidad   | = 0.89 cp   |
| $M_B$ | = Peso molecular   | = 18 g/gmol |
| $E_B$ | = Factor de asociación                                       | = 2.6       |
| $T$   | = Temperatura absoluta                                       | = 298 K     |
| $V_A$ | = Volumen molar del soluto en el punto de ebullición normal. |             |

De acuerdo con Foust *et. al.* [32], los volúmenes molares estimados para el As y el Se son de 30.5 cm<sup>3</sup>/gmol y 41.20 cm<sup>3</sup>/gmol, respectivamente. El valor para el As se obtiene directamente de tablas y el del Se se estima mediante el método de Benson [33].

Para sustancias como el Zn y Cd que, en solución, pueden formar soluciones electrolíticas (Zn<sup>2+</sup> y Cd<sup>2+</sup>) [30], el coeficiente se puede calcular por medio de la ecuación de Nernst:

$$D_o = \frac{RT}{F^2} \frac{(\lambda_+^o)(\lambda_-^o)}{(\lambda_+^o) + (\lambda_-^o)} \frac{|Z_-| + |Z_+|}{|Z_+ Z_-|}, \quad (5.19)$$

donde a 25°C se tiene:

$$RT/F^2 = 8.931 \times 10^{-14}$$

$$F = \text{Cte de Faraday}$$

$$\lambda_+^o = \text{Conductancia catiónica a dilución infinita} \\ (\text{A/cm}^2) (\text{cm/V}) (\text{cm}^3/\text{g-equiv.})$$

$$\lambda_-^o = \text{Conductancia aniónica a dilución infinita} \\ (\text{A/cm}^2) (\text{cm/V}) (\text{cm}^3/\text{g-equiv.})$$

$$(\lambda_+^o) + (\lambda_-^o) = \text{Conductancia electrolítica a dilución infinita} \\ (\text{A/cm}^2) (\text{cm/V}) (\text{cm}^3/\text{g-equiv.})$$

$$Z_+ = \text{Valencia catiónica}$$

$$Z_- = \text{Valencia aniónica}$$

Según Dean [34],  $\lambda_+^o = 52.8$  para el Zn y 54 para el Cd.

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 5.18 y 5.19 se obtienen los siguientes coeficientes de difusión:

|    |  |
|----|--|
| As | $D_0 = 2.1807 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Se | $D_0 = 1.8207 \times 10^{-9} \text{ ''}$           |
| Zn | $D_0 = 2.8104 \times 10^{-9} \text{ ''}$           |
| Cd | $D_0 = 2.8743 \times 10^{-9} \text{ ''}$           |

De acuerdo con los estudios realizados en los depósitos de las cenizas de la termoeléctrica de Río Escondido, Coah., se sabe lo siguiente [15]:

Tipo de suelo de la capa superior del depósito: limo arenoso,

Textura: 60% arena, 10.8% arcilla y 29.2% de limo

Densidad aparente  $\rho_{ap} = 1140 \text{ kg/m}^3$

Densidad real  $\rho_r = 2500 \text{ kg/m}^3$

Porosidad  $n = 0.544$

Tortuosidad  $\tau = 0.66$  [27]

De acuerdo al muestreo de la ceniza integral hecho en el mismo sitio se tiene que las concentraciones iniciales  $C_0$  son:

As = 0.103 mg/L

Se = 0.048 ''

Cd = 0.48 ''

Zn = 0.416 '' [13]

De acuerdo a Johnston *et. al.* [27], los valores experimentales de  $K_D$  son:

As = 1.583 m<sup>3</sup>/kg

Zn = 5.483 ''

Cd = 0.345 ''

Se = 0.0165 ''

Resolviendo la ecuación 5.16 por transformada de Laplace para un medio infinito y por un cambio de variable y serie de Fourier para un medio seminfinito con las siguientes condiciones iniciales:

### Medio infinito

$$C(0, t) = C_0 \quad 0 < t < \infty$$

$$C(x, 0) = 0, \quad 0 < x < \infty$$

### Medio seminfinito

$$C(0, t) = C_0 \quad X = 0, \quad t > 0$$

$$C(L, t) = C_1 \quad X = L, \quad t > 0$$

$$C(x, 0) = 0 \quad t = 0, \quad 0 < x < L$$

se obtienen las siguientes soluciones para la concentración en función del tiempo:

**Medio infinito:**

$$C = C_o \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_s t}}, \quad (5.20)$$

donde erfc es la función error complementaria.

**Medio seminfinito:**

$$C = \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2C_1}{n\pi} \cos n\pi - \frac{2C_o}{n\pi} \right) * \left( \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{L} \right) e^{-\left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 D_s t} \right) \right] + C_o + \left( \frac{C_1 - C_o}{L} \right) x \quad (5.21)$$

Utilizando las soluciones obtenidas se graficaron los perfiles de concentración contra la profundidad para varios tiempos y para cada uno de los compuestos tóxicos en estudio. Para comparar los dos modelos, el valor límite de L utilizado de la ecuación 5.21 fue la distancia a la cual en el medio infinito la concentración de las sustancias es prácticamente cero. En ambos modelos se obtuvieron los mismos resultados en el comportamiento de las sustancias por lo que los dos modelos son válidos. Una ventaja del modelo para un medio seminfinito es que puede emplearse cuando se tienen datos experimentales en los que se conozca la concentración de la sustancia a una distancia L. Como en este caso no se tiene información sobre esa concentración es mejor considerar un medio infinito.

Los resultados se muestran en las figuras 9-12 para arsénico, zinc, cadmio y selenio, respectivamente. En las gráficas se observa que a mayor profundidad la concentración de las sustancias va disminuyendo debido a que el contaminante se va depositando en el suelo. Para el arsénico se observa que la concentración es prácticamente cero a los 3 cm de profundidad y 5 años, mientras que el cero de concentración para un tiempo de 50 años se obtiene a una profundidad de 8 cm. Para el zinc los valores son todavía menores (el cero para 50 años se obtiene con 5 cm de profundidad). La atenuación total del cadmio y el selenio requiere profundidades mayores; por ejemplo 20 y 70 cm para 50 años, respectivamente. Se observa que el transporte de estas sustancias a través del suelo no tienen un

comportamiento lineal. Cada una de estas sustancias alcanza una profundidad distinta debido a que tienen diferentes propiedades, como el coeficiente de difusividad y el  $K_D$ , por lo que la ecuación 5.17 sería la ecuación constitutiva del sistema. En las figuras 13-16 se muestran los perfiles de concentración contra tiempo para distancias constantes y para cada elemento. Se observa que, a medida que pasa el tiempo, va aumentando la concentración en cada capa debido a que se van acumulando las sustancias y las líneas van tendiendo a un régimen permanente. En la figura 13 se observa que el arsénico tiene una concentración de cero a los 25 años y una profundidad de 6 cm; la concentración crece ligeramente (0 a 0.005 mg/L) cuando el tiempo se dobla (50 años). Para el zinc, el cero de concentración ocurre a los 30 años y su crecimiento con el tiempo es despreciable. El selenio se comporta similarmente, pero a una profundidad de 50 cm; con el cadmio ocurre a 15 cm.

Se efectuaron otras estimaciones cambiando el tipo de arcilla. Se utilizó la del depósito del pozo 2 de la CT de Río Escondido, Coah., que tiene como características [15]:

Textura: arena 46%, arcilla 20.60 %, limo 33.40 %

$\rho_{ap}$  = 1240 kg/cm<sup>3</sup>

$\rho_r$  = 2550 "

$n$  = 0.5137

Los resultados se muestran en las figuras 17-20 y se puede observar que las concentraciones son ligeramente más pequeñas debido a que las arcillas funcionan mejor como impermeabilizantes ya que son suelos de textura fina y se componen de poros pequeños lo que produce un suelo con mayor capacidad para retener las sustancias. Generalmente, el agua y el aire se mueven a través del suelo con dificultad, debido a que hay pocos poros grandes. Los cambios no son tan apreciables debido a que, posiblemente, el modelo empleado presenta fuerte influencia del parámetro  $K_D$  que es experimental y el cual no se cambió.

En este modelo la migración de las sustancias es muy lenta ya que sólo se considera el fenómeno de difusión, con lo cual se ignoran otros factores que también pueden existir.

# TRANSPORTE DIFUSIVO ARSENICO

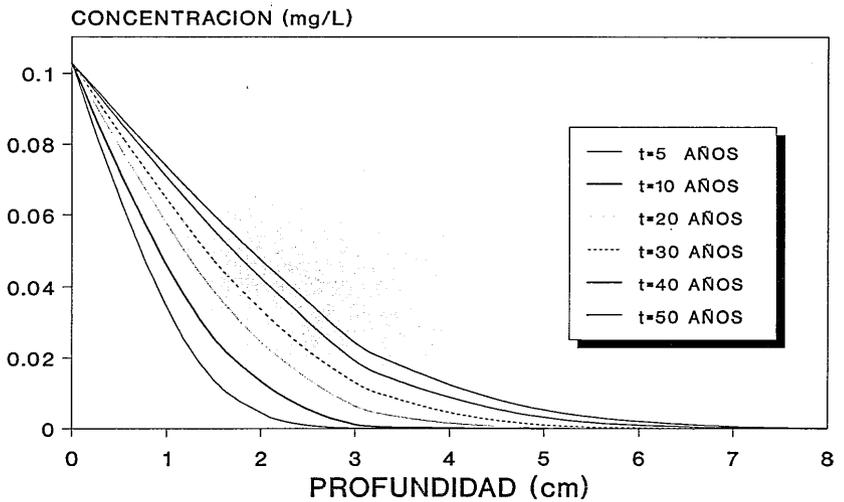


Fig 9. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO ZINC

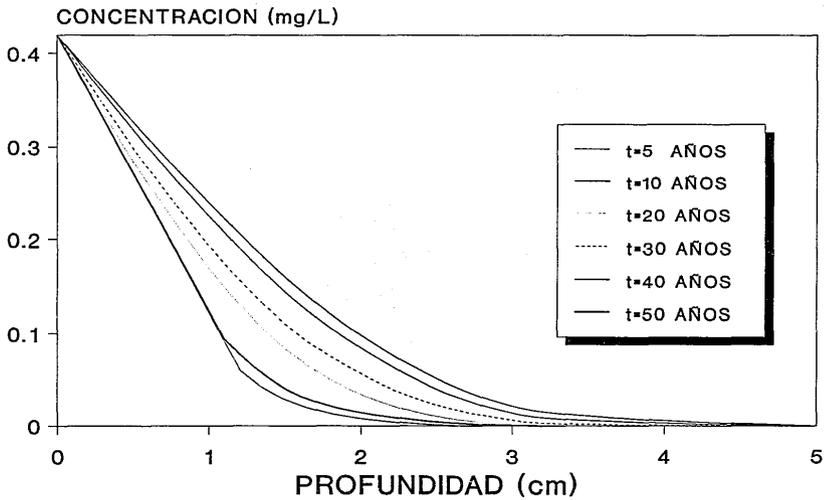


Fig 10. Perfil de concentración del zinc con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CADMIO

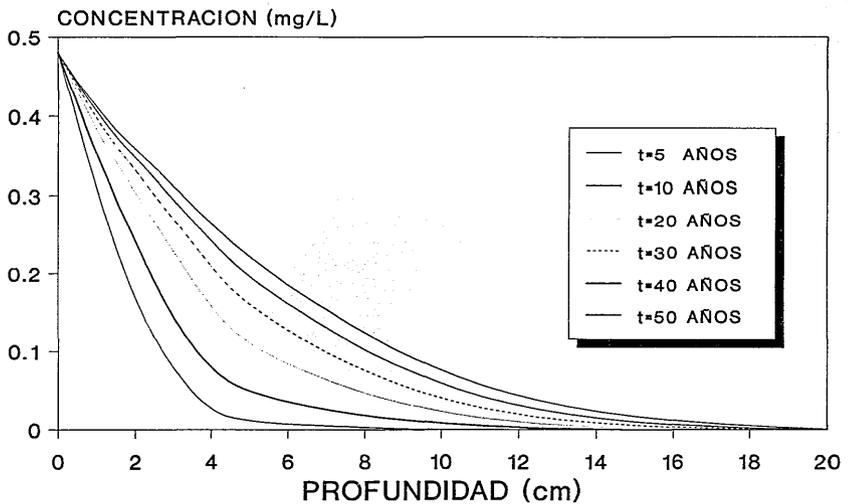


Fig 11. Perfil de concentración del cadmio con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO SELENIO

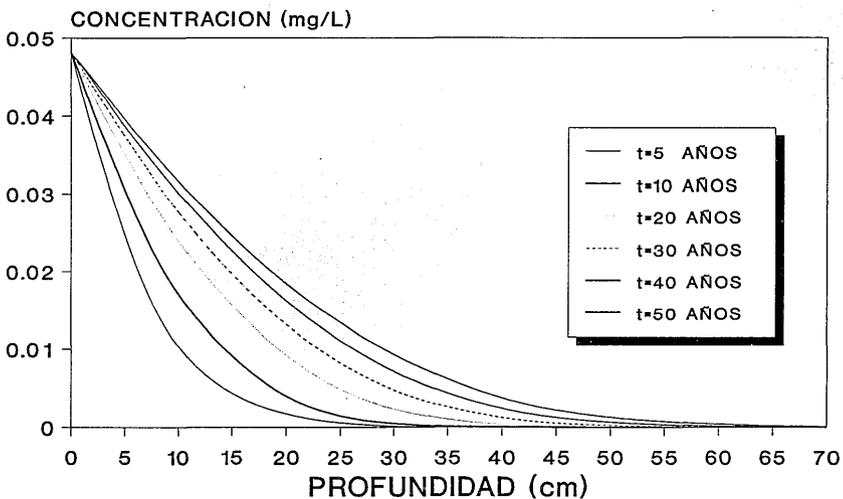


Fig 12. Perfil de concentración del selenio con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO ARSENICO (t vs C)

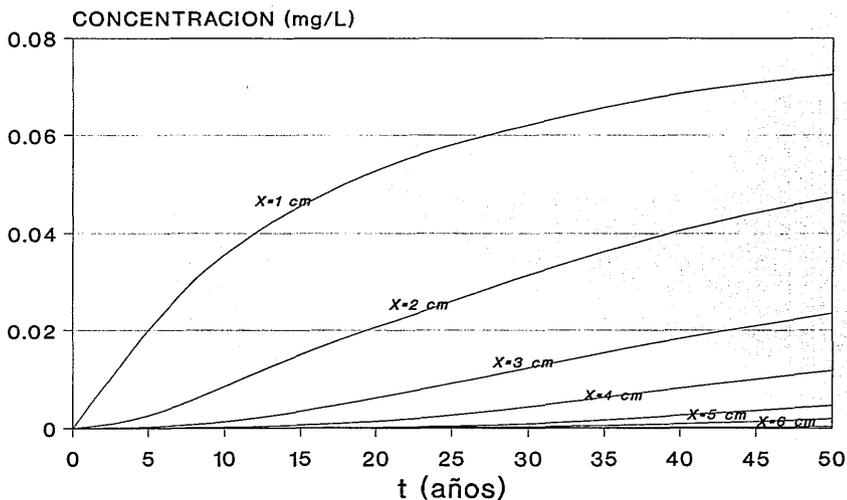


Fig 13. Perfil de concentración del arsénico contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.20

# TRANSPORTE DIFUSIVO ZINC (T VS C)

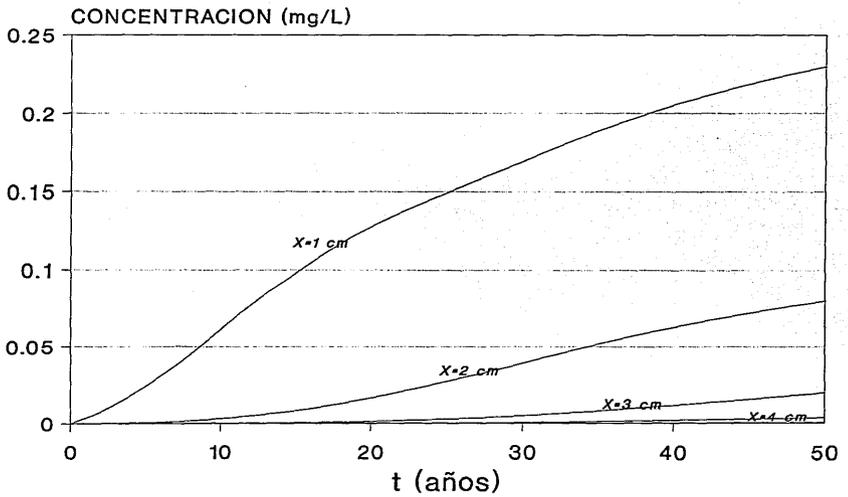


Fig 14. Perfil de concentración del zinc contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.20

# TRANSPORTE DIFUSIVO SELENIO (t vs C)

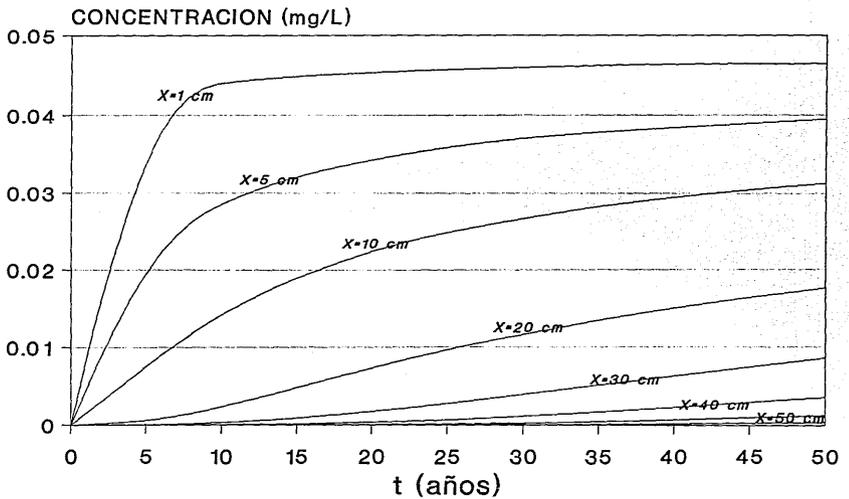


Fig 15. Perfil de concentración del selenio contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.20

# TRANSPORTE DIFUSIVO CADMIO (t vs C)

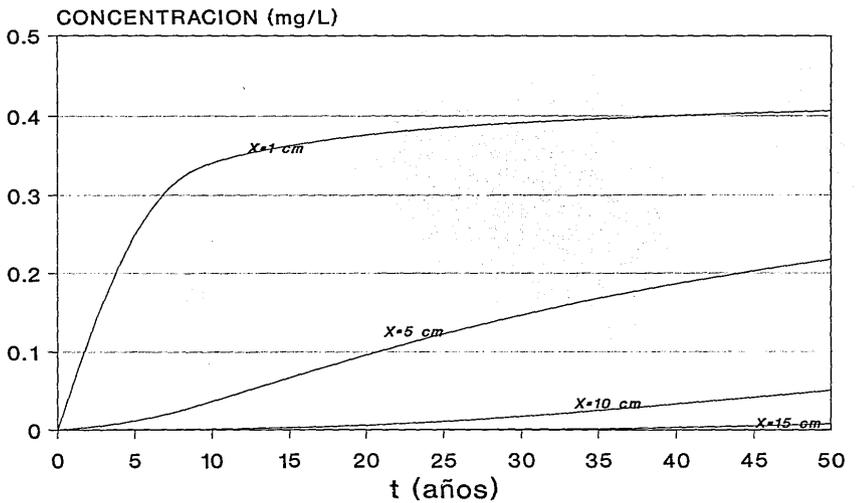


Fig 16. Perfil de concentración del cadmio contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.20

# TRANSPORTE DIFUSIVO ARSENICO (CAMBIO DE ARCILLA)

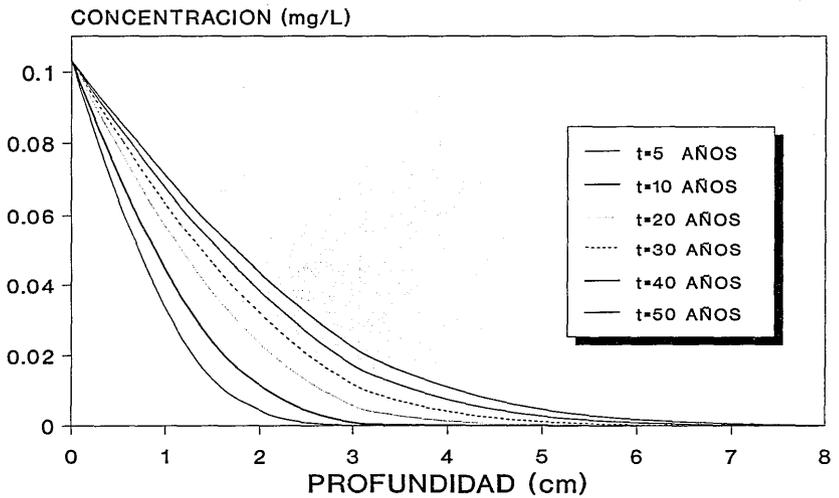


Fig 17. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla 2 usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO ZINC (CAMBIO DE ARCILLA)

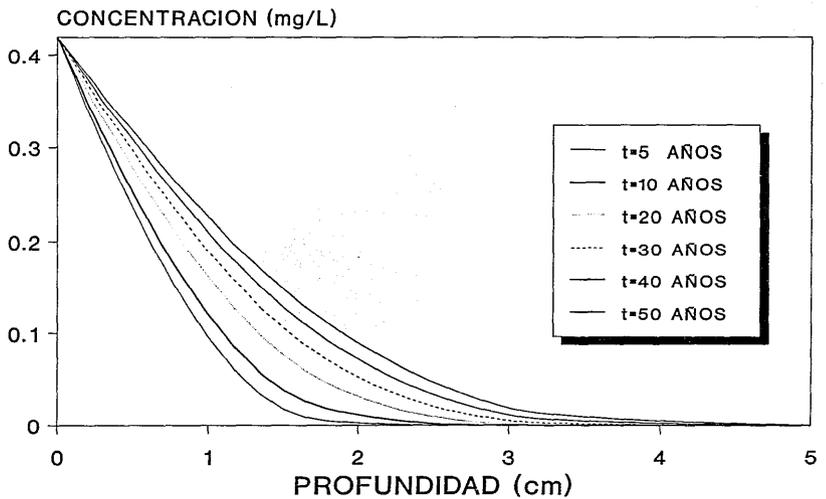


Fig 18. Perfil de concentración del zinc con la profundidad de la arcilla 2 usando un modelo de medio infinito

## TRANSPORTE DIFUSIVO CADMIO (CAMBIO DE ARCILLA)

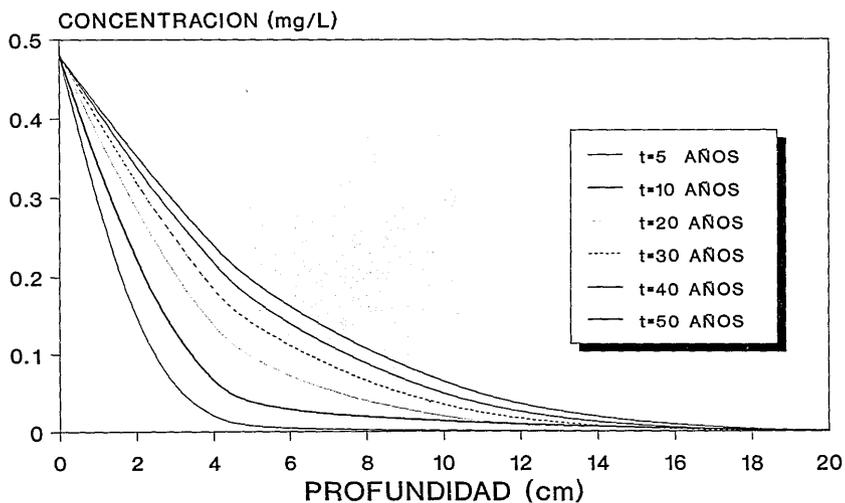


Fig 19. Perfil de concentración del cadmio con la profundidad de la arcilla 2 usando un modelo de medio infinito

## TRANSPORTE DIFUSIVO SELENIO (CAMBIO DE ARCILLA)

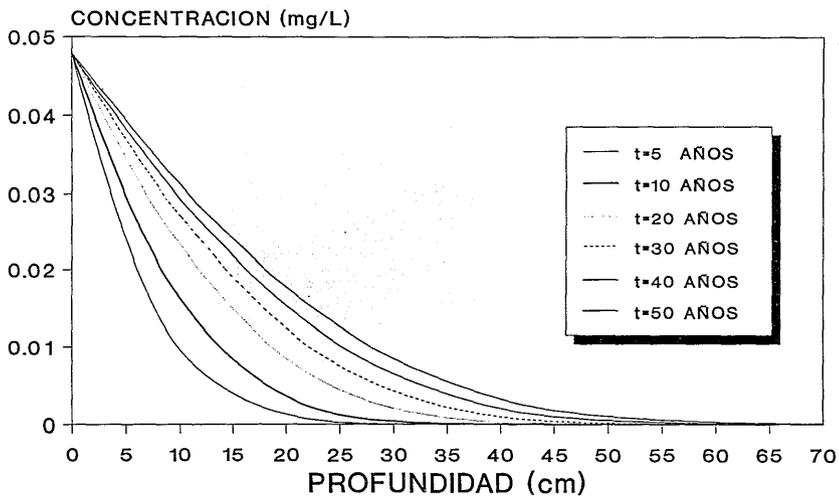


Fig 20. Perfil de concentración del selenio con la profundidad de la arcilla 2 usando un modelo de medio infinito

### 5.3. TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO

Este modelo, además de considerar el fenómeno de difusión, considera la velocidad de flujo que adquiere la sustancia al transportarse y está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.22)$$

donde  $v$  = velocidad de infiltración. Realizando un cambio de variable se tiene:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (5.23)$$

en donde:

$$C(x, t) = e^{-\frac{v \left[ x - \frac{vt}{2} \right]}{2D_s}} \xi(x, t), \quad (5.24)$$

Resolviendo la ecuación 5.23 por transformada de Laplace [35] para un medio infinito con las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

$$\begin{aligned} C(0, t) &= C_0 \quad 0 < t < \infty \\ C(x, 0) &= 0 \quad 0 < x < \infty \end{aligned}$$

que en función de la nueva variable quedarían como

$$\begin{aligned} \xi(0, t) &= C_0 e^{v^2 t / 4D_s} \\ \xi(x, 0) &= 0 \end{aligned}$$

se obtiene la siguiente solución:

$$\xi(x, t) = \frac{1}{2} e^{at} \left\{ e^{-x\sqrt{a/D_s}} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_s t}} - \sqrt{at} \right] + e^{x\sqrt{a/D_s}} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_s t}} + \sqrt{at} \right] \right\} * C_0 \quad (5.25)$$

y

$$C(x,t) = e^{-\frac{v \left[ x - \frac{vt}{2} \right]}{2D_e}} * \xi(x,t), \quad (5.26)$$

donde  $a = v^2/4D_s$

De acuerdo a esta solución se analizaron los resultados que produce al sustituir los valores de los parámetros. Lo primero que se observó es que hay velocidades para las cuales se obtienen valores de cero de la concentración de los elementos tóxicos en la arcilla. Esto se produce como resultado de que el argumento de la función error y el de la exponencial se hacen muy grandes dependiendo del valor de la velocidad utilizado. Otro parámetro que también tiene influencia es el coeficiente de difusión efectivo, el cual, mientras mayor sea, permite que haya resultados a velocidades mayores. El intervalo de velocidades considerado está de acuerdo con los resultados mostrados por Folkes [36]. Esta referencia sugiere que, para arcillas compactadas, las velocidades varían de  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s a  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s, mientras que para una mezcla de bentonita y arena, la variación es de  $2 \cdot 10^{-7}$  a  $5 \cdot 10^{-10}$ , también en m/s. Los valores del coeficiente de difusión,  $D_s$  y el del coeficiente de distribución,  $K_D$  se tomaron de Johnston *et. al.* [27], según se mencionó al trabajar el modelo difusivo. En las figuras 21 a la 26 se observa la concentración contra la profundidad para diferentes años y para el arsénico. Únicamente para una velocidad de flujo de  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s se obtienen valores distintos del difusivo, aunque a tiempos grandes ( $> 10$  años) también se observa una distinción a una velocidad de  $1 \cdot 10^{-11}$  m/s. Como ya se dijo, la concentración cero se produce a mayores profundidades cuando se le compara con el modelo difusivo. También se ve que, a mayores tiempos, la concentración igual a cero se obtiene a mayores profundidades.

En general, se observa que el efecto del término convectivo es apresurar la concentración a un mismo nivel y con respecto al tiempo o producir concentraciones tendientes a cero a mayores profundidades, todo esto en comparación con el modelo netamente difusivo. Se puede concluir, a reserva de contar más datos, que si las velocidades reales de flujo son menores a aquellas en las que este modelo produce resultados, entonces el modelo difusivo prevalecerá. En cambio si las velocidades reales son mayores, el modelo más preciso sería el convectivo. Las velocidades de flujo se obtendrían de pruebas experimentales.

En las figuras 27 a la 29 se grafica la concentración contra la profundidad a diferentes tiempos para arsénico, zinc y cadmio. En estas gráficas se aprecia que a una velocidad de flujo de  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s se obtienen valores distintos del modelo difusivo. La atenuación total de estas sustancias para un período de 50 años se obtiene a una profundidad de 22 cm para el arsénico y zinc y 35 cm para el cadmio mientras que con el modelo difusivo para el mismo período la concentración era cero a una profundidad de 8 cm para arsénico, 5 cm para zinc y 20 cm para el cadmio. Lo que se decía exclusivamente para el arsénico en las figuras anteriores se observa ahora mejor para este compuesto tóxico, pero también para los otros dos. El logro de la concentración cero a mayor profundidad y la caída más rápida de las curvas con el tiempo son producto del valor del coeficiente de difusión efectivo y del coeficiente de distribución,  $K_D$ . El de difusión varía en orden ascendente en los elementos zinc, arsénico, cadmio y selenio, mientras que el de distribución varía también en orden ascendente en los elementos selenio, cadmio, arsénico y zinc, es decir, un comportamiento inverso.

En las figuras 30 a la 32 se muestran los datos de concentración contra tiempo a varias profundidades, los cuales remarcan las anotaciones indicadas anteriormente.

El selenio es el elemento que, de acuerdo con sus propiedades muestra un comportamiento diferente a los otros tres. En principio, produce resultados a dos velocidades distintas. En las figuras 33 y 34 se grafica la concentración contra profundidad a varios tiempos para velocidades de  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s y  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s, respectivamente. A velocidad menor predomina la difusión, mientras que a velocidad mayor predomina el efecto convectivo. Si en la realidad predominara el último, entonces el cero de concentración se obtendría a profundidades mayores que las del modelo difusivo. Así, para 50 años los valores son 220 y 80 cm, respectivamente, es decir, que la profundidad se duplicaría si predominara el modelo convectivo. Desde el punto de vista de aplicación esto tendría mucha importancia y de aquí la necesidad de contar con datos más precisos de la velocidad de flujo. Las figuras 35 y 36, que muestran la concentración del selenio contra el tiempo para varias profundidades, confirman lo antes dicho.

Al comparar las gráficas de concentración contra tiempo, las cuales muestran la acumulación del material para las cuatro sustancias, con las obtenidas con el modelo difusivo, se observa que en las del fenómeno convectivo hay una acumulación más rápida del material en las capas del suelo (sobre todo en las primeras capas) lo cual explica el

comportamiento de las gráficas donde varía la profundidad.

Al realizar las estimaciones cambiando el tipo de arcilla del suelo (más arcilloso) se obtienen concentraciones un poco más pequeñas al disminuir la porosidad del suelo y la atenuación de la concentración de las sustancias sucede a menor profundidad, pero la velocidad a la cual se aprecia el fenómeno convectivo no cambia y se obtienen los mismos perfiles de concentraciones solo que con valores un poco menores.

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

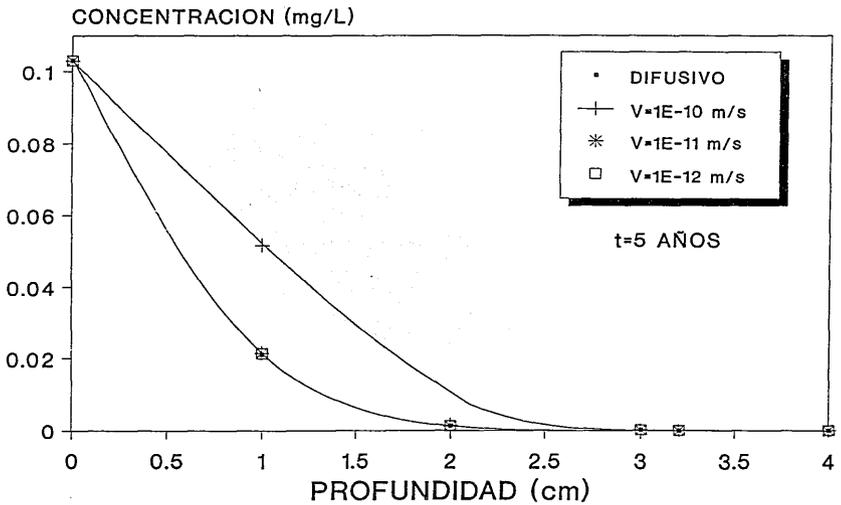


Fig 21. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

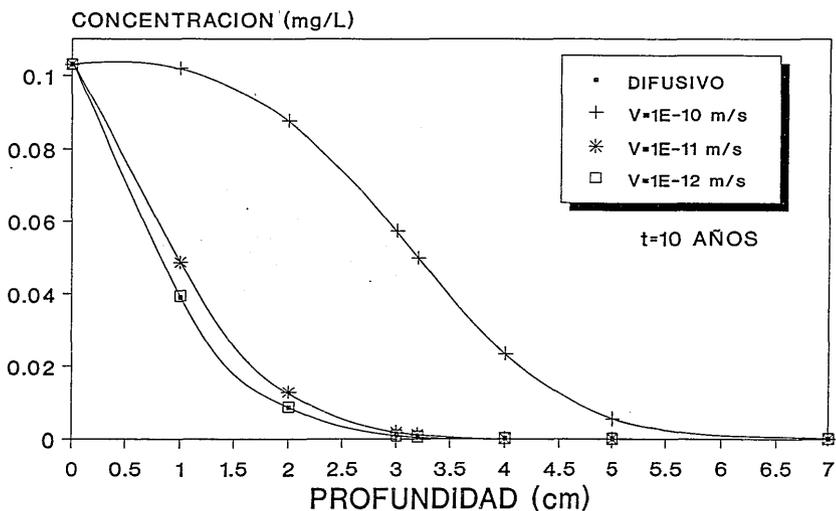


Fig 22. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

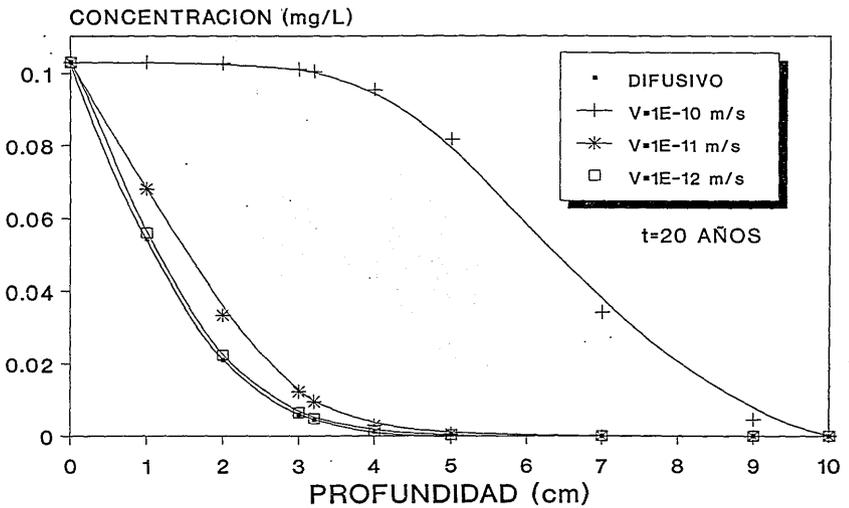


Fig 23. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

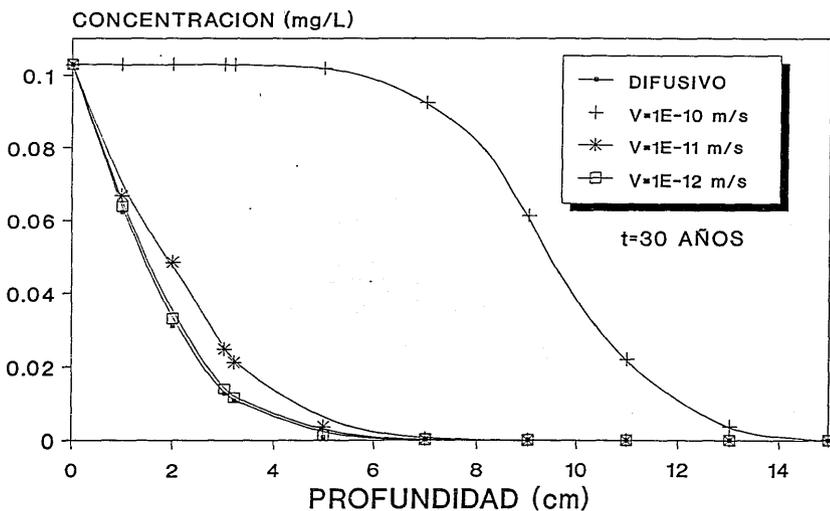


Fig 24. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

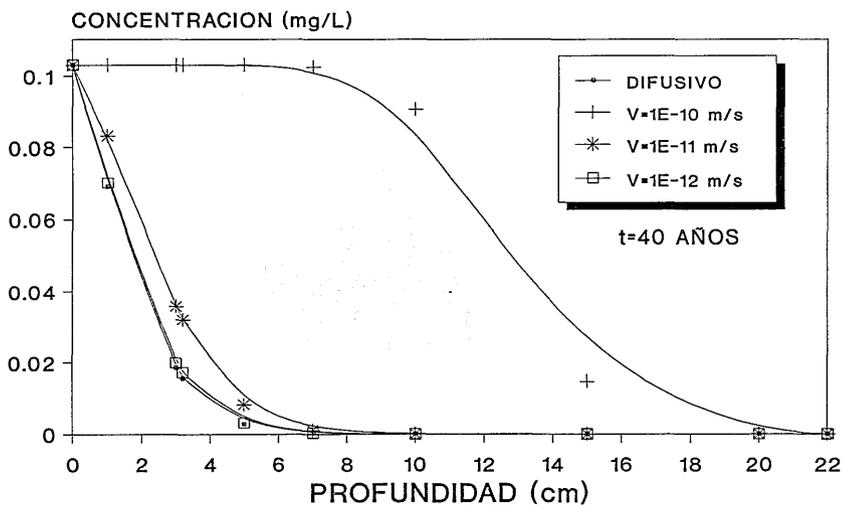


Fig 25. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (VARIACION DE LA VELOCIDAD)

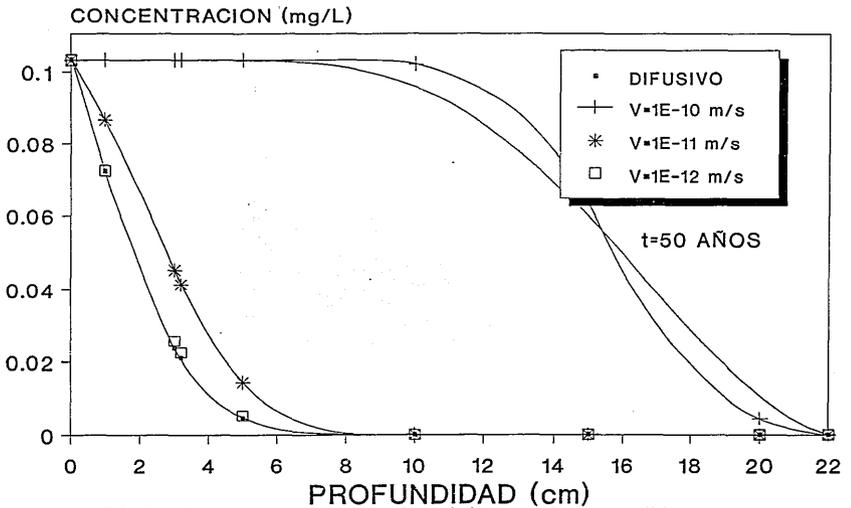


Fig 26. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varias velocidades

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO

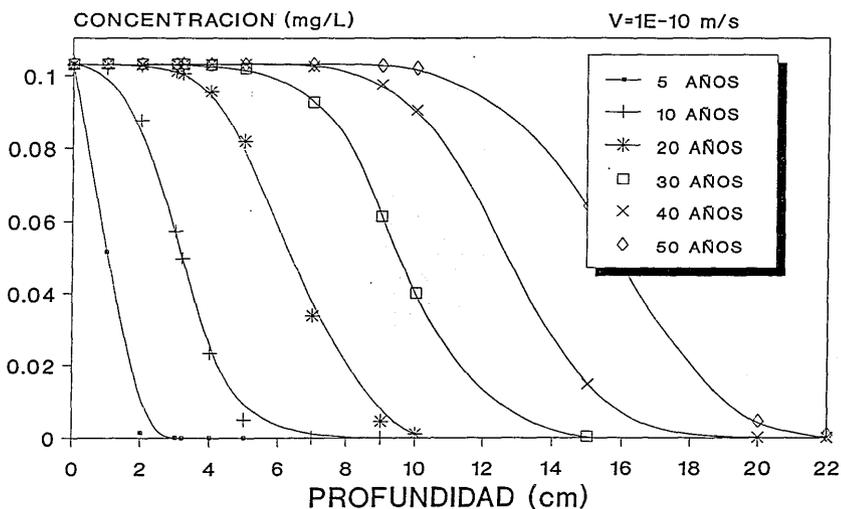


Fig 27. Perfil de concentración del arsénico con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ZINC

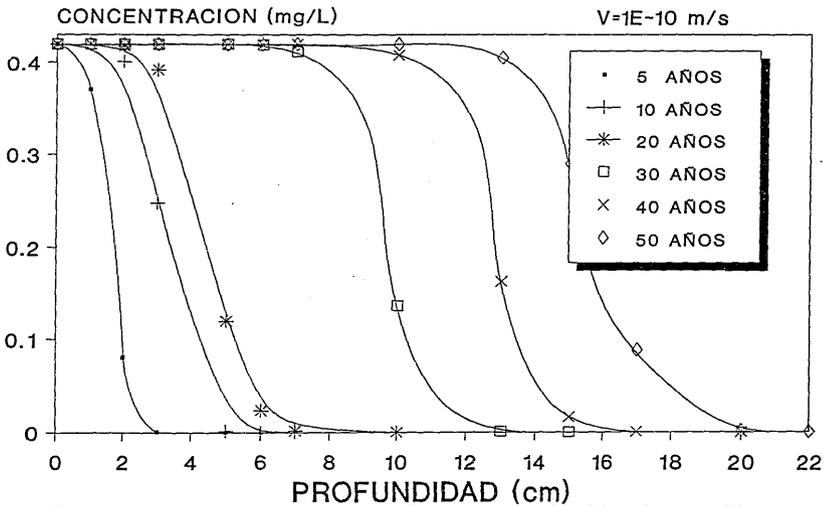


Fig 28. Perfil de concentración del zinc con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO CADMIO

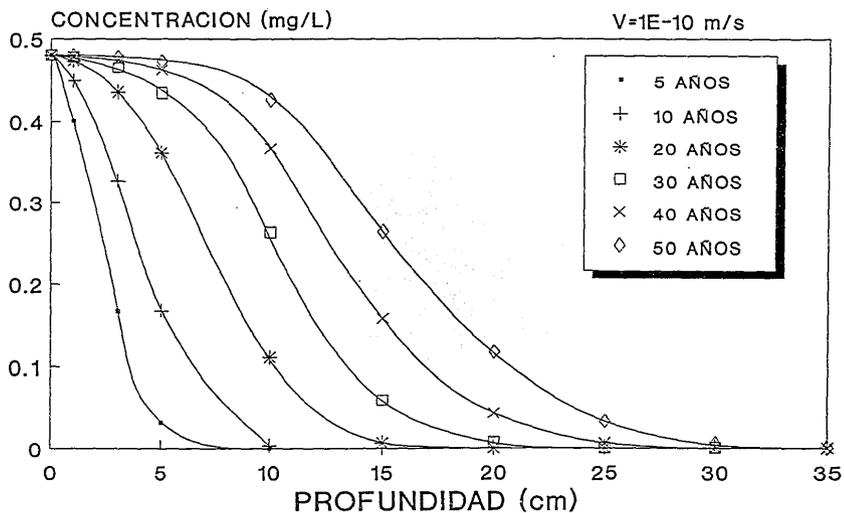


Fig 29. Perfil de concentración del cadmio con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ARSENICO (t vs C)

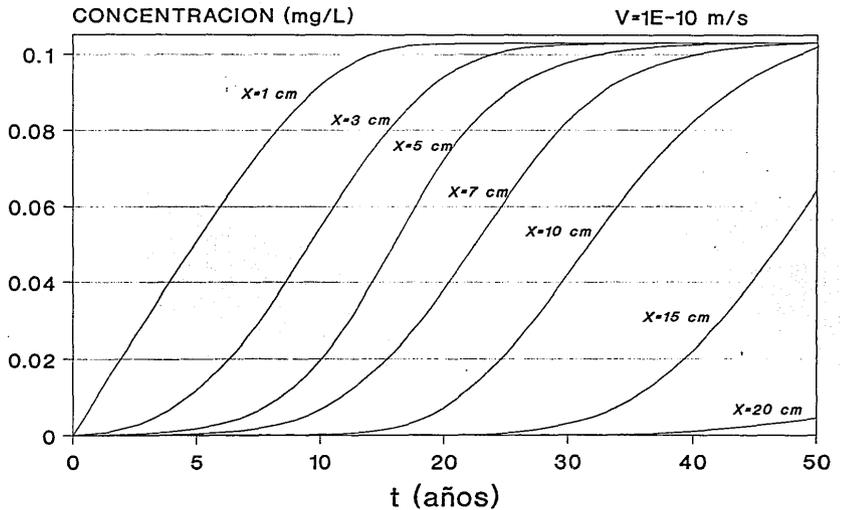


Fig 30. Perfil de concentración del arsénico contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.26

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO ZINC (t vs C)

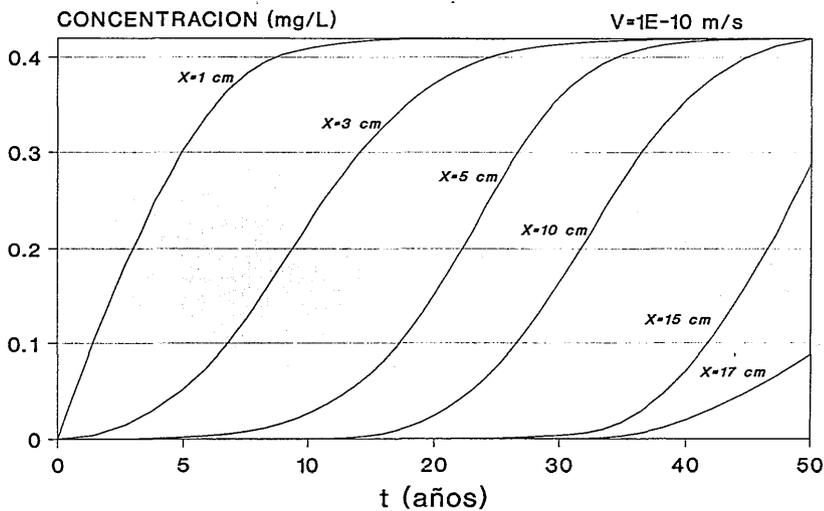


Fig 31. Perfil del concentración del zinc contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.26

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO CADMIO (t vs C)

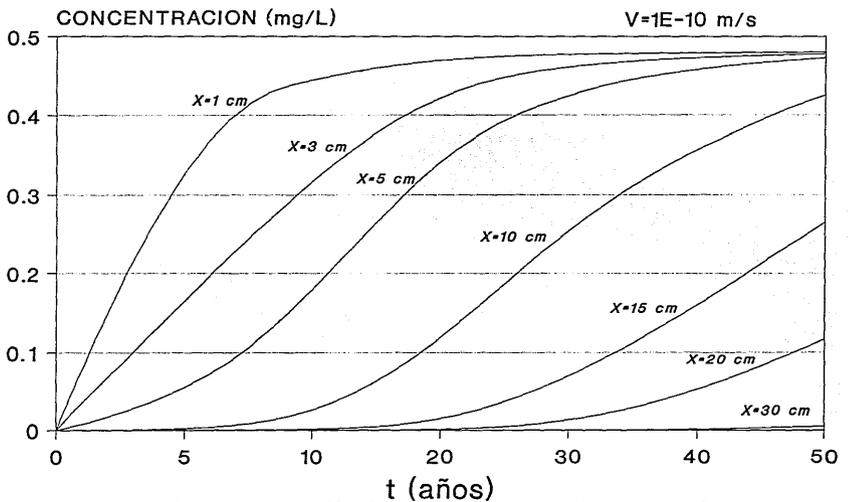


Fig 32. Perfil de concentración del cadmio contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.26

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO SELENIO

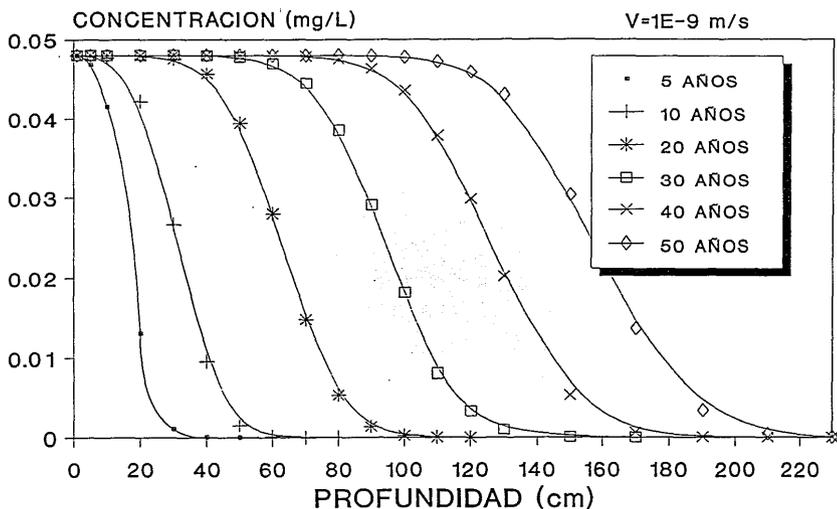


Fig 33. Perfil de concentración del selenio con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO SELENIO

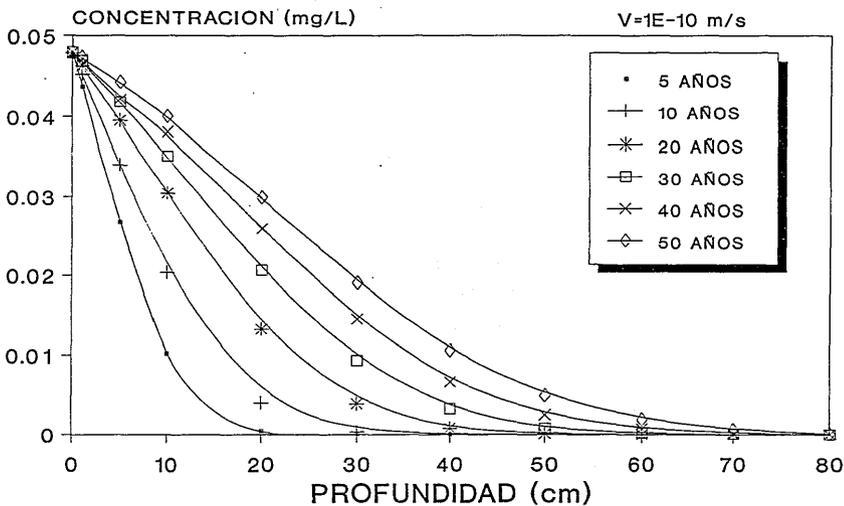


Fig 34. Perfil de concentración del selenio con la profundidad de la arcilla para varios tiempos usando un modelo de medio infinito

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO SELENIO (t vs C)

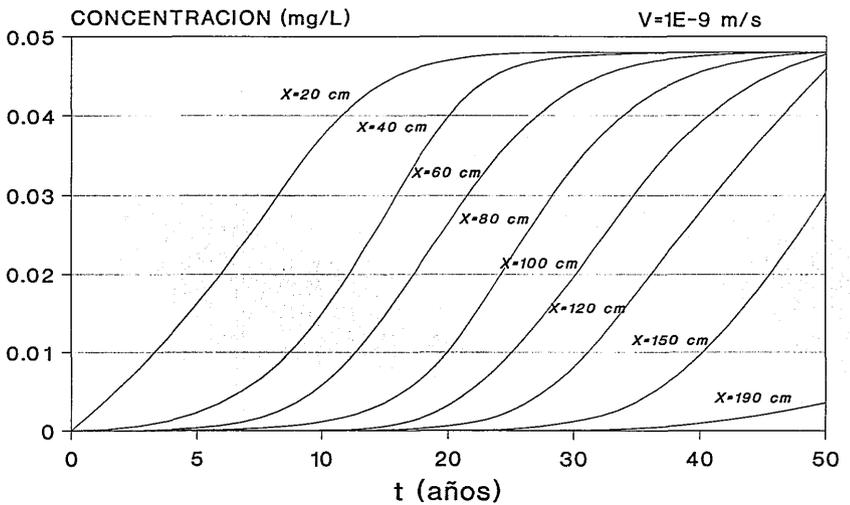


Fig 35. Perfil de concentración del selenio contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.26

# TRANSPORTE DIFUSIVO CONVECTIVO SELENIO (t vs C)

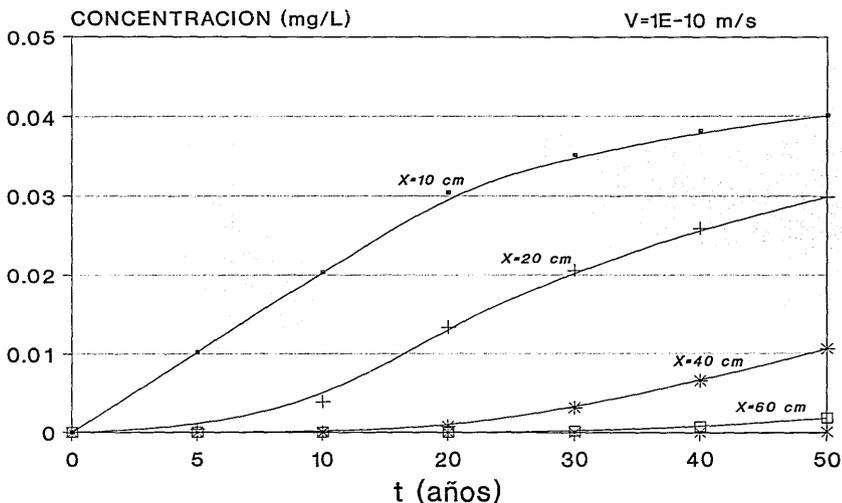


Fig 36. Perfil de concentración del selenio contra el tiempo a profundidades constantes usando la ecuación 5.26

## 5.4. TRANSPORTE EN MEDIO POROSO CON GRADIENTES DE TEMPERATURA

Los fenómenos que ocurren al fluir un líquido caliente a través del suelo son sumamente complejos y aún no muy bien comprendidos. Hay un flujo másico caliente a través de los intersticios, acompañado de gases que se hallan usualmente en el suelo. En el fluido caliente hay trazas de vapor. Dentro del recorrido existen islas líquidas donde se produce precipitación de sales. El fluido y las sales precipitadas se pueden diluir o acompañar del agua originalmente presente en el suelo.

Los hechos interactivos de los componentes del fluido caliente con los del suelo son fenómenos quizás más interesantes que el propio flujo másico del fluido. Los fenómenos que se presentan son adsorción e intercambio de ion. La adsorción se debe a las fuerzas de atracción o de Van der Waals que dependen de la estructura física compleja del sólido poroso como de la naturaleza química del fluido y del sólido.

Junto a las fuerzas físicas, existen fuerzas más intensas de atracción que resultan en la formación de compuestos superficiales en relaciones estequiométricas variables. Este último tipo de adsorción se denomina adsorción química.

El suelo en estado de sequedad o en presencia de agua pura mantiene a sus iones en alguna posición media, pero en presencia de agua con solutos, uno o varios iones se mueven libremente pudiéndose desplazar del sólido al líquido; si el sólido permanece globalmente neutro se requiere que otros iones de carga equivalente penetren en el sólido. La existencia de neutralidad eléctrica excluye del sólido a los iones de la misma polaridad que los retenidos por la estructura. El resultado neto del proceso es un intercambio de los iones móviles del sólido por iones del líquido con la misma polaridad. Este proceso se denomina intercambio iónico y puede considerarse como un proceso específico dentro del mecanismo general de adsorción.

El flujo de un fluido caliente a través del suelo considerando que con los fenómenos descritos se producen, ocasiona que las propiedades físicas del suelo, p. ej. densidad, difusividad térmica, difusividad másica, etc. sean muy variables. Paralelo al flujo del fluido se encuentra el flujo de calor por conducción. Los dos flujos, masa y calor, a través del suelo han sido modelados por Philip y de Vries [37] y de Vries [38] basados en la interacción microscópica de líquido, vapor y la estructura porosa utilizando leyes físicas establecidas (difusión, Darcy y capilaridad), equilibrio termodinámico y principios de conservación. Otro

modelo es el presentado por Luikov [39] siguiendo formalmente las relaciones lineales de Onsager y las leyes de conservación.

## MODELO DE PHILIP-DE VRIES

Este modelo explica el comportamiento del movimiento de humedad bajo gradientes de temperatura modificando la teoría simple de la transferencia de vapor y aplicando la difusión molecular.

La primera ley de Fick en el caso de vapor se puede escribir como

$$Q_v = -D_{ov} \nabla \rho_v, \quad (5.27)$$

donde  $D_{ov}$  = coeficiente de difusión de vapor en el aire;  $\rho_v$  = densidad de vapor y  $Q_v$  en  $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ . Para un medio poroso se modifica como

$$Q_v = -D_{ov} \tau \theta \alpha \gamma \nabla \rho_v, \quad (5.28)$$

La densidad  $\rho_v$  puede sustituirse por relaciones de temperatura y humedad

$$\rho_v = \rho_o h_r = \rho_o e^{(Pg/RT_v)}, \quad (5.29)$$

donde  $h_r$  = humedad relativa;  $\rho_o$  = densidad del vapor saturado y  $T_v$  = temperatura del vapor de agua.

Entonces:

$$\nabla \rho = h_r \nabla \rho_o + \rho_o \nabla h_r, \quad (5.30)$$

En este caso se presentan los fenómenos de adsorción física y capilaridad para los cuales la variación  $\partial h_r / \partial T = 0$ , por lo que puede escribirse a  $\rho_o$  en función de  $T$  solamente y a  $h_r$  en función de  $\theta$  como:

$$\nabla \rho_v = \rho_o \nabla h_r + h_r \nabla \rho_o = h_r \frac{d\rho_o}{dT_v} \nabla T_v + \frac{g\rho_v}{RT_v} + \frac{\partial H_p}{\partial \theta} \nabla \theta, \quad (5.31)$$

Sustituyendo la ec. 5.31 en 5.28, se tiene

$$Q_v = -D_{ov} \tau \theta \alpha \gamma h_r \frac{d\rho_o}{dT_v} \nabla T_v - D_{ov} \tau \theta \alpha \gamma \frac{g\rho_v}{RT_v} \frac{\partial H_p}{\partial \theta} \nabla \theta, \quad (6.32)$$

y dividiendo toda la ec. 5.32 por la densidad del agua líquida, se tiene

$$\frac{Q_v}{\rho_l} = -D_{ovT} T_v - D_{ov\theta} \nabla\theta, \quad (5.33)$$

donde  $D_{ovT}$  = coeficiente de difusión de vapor térmico y  $D_{ov\theta}$  = coeficiente de difusión de vapor isotérmico. La ecuación 5.33 expresa el flujo de vapor con base en los gradientes de temperatura y humedad.

Para el flujo de agua líquida se modifica a la ec. 5.4 para tener la expresión

$$\frac{Q_l}{\rho_l} = -KH_p \nabla T_l - K \frac{\partial H_p}{\partial \theta} \nabla\theta - K\hat{i}, \quad (5.34)$$

donde  $\hat{i}$  = vector positivo en la dirección z. Agrupando términos se tiene

$$\frac{Q_l}{\rho_l} = -D_{oRT} \nabla T_l - D_{o\theta} \nabla\theta - K\hat{i}, \quad (5.35)$$

donde  $D_{oRT}$  = coeficiente de difusión del líquido térmico y  $D_{o\theta}$  = coeficiente de difusión del líquido isotérmico. De acuerdo a la ecuación, el flujo de líquido está dado en tres componentes de acuerdo al gradiente de humedad, al gradiente de temperaturas y al gravitacional. El flujo total sería la suma de  $Q_l$  y  $Q_v$  (ecs. 5.33 y 5.35):

$$\frac{Q}{\rho_l} = -D_T \nabla T - D_\theta \nabla\theta - K\hat{i}, \quad (5.36)$$

donde:

$$D_T = D_{oRT} D_{ovT}, \quad (5.37)$$

$$D_\theta = D_{o\theta} D_{ov\theta}, \quad (5.38)$$

El término  $D_T$  es la difusividad térmica de humedad total y el  $D_\theta$  la suma de la difusividad térmica del líquido y de la difusividad térmica del vapor. Estas últimas se pueden estimar de las siguientes expresiones:

$$D_{\sigma RT} = K \frac{\psi}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T}, \quad (5.39)$$

$$D_{\sigma vT} = \frac{1}{\rho_l} D_{\sigma v} \xi a h \left( \frac{\partial \rho_a}{\partial T} \right), \quad (5.40)$$

donde  $\psi$  = el potencial capilar o succión,  $\sigma$  = tensión superficial,  $\rho_l$  = densidad del líquido,  $\xi$  = factor de corrección por la diferencia de los gradientes de temperaturas locales y total y  $a$  = contenido volumétrico de aire.

$D_\theta$  es la difusividad isotérmica de humedad total y también tiene una componente de vapor y una de líquido,

$$D_{\sigma \theta} = K \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad (5.41)$$

$$D_{\sigma v \theta} = \frac{1}{\rho_l} D_{\sigma v} \tau a \rho_a \left( \frac{\partial h_r}{\partial \theta} \right), \quad (5.42)$$

donde  $\tau$  es la tortuosidad.

Diferenciando la ecuación 5.36 y aplicando la ecuación de continuidad se obtiene la ecuación diferencial general que describe el movimiento de humedad en materiales porosos combinando los gradientes de temperatura y humedad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \frac{\partial K}{\partial z}, \quad (5.43)$$

Así, las características principales del suelo son las difusividades,  $D_T$  y  $D_\theta$  y la permeabilidad  $K$ . Las dos difusividades líquidas tienden a ser más importantes cuando hay un alto contenido de humedad mientras que las difusividades del vapor dominan cuando hay un bajo contenido de la misma.

La ecuación de conducción de calor a través del suelo sería

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K_g \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\theta, \text{vap}} \nabla \theta), \quad (5.44)$$

donde  $C$  = capacidad térmica volumétrica del suelo,  $K_g$  = conductividad térmica del suelo,  $L$  = calor latente de evaporación,  $D_\theta$ ,

vap = difusividad isotérmica del vapor que se expresa por la relación:

$$D_{0,vap} = \frac{\alpha a D_{ov} \nu g \rho_v}{\rho_l RT} \frac{\partial \psi}{\partial \theta_l}, \quad (5.45)$$

donde  $\nu$  = factor de flujo de masa y toma en cuenta el proceso de evaporación-condensación,  $g$  = aceleración de la gravedad y  $\theta_l$  = contenido volumétrico de líquido.

El flujo de calor se puede calcular a partir de la ley de Fourier, modificándola para incluir la evaporación y los calores sensibles del líquido y vapor; con lo cual se tiene la siguiente expresión

$$Q_n = -K_g \nabla T + [L_o + C_v(T - T_o)]Q_v + C_l(T - T_o)Q_l, \quad (5.46)$$

donde  $T_o$  = temperatura de referencia;  $L_o$  = entalpía de evaporación a  $T_o$ ;  $C_v$  = capacidad calorífica del vapor y  $C_l$  = capacidad calorífica del líquido.

Una generalización de estas ecuaciones se efectúa al considerar el calor de humedecimiento y la transferencia de calor sensible. Además se puede hacer la distinción entre el contenido de humedad en el líquido y en el vapor en donde

$$\theta_v = (n - \theta_l)\rho_o h_r / \rho_l \quad (5.47)$$

Las nuevas ecuaciones para la transferencia de masa y calor serían:

$$\left[ 1 + \frac{D_{ov0}}{\alpha \nu D_{ov}} - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \left[ \frac{(n - \theta_l) h_r \beta}{\rho_l} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_0 \nabla \theta_l + D_T \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (5.48)$$

$$\left[ C + L(n - \theta_l) h_r \beta \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[ \frac{L \rho_l D_{ov0}}{\alpha \nu D_{ov}} - L \rho_v + \rho_l g (\psi - T \frac{\partial \psi}{\partial T}) \right] \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla \cdot (K_g \nabla T) + L \rho_l \nabla \cdot [D_{ov0} \nabla \theta_l] + \rho_l C_{pl} [(D_{ov0} \nabla \theta_l + D_{oRT} \nabla T + K \hat{k}) \nabla T], \quad (5.49)$$

donde  $n$  = porosidad,  $\beta = d\rho_o/dT$ ,  $C_{pl}$  = capacidad térmica del líquido y  $\hat{k}$  = vector unitario en la dirección vertical.

Para la obtención de las ecuaciones 5.48 y 5.49 se ha asumido que todos los procesos de transferencia de calor toman lugar uniformemente en el medio poroso y que las fuentes y sumideros de calor, debidas a la evaporación-condensación y humedecimiento-secado, también están uniformemente distribuidas. En realidad la transferencia de vapor tiene lugar únicamente en el espacio de poro llenado con aire, el movimiento de líquido solamente en el espacio de poro llenado con agua, mientras que la evaporación-condensación ocurren en las interfases agua-aire. Un tratamiento analítico completo de estos procesos requiere un estudio microscópico de la transferencia de masa y calor en medio poroso.

### MODELO DE LUIKOV

La ley de conservación de masa se puede expresar como:

$$\rho_o \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\nabla \cdot Q_i + I_i; \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (5.50)$$

donde  $\rho_o$  = densidad del medio seco;  $I_i$  = fuente o sumidero de masa de la fase  $i$  debido a la transición de fase;  $u_i$  = contenido de masa específico =  $m_i/m_o$ ;  $m_i$  = masa de la fase  $i$ ;  $m_o$  = masa del medio seco;  $t$  = tiempo;  $i = 1$  = fase vapor;  $i = 2$  = fase líquida;  $i = 3$  = fase gas inerte y  $i = 4$  = fase sólida (hielo). La ecuación de conservación de la energía será entonces de la forma

$$C\rho_o \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot Q_h - \sum h_i I_i - \sum Q_i C_i \nabla T, \quad (5.51)$$

donde  $C$  = capacidad calorífica reducida =  $C_o + \sum C_i u_i$ ;  $C_i$  = capacidad calorífica de la fase  $i$ ;  $C_o$  = capacidad calorífica del cuerpo seco y  $h_i$  = entalpia de transformación de la fase  $i$ .

En el caso que se está tratando  $u_4 = 0$  y  $I_2 = -I_1$ , lo que significa que la única transición de fase es de líquido a vapor. Una suposición muy importante es la de que las masas de vapor y aire no exceden el  $10^{-3}$  por ciento de la masa líquida; entonces el líquido es igual a la masa total

$$u = \sum u_i = u_2, \quad (5.52)$$

Usando la ec. 5.52 en la ec. 5.50, se llega a

$$\rho_o \frac{\partial u}{\partial t} = \sum \nabla \cdot Q_i \quad (5.53)$$

En el caso simple de que no hay transferencia convectiva y tomando al contenido de masa y la temperatura como potenciales de la transferencia difusional, se llega a las expresiones de transferencia de masa y calor siguientes.

$$\rho_o \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D_{om} \rho_o \nabla u - D_{om} \rho_o \delta \nabla T), \quad (5.54)$$

$$C \rho_o \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-K_g \nabla T) - L(-\varepsilon \rho_o \frac{\partial u}{\partial t}), \quad (5.55)$$

donde  $D_{om}$  = coeficiente de difusión de líquido y vapor;  $\delta$  = coeficiente de gradiente térmico;  $L$  = entalpía de transformación líquido-vapor y  $\varepsilon$  = resistencia a la difusión de vapor en el medio poroso húmedo.  $\delta$  es un coeficiente que depende de los coeficientes de difusión, de la densidad y de la temperatura;  $\varepsilon$  depende de la distribución de poro,  $f(r)$ , con respecto al radio del capilar. Esencialmente  $\delta$  y  $\varepsilon$  son coeficientes determinados experimentalmente.

Generalmente se hace uso del sistema de ecuaciones diferenciales de la transferencia de calor y humedad con  $\theta$  y  $T$  como potenciales de transferencia, así el potencial de transferencia de humedad  $\theta$  es función del contenido de masa y de la temperatura:

$$\theta = \theta(u, T), \quad (5.56)$$

entonces:

$$d\theta = \left( \frac{\partial \theta}{\partial u} \right)_T du + \left( \frac{\partial \theta}{\partial T} \right)_u dT = \frac{1}{C_m} du + \theta_T dT, \quad (5.57)$$

donde  $C_m = (\partial u / \partial \theta)_T$  = capacidad másica isotérmica y  $\theta_T = (\partial \theta / \partial T)_u$  = coeficiente de temperatura del potencial de transferencia de masa.

Usando la relación 5.57 y suponiendo que las propiedades termodinámicas  $C_m$  y  $\theta_T$  son independientes de las coordenadas y del

tiempo, el sistema de ecuaciones 5.54 y 5.55 se reduce a :

$$\rho_o \frac{\partial \theta}{\partial t} = D \rho_o \nabla^2 \theta + \left( D \left( \frac{\delta}{C_m} - \theta_T \right) + \left( \frac{\theta_T K_g}{C} \right) \right) \nabla^2 T, \quad (5.58)$$

$$C' \rho_o \frac{\partial T}{\partial t} = K_g \nabla^2 T + \varepsilon L C_m \rho_o \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (5.59)$$

en donde  $C' = C + \varepsilon L C_m \theta_T$  y  $D = D_{om} C' / C$ . Las ecuaciones 5.58 y 5.59 equivalen a las ecuaciones 5.54 y 5.55 difiriendo por los valores de las capacidades caloríficas.

Así, las ecuaciones de difusión de vapor y de Darcy que modelan la transferencia de masa en sistemas isotérmicos han sido sustancialmente alteradas al considerar la transferencia bajo gradientes de temperatura, dando lugar a la transferencia de calor. La inclusión de los efectos térmicos introduce parámetros y coeficientes adicionales que son más difíciles de medir o determinar. El problema de la transferencia de masa y calor es que se trata de un proceso no lineal y las variables dependientes están acopladas, por eso la solución requiere de métodos numéricos y poderoso equipo de cómputo. Por ello, el problema de transferencia de masa y calor en suelos es muy difícil de resolver, además de que los coeficientes y parámetros varían fuertemente con el contenido de humedad y la temperatura y la mayoría de ellos se tienen que determinar experimentalmente. Los coeficientes  $\varepsilon$  y  $\delta$  requieren de un trabajo muy preciso y delicado para determinarlos en el laboratorio. Si se piensa que para cada fluido y para cada tipo de suelo es necesario efectuar las determinaciones se deduce la enorme y compleja labor que se tiene que realizar en este tipo de transferencia simultánea. En el caso de que el fluido contenga o esté formado por varios compuestos, como es el caso de los "lixiviados", el problema se torna más complicado debido a la interacción que se realiza con los compuestos químicos del suelo, modificando sus propiedades.

En este trabajo no se contempló la solución de esta parte del problema sino que solamente se dejó esbozado para un trabajo posterior.

## **VI**

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este trabajo de tesis se ha hecho un estudio de los efectos sobre el suelo de los principales compuestos tóxicos contaminantes que contienen las cenizas provenientes de la combustión de carbón utilizado como fuente de energía en la generación de energía eléctrica.

Se puede concluir que los constituyentes de las cenizas son tan variables como lo es el tipo de carbón y el tipo de ellas mismas. Estos constituyentes van a depender del tipo de partícula de ceniza formada. Por ejemplo, As, Se, Cd y Zn se localizan en la periferia, mientras que Cr, Cu, Pb y Ni se localizan en el interior de la partícula. No obstante, es posible que el manejo de las cenizas sea completamente aleatorio y entonces la distribución por tipo de partículas también lo sea, pero debido a la distribución geométrica de los constituyentes, algunos tendrán mayor oportunidad de solubilizarse que otros. De los estudios revisados, se observa que los elementos Ca, Al, Fe, Mg, Si, Na,  $\text{SO}_4^{2-}$  y en menor cantidad Ni, Cr, Cd, Cu, As, Se, Zn, Pb se hallan presentes en los "lixiviados" que produce el almacenamiento de estas cenizas en el suelo.

Se establecieron y resolvieron modelos matemáticos que simulan el transporte de sustancias a través del suelo y se aplicaron principalmente a 4 elementos contaminantes que contienen los

lixiviados de cenizas como son el As, Cd, Zn y Se. Con los modelos resueltos se pudo observar la concentración y el tiempo de migración de los elementos a través de las capas del suelo, a partir de una concentración inicial de elemento tóxico contaminante de 0.103 mg/L de As, 0.41 mg /L de Zn, 0.48 mg/L de Cd y 0.048 mg /L de Se.

Primeramente se resolvió el modelo de transporte difusivo para estado transitorio considerando un medio infinito. Según este modelo, el arsénico alcanza una concentración prácticamente nula a una profundidad de 8 cm, el zinc a 5 cm, el selenio a 70 cm y el cadmio a 20 cm, todos para un tiempo aproximado de 50 años. De este modelo se puede concluir que la migración de las sustancias es muy lenta ya que considera que para el transporte de ellas sólo predomina el fenómeno de difusión, aunque existen otros factores que pueden afectar el transporte de las sustancias tales como la presión, el intercambio iónico, la temperatura, el contenido de humedad, etc.

Se resolvió un modelo difusivo-convectivo y en general se observa que el efecto del término convectivo es el de mostrar el efecto acumulativo del contaminante a lo largo de los años en las capas superficiales del suelo y producir concentraciones tendientes a cero a mayores profundidades. Se puede concluir, a reserva de contar con mayores datos, que si las velocidades reales de flujo son menores a aquellas en las que este modelo produce resultados, entonces el modelo difusivo prevalecerá. En cambio si las velocidades reales son mayores entonces un modelo más preciso sería el difusivo-convectivo. Las velocidades de flujo se podrían obtener de pruebas experimentales.

La complejidad de los modelos es mayor cuando existen gradientes de temperatura, por lo que sería conveniente investigar si ocurre ese fenómeno y, en caso positivo, se tiene que hallar la manera de simplificarlos para resolverlos, aún numéricamente. En general, estos modelos requieren para su cálculo parámetros que son específicos para el tipo de suelo o arcilla y cuya determinación es experimental.

En este trabajo sólo se consideraron algunos de los múltiples factores que pueden afectar la migración de las sustancias por lo que es aconsejable modificarlos de tal manera que incluyan más efectos que retarden el flujo (por ejemplo, reacción química, adsorción o absorción). Este tipo de estudios se deberán complementar con trabajo experimental donde se determinen los principales parámetros que afectan a los modelos, sobre todo aquellos específicos del tipo de sustancia contaminante y del tipo de suelo y así crear un modelo que represente mejor el fenómeno.

# ***BIBLIOGRAFIA***

1. R. Morales, Consideraciones geotécnicas y geohidrológicas para rellenos sanitarios, Memorias del VI Congreso Nacional de Saneamiento Ambiental, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C, Querétaro, Qro. 1988.
2. T. H. Tchobanoglous, "Solid Wastes. Engineering Principles and Management Issues". McGraw-Hill Book Company, Nueva York, EEUUA, 1977.
3. P. S. Parker. "Encyclopedia of Environmental Science". 2ª Edición, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, EEUUA, 1980.
4. S. H. Peavy y R. D. Rowe, "Environmental Engineering". McGraw-Hill Book Company, Nueva York, EEUUA, 1985.
5. N. Aguilera, "Tratado de Edafología de México". Tomo 1. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1989.
6. A. Wild, "Soils and the Environment: An Introduction". Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1993.
7. M. R. Overcash y D. Pal, "Design of Land Treatment Systems for Industrial Wastes. Theory and Practice". Ann Arbor Science Publishers, Michigan, EEUUA, 1979.
8. G. Auvinet y R. Esquivel, "Impermeabilización de Lagunas Artificiales". Sociedad Mexicana de Suelos, A. C., México, 1986.
9. L. J. Goldman y L. I. Greenfield, "Clay Liners for Waste Management Facilities. Design, Construction and Evaluation". Noyes Data Corporation, Nueva York, EEUUA, 1990.
10. E. R. Kirk y F. D. Othmer, "Enciclopedia de Tecnología Química". Tomo VI. 1ª Edición, Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1972.

11. Anónimo. Informe Geológico de la Cuenca Fuentes-Río Escondido. Coah., CFE, Comisión Federal de Electricidad, México D. F., 1987.
12. Estudios de las cenizas y del carbón de mina I, Sofremines, 1981.
13. W. R. Harris y D. Silberman, Leaching of Metal Ions from Fly Ash by Canine Serum. *Environ. Sci. Technol.* 22:109-112, 1988.
14. M. Sakata, Movement and Neutralization of Alkaline Leachate at Coal Ash Disposal Sites. *Environ. Sci. Technol.* 21:771-777, 1987.
15. A. E. Silva, C. Cruickshank, R. Iturbide, R. Aguirre y L. Treviño, Efecto contaminante del transporte y disposición final de las cenizas de las carboeléctricas de Río Escondido y Carbón II, informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, abril 1991.
16. J. S. Fruchter y J. M. Zachara, Identificación of Solubility Controlling Solid Phases in a Large Fly Ash Field Lysimeter. *Environ. Sci. Technol.* 24:1173-1179, 1990.
17. Ch. W. Francis y W. J. Boegly, Coal Conversion Solid Waste Disposal. *J. Environ. Eng. ASCE.* 108:1301-1311, 1982.
18. G. P. Korfiatis, Moisture Transport in a Solid Waste Column. *Journal of Environmental Engineering ASCE.* 110:781-796, 1984.
19. C. D. Shackelford y D. E. Daniel, Diffusion in Saturated Soil. I: Background. *J. Geotechn. Eng.* 117:467-484, 1991.
20. C. D. Shackelford y D. E. Daniel, Diffusion in Saturated Soil. II: Results for Compacted Clay. *J. Geotechn. Eng.* 117:485-506, 1991.
21. W. Jost, "Diffusion in Solids, Liquids and Gases". Academic Press, Nueva York, EEUA, 1960.
22. R. A. Robinson y R. H. Stokes, "Electrolyte Solutions". 2ª Ed., Butterworths Scientific Publications, Londres, Inglaterra, 1959.
23. R. B. Bird, W. E. Stewart y E. L. Lightfoot, "Transport Phenomena". John Wiley y Sons Inc., Nueva York, EEUA, 1960.

24. J. Bear, "Dynamics of Fluids in Porous Media". American Elsevier, Nueva York, EEUUA, 1972.
25. W. D. Kemper, D. E. L. Maasland y L. K. Porter, Mobility of water adjacent to mineral surfaces. Proc. Soil Sci. Society of American **28**: 164-167, 1964.
26. L. K. Porter, Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. Proc. Soil Sci. Soc. America, **24**:154-158, 1965.
27. H. M. Johnston, H. T. Chan y P. O. Ash, Evaluation of Trace Element Migration Rates Through a Clay Till Beneath a Fly Ash Disposal Area, Morgantown Energy Technology Center. Report DOE-MTS 85-60-18, Vol 1, Publicado por US-DOE, pp 436-444, 1985.
28. R. W. Gillham, M. J. L. Robin y H. M. Johnston, Diffusion of Nonreactive and Reactive Solutes Through Fine-grained Barrier Materials. *Can. Geotech. J.*, **21**: 541-550, 1984.
29. H. M. Johnston, R. W. Gillham, M. J. L. Robin y H. D. Sharma, Evaluation of Diffusion Coefficients for Strontium in Buffer Materials. Reporte No. 84-298-K, Ontario Hydro Res. Div., 1984.
30. B. J. Alloway, "Heavy Metals in Soils". John Wiley y Sons Inc., Nueva York, EEUUA, 1990.
31. A. H. P. Skelland, "Diffusional Mass Transfer". John Wiley y Sons Inc., Nueva York, EEUUA, 1974.
32. A. S. Foust, L. A. Wenzel, L. W. Clump, L. Maus, "Principios de Operaciones Unitarias". 2ª Edición, Editorial Continental, S. A. de C. V., México, 1987.
33. R. C. Reid y T. K. Sherwood, "Propiedades de los Gases y Líquidos: su Estimación y Correlación". 1ª Edición, UTEHA, México, 1968.
34. A. J. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 13ª Edición, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, EEUUA, 1972.

35. J. Crank, "The Mathematics of Diffusion". Clarendon Press, Oxford, Inglaterra, 1956.
36. D. J. Folkes, Control of Contaminant Migration by the Use of Liners. *Can. Geotech. J.*, 19:320-344, 1982.
37. J. R. Philip, y D. A. de Vries, Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients. *Trans. Am. Geophys. U.*, 38:222, 1957.
38. D. A. de Vries, Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media. *Trans. Am. Geophys. U.*, 39:909, 1958.
39. A. V. Luikov, Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies (Review). *Int. J. Heat Mass Transfer* 18:1, 1975.