



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO
DEL AGUA EN SUELOS ARCILLOSOS DEL
VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MÉXICO.**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

Narcedalia Juayerk Herrera

TUTORA DE TESIS: **Dra. Blanca Lucía Prado Pano**

JURADO EXAMINADOR

Dra. Christina Siebe Grabach
Dra. Silke Cram Heydrich
Dra. Blanca Lucía Prado Pano
Dr. Mario Villalobos Peñalosa
Dr. Eric Morales Casique

Presidente
Vocal
Secretario
Suplente
Suplente



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco en primer lugar a la Dra. **Blanca Prado** por haber confiado en mi persona, por la paciencia y entusiasmo contagioso, y por la dirección de este trabajo. A los doctores **Christina Siebe**, **Silke Cram**, **Eric Morales** y **Mario Villalobos**, que con sus observaciones contribuyeron a mejorar este trabajo.

Se agradece a la Dra. **Lucy Mora**; quien me dedicó todo el tiempo posible entre sus múltiples actividades y quien siempre se preocupó porque contara con el material necesario; también a la Dra. **Olivia Zamora** por sus enseñanzas sobre el manejo del equipo del laboratorio de Análisis de Aguas y elaboración de soluciones. Y a ambas se les agradece los consejos brindados y las observaciones realizadas al trabajo.

A **Iris Suarez** se le agradece la facilidad otorgada para la realización de los experimentos en el invernadero del Instituto de Geología, también a **Jaime Díaz** quien me enseñó el método de obtención de laminas delgadas en el Taller de Laminación del Instituto de Geología; y su análisis con el software Image Pro 5.2 de Edafología Microscópica. Se agradece de igual manera a **Kumiko Shimada** por su amabilidad en realizar diversos análisis químicos en los suelos evaluados, al igual que ha **René Alcalá** por permitirme usar el laboratorio de Física de Suelos y orientarme en la realización de diversos análisis físicos del suelo. Por último pero no menos importante se le agradece a **Pedro Morales** por realizar el análisis de isótopos estables en muestras de aguas, en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables del Instituto de Geología.

Al Ing. **Maya** que me permitió tomar muestras de suelo de sus tierras.

Caro, Armando y **Juan Carlos** por quienes fue posible realizar la colecta de muestras de suelo, muchas gracias. A **Juan Carlos** también le agradezco su tan amena compañía y todos sus conocimientos aportados durante la investigación.

Este trabajo fue financiado por los proyectos **CONACYT 99964** y **PAPIIT IN116310**. También recibí el apoyo de una **beca de posgrado CONACYT** y de una **beca como tesista del Instituto de Geología, UNAM**.

RESUMEN

Una de las funciones ecológicas del suelo es su capacidad amortiguadora de contaminantes, el suelo puede retener y/o transformar los solutos contaminantes que recibe, evitando y/o retrasando su llegada al acuífero. El movimiento del agua y solutos través del suelo, es afectado por las características físicas y químicas del suelo y del soluto, así como por los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren durante el paso de soluto por el suelo. Entre las características físicas del suelo, la estructura y porosidad son determinantes de la velocidad de movimiento de los solutos hacia el acuífero. En el Valle del Mezquital, en México, se emplean las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México para regar los campos agrícolas; esta zona representa uno de los sitios más antiguos y de mayor extensión en el mundo en que se realiza dicha práctica. En este sitio, el análisis del riesgo de contaminación del acuífero por algunos de los contaminantes que llegan junto con el agua residual, resulta indispensable. En el trabajo de tesis se caracterizó las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados del Valle del Mezquital y se realizó una caracterización de la red porosa del suelo empleando imágenes de láminas delgadas de suelo que fueron analizadas con el software Image Pro 5.2, determinando la porosidad de suelo, el tamaño y forma de poros, para cada horizonte estudiado. Posteriormente, se evaluó el movimiento de agua a través del suelo, realizando experimentos de transporte en columnas intactas de suelo en régimen permanente utilizando un isótopo estable (oxígeno 18) y se evaluó la utilización de un anión (bromuro, Br^-) como trazador del movimiento de agua. Obteniendo como producto principal del experimento las gráficas de elusión de Br^- y H_2^{18}O . Dichas gráficas junto con los datos experimentales se utilizaron para obtener el modelo de modo inverso empleando el algoritmo CXTFIT 2.1; los resultados obtenidos mostraron que bajo régimen permanente, el transporte de solutos ocurre en equilibrio físico, evidenciando que en los suelos evaluados, las grietas observadas en superficie se cierran al existir un contenido de humedad superior a la capacidad de campo del suelo. En el suelo se observó repulsión aniónica debida al contenido de arcillas y de materia orgánica, esto último en superficie. Finalmente, se sugieren las condiciones para utilizar el bromuro con trazador del movimiento de solutos en los suelos evaluados. Con el trabajo desarrollado y los resultados obtenidos en la tesis, se logró mejorar la comprensión de los procesos físicos que ocurren durante el movimiento de solutos en un suelo del Valle del Mezquital.

ABSTRACT

One of the ecological functions of soil is its capacity to buffer pollutants; soil can hold and/or transform the solute pollutants that receive, preventing and/or delaying their arrival in the aquifer. The movement of water and solutes through the soil is affected by physical and chemical characteristics of the soil and the solute, as well as the physical, chemical and biological processes that occur during the passage of the solute through the soil. Among the physical characteristics of soil, its structure and porosity determine the speed of movement of the solutes into the aquifer. In the Mezquital Valley in Mexico, wastewater from Mexico City is used to irrigate farmland; this area represents one of the most ancient and largest places in the world where this practice is performed. There an analysis of the risk of contamination of the aquifer by some of the pollutants in wastewater is essential. In the thesis, physical and chemical properties of the soils evaluated in the Mezquital Valley were characterized; a characterization of the soil pore network was performed using images of thin soil sections that were analyzed with Image Pro 5.2, determining the soil porosity, the size and shape of the pores, for each horizon studied. Subsequently, the movement of water through the soil was studied by conducting transport experiments in intact soil columns in steady state using a stable isotope (oxygen 18) and the use of an anion (bromide, Br⁻) to trace the movement of water was evaluated; the main product of the experiment was the breakthrough curve graphs of Br⁻ and H₂¹⁸O. These graphs together with the experimental data were used to run the algorithm CXTFIT 2.1 in an inverse mode. The results obtained showed that under steady state solute transport occurs in physical equilibrium, making evident that in the soils evaluated, the cracks observed on the surface close when there is moisture content above the soil field capacity. Anionic repulsion was observed in the soil because of clay content and organic matter, the latter on the surface. Finally, the conditions to use bromide with a tracer of solute movement in the soils evaluated are suggested. With the work done and the results achieved in the thesis, a better understanding was obtained of the physical processes that occur during the movement of solutes in a soil of the Mezquital Valley.

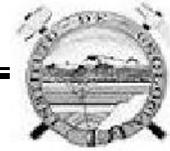
ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. TRABAJOS PREVIOS EN LA ZONA DE ESTUDIO	5
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. HIPÓTESIS	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. SUELO	7
Fase sólida del suelo.....	7
Fase inorgánica del suelo.....	7
Fase orgánica del suelo.....	8
Fase líquida del suelo.....	9
Funciones del suelo	9
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS QUE DETERMINAN EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EN EL SUELO.....	9
Textura	9
Densidad real (ρ_t)	11
Densidad aparente (ρ_a).....	11
Porosidad (η).....	11
Tamaño de poros	11
Caracterización de la fracción porosa del suelo.....	12
Superficie específica (S_E).....	13
Contenido de humedad (θ)	13
2.3. PROPIEDADES QUÍMICAS QUE DETERMINAN EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EN EL SUELO.....	14
pH	14
Conductividad eléctrica (CE).....	15
Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	15
2.4. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO.....	17
2.5. MOVIMIENTO DE SOLUTOS EN EL SUELO.....	18
Ecuación de transporte unidimensional para solutos no reactivos.....	20
Ecuación de transporte unidimensional para solutos reactivos	21
2.6. EXPERIMENTO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS EN EL SUELO	24
Escala del estudio: columnas de suelo	24
Tiempo experimental	25
Tipo de muestra	25
2.7. USO DE TRAZADORES EN CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA	25
2.8. ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE SOLUTOS EN COLUMNAS DE SUELO	27
2.9. CURVAS DE ELUCIÓN	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1. EL SITIO DE ESTUDIO.....	30
3.2. MUESTREO DE SUELO.....	31
Muestra de suelo perturbada.....	31
Núcleos de suelo	32
Columnas intactas	33

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	34
Densidad real.....	34
Densidad aparente.....	34
Textura.....	34
Curva de retención de humedad.....	34
La porosidad.....	35
Carbono y nitrógeno total del suelo.....	35
Superficie específica.....	35
El pH y la conductividad eléctrica (CE).....	35
Cationes intercambiables.....	35
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA RED POROSA DEL SUELO.....	35
Elaboración y digitalización de láminas delgadas.....	35
Procesamiento de la imagen digital de las láminas delgadas de suelo.....	37
Caracterización de la red porosa: determinación de los diferentes parámetros.....	38
3.5. EXPERIMENTO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS EN COLUMNAS DE SUELO INTACTAS.....	38
Columnas de suelo.....	39
Solutos y compuestos a emplear.....	39
Preparación de la columna y dispositivo experimental.....	39
Parámetros a monitorear.....	41
Descripción del experimento.....	41
3.6. ANÁLISIS DE SOLUTOS.....	42
Aniones y cationes.....	42
Trazadores.....	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DEL SUELO EN ESTUDIO.....	43
pH.....	44
Conductividad eléctrica.....	44
Nitrógeno y carbono total.....	44
Cationes intercambiables.....	44
Densidad aparente y densidad real.....	45
Textura y superficie específica.....	45
Porosidad.....	45
Curva de retención de humedad.....	45
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA.....	47
Caracterización de la red porosa.....	47
Transporte de solutos.....	49
Aniones y cationes.....	49
Trazadores: Oxígeno 18 (¹⁸ O) y Bromuro (Br-).....	51
Repulsión aniónica.....	55
El bromuro como trazador en suelos del Valle del Mezquital.....	57
5. CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	66

RELACIÓN DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICAS

Tabla 2.1 Propiedades físico – químicas de las arcillas minerales presentes en el Valle del Mezquital, los valores presentados son aproximados.....	8
Tabla 2.2 Clasificación por tamaño de las partículas del suelo.....	10
Fig. 2.1 Triángulo textural.....	10
Tabla 2.3 Relación entre el tamaño de poros y partículas.....	12
Tabla 2.4 Clasificación de los suelos según su pH y sus efectos en el cultivo.....	14
Tabla 2.5 Clasificación de los suelos según su CE y sus efectos en el cultivo,	15
Fig. 2.2 Representación esquemática del intercambio iónico en el suelo.	15
Fig. 2.3 Representación esquemática del modelo de la doble capa difusa en las cercanías de una arcilla..	16
Tabla 2.6 Ejemplos de reacciones que se presentan en el suelo según el tiempo de monitoreo.....	25
Fig.2.4 Curvas de elución de un trazador inerte	28
Fig.3.1 Localización del área de estudio	30
Fig.3.2 Superficie del suelo estudiado con cultivo, se observan grietas en el suelo.....	31
Fig.3.3 Imagen de la forma en que se empleó el muestreador en campo	32
Fig. 3.4 Procedimiento de muestreo de columnas intactas.....	33
Tabla 3.1 Presiones empleadas para desalojar el agua presente en la red porosa del suelo	35
Fig.3.5 Proceso para la elaboración de láminas delgadas.....	36
Fig.3.6 Sección delgada procesada en Image Pro® 5.2.....	37
Fig.3.7 Simulador de lluvia de teflón empleado durante el experimento de transporte.	38
Fig. 3.8 Dispositivo experimental	40
Tabla 3.2 Parámetros de experimento de transporte en columnas de suelo.....	41
Tabla 4.1 Propiedades físicas y químicas del suelo	43
Gráfica 4.1 Curvas de retención de humedad a las profundidades evaluadas.....	46
Gráfica 4.2 Tamaño y forma de poros en el suelo superficial.....	47
Gráfica 4.3 Tamaño y forma de poros en el suelo sub-superficial.	48
Gráfica 4.4 Se muestran la duración del experimento en volumen de poro y la concentración de los iones detectados en la solución de salida de la columna de suelo.	50
Gráfica 4.5 Curva de elución de los trazadores aplicados en el suelo superficial.....	52
Gráfica 4.6 Curva de elución de los trazadores aplicados en el suelo sub-superficial.	53
Tabla 4.2 Parámetros determinados con CXTFIT 2.1	54
Tabla 4.3 Valores obtenidos del volumen de exclusión aniónica para el bromuro	56



1. INTRODUCCIÓN

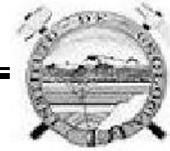
El Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, es la superficie agrícola regada con aguas residuales más grande del mundo. En el sitio se riegan aproximadamente 130,000 hectáreas con aguas negras provenientes de la Ciudad de México (Garza, 2000). El empleo de agua residual en el riego de campos agrícolas es una práctica que va en aumento en países en vías de desarrollo que no pueden costear el tratamiento de sus aguas y que usan el suelo como alternativa a la disposición del agua residual en cuerpos de agua superficiales.

El riego con aguas residuales permite aprovechar los nutrientes contenidos en el agua para el desarrollo de los cultivos, disminuyendo así el uso y gasto en fertilizantes químicos. También es una forma de optimizar el uso del agua para la recarga de acuíferos y en la agricultura, siendo ésta última la actividad que más agua consume a nivel mundial (Jiménez-Cisneros, 1995; Siebe, 1998). Además de los nutrientes, el agua residual contiene diversos compuestos disueltos y/o suspendidos, tales como, hidrocarburos, detergentes, metales pesados, fármacos, iones (BGS et al., 1998; Helmer y Hespanhol, 1997). Esto se debe a que las aguas residuales que llegan al sitio, no solamente se constituyen de desechos domésticos y comerciales, sino que a menudo están contaminadas por residuos tóxicos industriales y descargas de hospitales, que arrojan sus aguas residuales a la red municipal de alcantarillado.

Uno de los resultados positivos del riego con agua residual es la recarga del acuífero del Valle del Mezquital. Este acuífero en la actualidad se usa para abastecer con agua potable a varios poblados dentro del valle y en años recientes se ha propuesto emplear el agua del acuífero del Valle del Mezquital como fuente de agua potable para la Ciudad de México (Jiménez y Chávez, 2004). Sin embargo existe el riesgo de que estas aguas se encuentren alteradas por los solutos contaminantes que llegan junto con el agua de riego. En este contexto resulta de gran interés caracterizar el movimiento del agua y solutos en los suelos que están sujetos a riego con agua residual para lograr comprender los procesos que definen su movimiento en este medio.

En el presente trabajo se realizó una caracterización del movimiento del agua en suelos del Valle del Mezquital, con la finalidad de que los parámetros obtenidos puedan ser empleados en futuros estudios que evalúen el riesgo de contaminación del suelo y acuífero por los solutos que llegan en el agua de riego. En el estudio se evaluaron dos horizontes de un perfil de suelo, un horizonte superficial cuya estructura es afectada por el manejo agrícola y otro a mayor profundidad que no se ve afectado por dicha actividad.

La organización de la tesis es la siguiente, en el capítulo del marco teórico que contiene los conceptos básicos de suelo, y de los procesos en los que se ve envuelto el agua/solutos en su movimiento a través del suelo. En el capítulo de metodología se presentan los métodos empleados para la caracterización física y química del suelo, así como una descripción detallada del experimento de transporte en columnas intactas de suelo y de



la caracterización de la red porosa. En el capítulo de resultados y discusión, se presentan los datos que se obtuvieron a partir de las mediciones, análisis y experimentos realizados, y se discuten los efectos de las propiedades analizadas sobre el movimiento del agua en los suelos estudiados. Por último se presentan las conclusiones obtenidas del estudio realizado, así como recomendaciones para futuros estudios.

1.1. Trabajos previos en la zona de estudio

En el Valle del Mezquital, las aguas subterráneas han sido estudiadas por Gutiérrez y Silva (1998) quienes realizaron un modelo hidrogeoquímico del Valle, mientras la BGS (1998) realizó un estudio del impacto que tiene el uso de aguas residuales en las aguas subterráneas del valle; por otro lado, el flujo subterráneo y la influencia del fracturamiento en rocas sobre éste han sido estudiados por Cervantes-Medel y Armienta (2004). Previamente Del Arenal (1985) realizó un estudio hidrogeoquímico en el Valle del Mezquital, donde concluyó que en el sitio existen tres mantos acuíferos, de los cuales determinó su comportamiento y litología, y evaluó la influencia que tiene el riego con aguas residuales sobre estos acuíferos.

Los trabajos referentes al riesgo de contaminación de agua y suelo por diversos solutos en la zona son los de Gibson et al. (2007) y Siemens et al. (2008), los cuales desarrollaron las primeras aproximaciones sobre el riesgo ambiental de exposición a fármacos en el sistema Ciudad de México-Valle del Mezquital. Gibson et al. (2007) validaron una técnica analítica para determinar diversos contaminantes emergentes. Siemens et al. (2008) estimaron la concentración teórica de fármacos liberados al ambiente (agua y suelo), se basaron en datos sobre el consumo de fármacos y la concentración de los mismos en las aguas residuales, y realizaron mediciones en diversos puntos del sistema de irrigación con aguas residuales crudas provenientes de la Ciudad de México, en la región agrícola del Valle del Mezquital. Müller et al. (2012) evaluaron el transporte de atrazina en dos tipos de suelo bajo diferente historial de irrigación, en el Valle del Mezquital.

También existen numerosas investigaciones que versan sobre el efecto del riego con aguas residuales en la calidad y cantidad del agua subterránea (BGS y CNA, 1995); la acumulación de metales en el suelo y su incidencia en enfermedades gastrointestinales (Siebe y Cifuentes, 1995); y sobre la fertilidad del suelo y la acumulación de metales en el suelo (Gutiérrez et al., 1996; Siebe y Fischer, 1996). Adicionalmente, Helmer y Hespanhol (1997) realizaron un estudio integral acerca del sistema de riego dentro del Valle; Siebe (1998) evaluó la entrada de nutrientes a través del agua residual y su efecto sobre la producción agrícola. Sin embargo, no existen trabajos en los que se describa el proceso físico del transporte de solutos disueltos en los suelos del Valle del Mezquital, ni trabajos que describan cómo las características físicas y químicas del suelo influyen en el destino de los diferentes solutos.



1.2. Objetivos

General

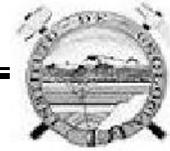
Evaluar y determinar los procesos que afectan el movimiento del agua en dos horizontes (uno superficial y otro sub-superficial) de un suelo arcilloso del Valle del Mezquital; que se encuentra en una parcela agrícola tecnificada regada con agua residual por más de 80 años.

Particulares

- ❖ Identificar los procesos que definen el movimiento del agua en los dos horizontes estudiados.
- ❖ Evaluar la variabilidad de poros en los horizontes y su efecto en el movimiento del agua.
- ❖ Caracterizar el movimiento del bromuro en los horizontes estudiados e identificar las propiedades del suelo que determinan su movimiento.

1.3. Hipótesis

- ❖ El uso y manejo del suelo modifica las propiedades físicas y químicas naturales del suelo, afectando el movimiento del agua y muy probablemente de los solutos que sean depositados en el suelo. El laboreo intensivo del suelo permitiría la formación de macroporos que a su vez favorecería el movimiento del agua a través del suelo.
- ❖ Debido al alto contenido de arcillas (esmectita) y su característica de expansión contracción; en los horizontes evaluados existen flujos preferenciales por los cuales el movimiento del agua y solutos se ve favorecido.
- ❖ El movimiento del agua y solutos varía en función de las características del suelo y del soluto en cuestión. En el suelo arcilloso del Valle del Mezquital el movimiento de los aniones sería afectado por la repulsión aniónica; lo cual permitiría una salida anticipada del anión del suelo debido a la similitud de cargas entre el suelo y el soluto.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Suelo

El suelo es la capa superficial que recubre a la Tierra, la cual está compuesta por una fase sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida del suelo está constituida por partículas de material inorgánico de origen litosférico y orgánico (tejidos vegetales y animales muertos en proceso de descomposición), entre estas partículas existen espacios libres que es donde quedan almacenados los gases, que a su vez pueden ser desplazados por líquidos (agua) que entran en contacto con el suelo. El suelo es un medio poroso y abierto, en el cual se dan constantes interacciones químicas, físicas y biológicas.

Fase sólida del suelo

Fase inorgánica del suelo

Esta fase es representativa para cada suelo, se ve determinada por los factores formadores del suelo, principalmente por el material parental, en el suelo se puede encontrar en tres tamaños de partículas: arena, limo y arcilla. Esta última es el compuesto inorgánico más abundante en el suelo.

Las arcillas son minerales secundarios de un tamaño inferior a $2\mu\text{m}$; que cuenta con diversas propiedades físicas y químicas que se derivan principalmente de su arreglo estructural, el tamaño de la partícula y su composición química. Las arcillas presentan una superficie específica elevada, cuentan con una elevada capacidad de intercambio catiónico y aniónico, y algunas, las que tienen un espacio interlamilar, pueden absorber otros iones y/o agua en él. Según Tan (1994), existen cuatro grupos de minerales secundarios:

- ❖ Arcillas amorfas, como el alofano,
- ❖ Las arcillas silicatadas cristalinas, tales como la caolinita, mica, montmorillonita, vermiculita y clorita.
- ❖ Sesquióxidos metálicos, entre las que se encuentran la goetita, hematita y gibsita
- ❖ Minerales de sílice, compuestos totalmente de sílice.

Siebe (1994) determinó que en los suelos del Valle del Mezquital están presentes arcillas minerales del tipo esmectita (63-97%), illita (3-12.5%) y caolinita (1.1-6.6 %). A continuación se presentan las características de este tipo de arcillas (Tabla 2.1).



Tabla 2.1 Propiedades físico – químicas de las arcillas minerales presentes en el Valle del Mezquital, los valores presentados son aproximados (Hillel, 2008).

Propiedad	Arcilla mineral		
	Caolinita	Illita	Esmectita
Diámetro planar (μm)	0.1-4	0.1-2	1.01-1
Espacio interplanar (Å)	7.2	10	10
Espesor de partícula (Å)	500	50-300	10-100
Área superficial específica (m^2/g)	5-20	80-120	700-800
Capacidad de intercambio catiónico (mEq/100g)	3-15	15-40	80-100
Área de carga (Å^2)	25	50	100

Fase orgánica del suelo

Esta fase del suelo está formada por la acumulación de residuos orgánicos en distintos grados de descomposición y en parte re-sintetizados, gracias a la acción de los organismos del suelo. Se puede dividir en materia orgánica fresca (no humificada) y humus.

La materia orgánica fresca está compuesta por los restos vegetales y animales, es la materia prima para la formación de sustancias húmicas. Mientras que el humus, es la materia orgánica en descomposición que se encuentra en el suelo, procede de la materia orgánica fresca. La composición química del humus varía porque depende de la acción de organismos vivos del suelo. El humus es una materia homogénea, amorfa y de color oscuro. El humus al descomponerse produce una serie de productos coloidales que, en unión con los minerales arcillosos, originan los complejos organominerales. Estos coloides son de carga negativa, lo que les permite adsorber H^+ y cationes metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e intercambiarlos en todo momento de forma reversible. Los productos finales de la descomposición del humus son sales minerales, dióxido de carbono y amoníaco.

La materia orgánica del suelo desempeña un papel importante en el suelo ya que da lugar a una estructura del suelo, que eleva la porosidad y permeabilidad del suelo; también cuenta con una alta capacidad de retención de agua y de adsorber solutos (Vázquez y Tapias, 2008). Estas propiedades permiten considerar a la materia orgánica como un mejorador de las características físicas y químicas del suelo.



Fase líquida del suelo

El agua del suelo se encuentra almacenada en los poros presentes en el suelo, estos poros pueden estar parcialmente o completamente ocupados por agua. El agua se mueve a través de los poros, en su recorrido, el agua puede disolver y/o transportar solutos.

A la cantidad de agua presente en el suelo en un momento determinado, se le conoce como contenido de humedad, esta se ve afectada por la geometría, forma, tamaño y conectividad de los poros.

Funciones del suelo

En el medio ambiente el suelo tiene un papel muy importante, ya que es aquí donde se desarrollan las plantas, brindándoles agua y los nutrientes necesarios para su sustento; también existen diversas especies de animales que encuentran en el suelo, un lugar donde habitar y desarrollarse. El suelo es el soporte de la infraestructura de donde vivimos. Además, como se mencionó anteriormente, el suelo presenta poros que le permiten almacenar y/o transmitir agua al subsuelo, esto depende, de la conectividad y del tamaño de los poros; gracias a esto el suelo es un regulador del ciclo hidrológico. También se considera al suelo como filtro y/o transformador de solutos, ya que los solutos al momento de entrar en contacto con el suelo se ven envueltos en diversos procesos, los cuales pueden hacer que cambien su concentración y/o composición, determinando el destino de los solutos en el medio ambiente.

2.2. Propiedades físicas que determinan el transporte de solutos en el suelo

En el suelo los solutos suelen estar presentes en la fase líquida, lo cual permitiría el movimiento del soluto a través de los poros presentes en el suelo. Durante el movimiento de solutos en el suelo, puede que exista una adsorción, cambio de estado, o pérdida (degradación, extracción) del soluto en el suelo. Es decir el transporte de solutos, se ve definido por propiedades físicas y químicas del suelo y del soluto, resultando necesario considerar dichas propiedades durante el estudio del movimiento del agua y solutos en el suelo. A continuación se presentan las propiedades físicas del suelo que se evaluaron en el presente estudio.

Textura

Esta representa el porcentaje de partículas de diferentes tamaños que constituyen la fase inorgánica sólida del suelo. Por su tamaño, las partículas del suelo se clasifican en tres grandes grupos principales arena, limo y arcilla (Tabla 2.2). Este porcentaje depende directamente de la génesis del suelo y del material parental de este.



Densidad real (ρ_t)

Es la relación entre la masa seca de partículas de suelo (M_p) por unidad de volumen de las mismas partículas (V_p). La densidad real está definida por el material parental del suelo.

$$\rho_t = \frac{M_p}{V_p}, (\text{ML}^{-3})... (2.1)$$

Densidad aparente (ρ_a)

Es la relación que existe entre la masa seca del suelo (M_s) y el volumen total (V_t) que este ocupa.

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t}, (\text{ML}^{-3})..... (2.2)$$

La densidad aparente del suelo depende de la densidad real del suelo, de la cantidad de materia orgánica presente en el suelo, de la compactación, de la actividad de los organismos y de la presencia de raíces. El valor de este parámetro oscila entre 0.8 y 1.25 g/cm^3 , con este parámetro se puede inferir algunas propiedades del suelo, por ejemplo, un suelo con baja densidad suele tener mayor porosidad, menor compactación y mayor contenido de humedad.

Porosidad (η)

Son los espacios presentes entre las partículas, ya sean primarias o secundarias, que conforman la fase sólida del suelo, estos espacios o poros pueden o no estar interconectados, en estos huecos se pueden alojar líquidos y/o gases. La porosidad total (η) en los suelos se obtiene de la relación entre la densidad real y la densidad aparente y se expresa en %, en dicha relación se considera que M_s es igual a M_p .

$$\eta = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} * 100(2.3)$$

Los poros del suelo presenta un tamaño, forma, conectividad y tortuosidad, que determinan el movimiento y disponibilidad del agua, por lo que resulta de gran interés evaluar dichos parámetros para los poros presentes en el suelo y determinar se efecto en el movimiento de agua.

Tamaño de poros

Determina el movimiento del agua en el suelo y es definido por la textura y la estructura del suelo, ésta última es la agregación de las partículas del suelo. La textura se



define como la distribución del tamaño de partículas primarias del suelo (arenas, limos, arcillas). La estructura se define como la forma que toman los grupos de partículas (limo, arcilla y arena) presentes en el suelo (agregados). A continuación se presenta una clasificación y función de los poros según su tamaño.

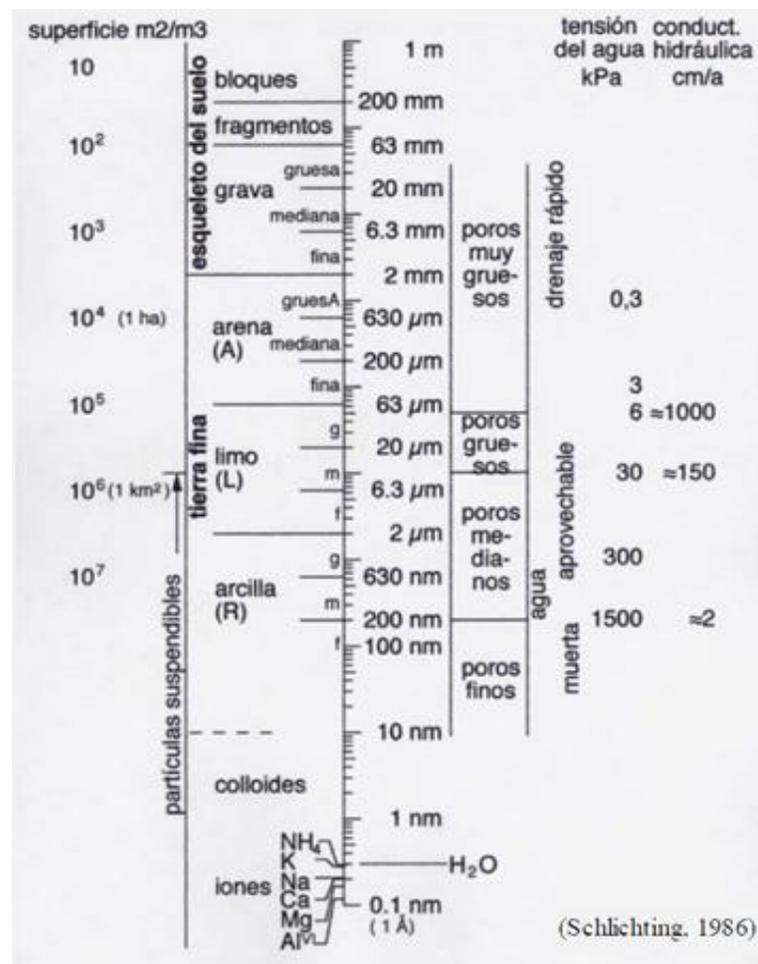
- Macroporos $> 100 \mu\text{m}$, estos poros permiten la aeración del suelo y favorecen el movimiento del agua por gravedad.
- Mesoporos $30 - 100 \mu\text{m}$, en estos poros se almacena agua, que está disponible para las plantas. El agua se mueve por capilaridad de manera mas rápida que en los microporos.
- Microporos $< 30 \mu\text{m}$, el movimiento del agua a través de estos poros se da por capilaridad de forma lenta, en ocasiones se considera que el agua no se mueve (suelo impermeable). El agua que queda almacena en estos poros es el agua higroscópica, esta agua no es aprovechable por las plantas.

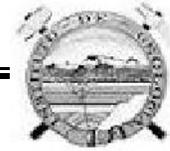
A continuación se presenta la Tabla 2.3, en la cual se puede observar la relación que existe entre el tamaño de partículas y el tamaño de poros presentes en el suelo; también se presentan datos teóricos de la tensión a la que se encontrará adsorbida el agua a las partículas del suelo, y con ello se podría inferir el movimiento del agua y su disponibilidad para las plantas.

Caracterización de la fracción porosa del suelo

Existen diversas herramientas para cuantificar y caracterizar la red porosa del suelo, una de las más empleadas y la que se utilizó en el trabajo, es la micromorfología.

Tabla 2.3 Relación entre el tamaño de poros y partículas.





Micromorfología

La micromorfología es una rama de la ciencia del suelo que incluye la descripción, la interpretación y la estimación de los componentes característicos de los suelos a nivel microscópico (Bullock et al., 1985). Históricamente la micromorfología ha sido relacionada a la génesis del suelo, sin embargo, durante los últimos años, su aplicación se ha extendido a los diferentes dominios de la ciencia del suelo y la hidrología (Protz et al., 1987). El análisis de imágenes ha sido utilizado para medir la distribución de las formas de los poros en diversos horizontes de suelo (Ismail, 1975) y para caracterizar la irregularidad, orientación, la forma y el tamaño de los poros (Murphy et al., 1977). Así también, el análisis de imágenes de suelos ha sido utilizado para obtener los parámetros de los modelos de transferencia de solutos (Forrer et al., 2000), y para explicar las formas de las curvas de elución obtenidas en experimentos de transferencia de solutos (Walker y Trudgill, 1983; Sugita et al., 1995; Prado et al. 2009).

En el presente trabajo se emplearon imágenes digitales de laminas delgadas del suelo, las cuales se procesaron con un software especializado (Image Pro 5.2) con el cual se logró determinar porosidad total, forma y tamaño de poro; la metodología empleada se presenta en el siguiente capítulo.

Superficie específica (S_E)

Se define como la relación entre el área superficial de las partículas de suelo (A_s) y la unidad de masa total (M_t) del suelo (Bear, 1972).

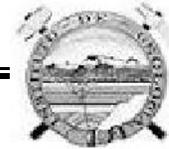
$$S_E = \frac{A_s}{M_t}, (L^2M^{-1})..... (2.4)$$

Es una propiedad específica de las partículas del suelo, siendo las arcillas y materia orgánica las que presentan mayor superficie específica por lo que su presencia incrementaría la superficie específica del suelo.

Contenido de humedad (θ)

Es la cantidad de agua presente en el suelo en un momento determinado. Este contenido de agua se ve definido por la forma y tamaño de la red porosa del suelo. El contenido de humedad varía a través del tiempo, y está en función del momento en el que se mida, por ejemplo, inmediatamente después de un evento de riego o lluvia, la humedad es mayor que si se dejara pasar cuatro horas.

El contenido de humedad se puede definir de la siguiente forma:



- a. Humedad volumétrica (θ_v), es la relación entre el volumen de agua (V_a) presente en el suelo y el volumen total (V_t) que ocupa el suelo.

$$\theta_v = \frac{V_a}{V_t}, (L^3 L^{-3}).... (2.5)$$

- b. Humedad gravimétrica, (θ_g), es la relación entre la masa del agua (M_a) y la masa de suelo seco (M_s).

$$\theta_g = \frac{M_a}{M_s}, (M M^{-1})..... (2.6)$$

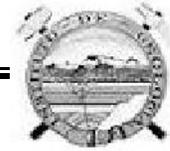
2.3. Propiedades químicas que determinan el transporte de solutos en el suelo

pH

Representa la concentración de iones hidrógeno presentes en el suelo, expresada de manera logarítmica con una escala de 0 - 14. El pH nos permite inferir la acidez y alcalinidad de un suelo, siendo ácidos los suelos con un pH inferior a 7 y alcalinos los suelos con pH mayor a 7, considerando neutrales los suelos que rondan un pH de 7. El pH afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. A pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. En pH alcalino, la arcilla se dispersa, se destruye la estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico. La disponibilidad de nutrientes del suelo está influenciadas por el pH. El pH también influye en las comunidades de microorganismos que realizan los procesos de composición, siendo un aspecto crucial para el resultado de la calidad del humus (Vásquez y Tapias, 2008).

Tabla 2.4 Clasificación de los suelos según su pH y sus efectos en el cultivo (tomado de Vásquez y Tapias, 2008).

pH	Evaluación	Efectos esperables
< 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4,5-5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al
5,1-5,5	Fuertemente ácido	Exceso de Co, Cu, Fe, Mn, Zn Deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P,S Actividad bacteriana escasa
5,6-6,0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6,1-6,5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6,6-7,3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos Por debajo de pH=7 no hay carbonato cálcico en el suelo
7,4-7,8	Medianamente básico	Suelos generalmente con CaCO ₃
7,9-8,4	Básico	Disminuye disponibilidad de P y B Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn Clorosis férrica
8,5-9,0	Ligeramente alcalino	En suelos con carbonatos, puede deberse a MgCO ₃ si no hay sodio intercambiable
9,1-10,0	Alcalino	Presencia de carbonato sódico
>10	Fuertemente alcalino	Elevado porcentaje de Na intercambiable Toxicidad por Na, B Actividad microbiana escasa Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo



Conductividad eléctrica (CE)

Este parámetro se obtiene de la fase líquida del suelo, se define como la capacidad del medio para conducir una corriente eléctrica. Se mide en la fase líquida ya que los iones disueltos, son los que se encargan de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la carga de los iones presentes y de su movilidad, por ejemplo si en el líquido existen gran cantidad de sales, la conductividad eléctrica será mayor. En la Tabla 2.5 se presenta la clasificación del suelo según su CE y su efecto sobre los cultivos.

Tabla 2.5 Clasificación de los suelos según su CE y sus efectos en el cultivo, según United States Salinity Laboratory of Riverside.

CE (mS/cm-25°C)	Suelos	Efectos
0-2	Normales	
2-4	Ligeramente salinos	Negativos en cultivos muy sensibles
4-8	Salinos	Negativos en la mayoría de los cultivos
8-16	Fuertemente salinos	Sólo se obtiene rendimiento en los cultivos tolerantes
>16	Extremadamente salinos	Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El intercambio iónico en el suelo se da cuando la fase sólida de éste adsorbe iones de la fase líquida liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose un equilibrio entre ambas fases (Fig. 2.2). El intercambio iónico se debe a los desequilibrios eléctricos de las partículas del suelo. Para neutralizar las cargas se adsorben iones, que se adhieren a la superficie de la fase sólida, quedando débilmente retenidos, por lo que se pueden intercambiar con otros iones de la solución del suelo.

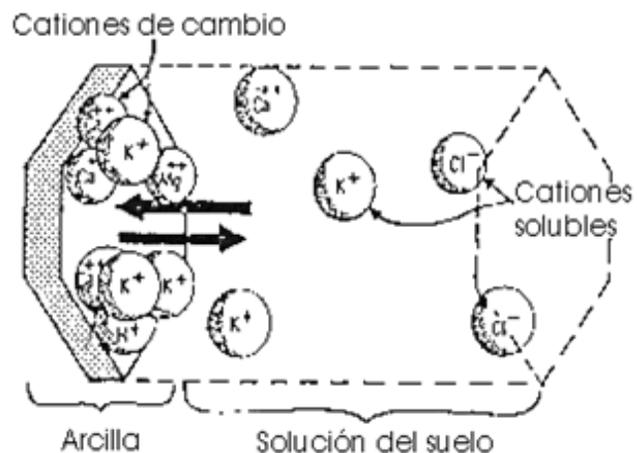


Fig. 2.2 Representación esquemática del intercambio iónico en el suelo.

Según se intercambien cationes o aniones se habla de capacidad de intercambio catiónico o aniónico, respectivamente.



La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es la cantidad de cationes que pueden ser adsorbidos por el suelo, para así compensar las cargas negativas presentes en éste. La capacidad de intercambio catiónico representa la facilidad del suelo para intercambiar cationes presentes en la interfaz sólido – líquido, se puede definir como la concentración de moles de iones positivos que pueden ser adsorbidos por la fase sólida del suelo a un determinado pH. La carga negativa del suelo se debe principalmente a:

~ Sustituciones isomórficas dentro de la estructura laminar de los filosilicatos, que produce carga negativa permanente, es decir, independiente del pH, concentración de electrolitos o composición de la solución externa.

~ Disociación de grupos funcionales ácidos en las aristas y superficies externas de arcillas y en compuestos orgánicos, esta carga varía en magnitud de acuerdo al pH y fuerza iónica, por lo que se le denomina carga variable. A pH bajos los iones de hidrogeno están fuertemente retenidos en las superficies de las partículas, pero a pH altos los H^+ de los grupos hidroxilos, carboxílicos y fenólicos superficiales, se disocian respectivamente, y pueden ser intercambiados por cationes.

La capacidad de intercambio catiónico se ve determinada por varios factores, entre los que se encuentran, tamaño de las partículas, entre más pequeña sea la partícula más grande será la capacidad de cambio, la naturaleza de las partículas, la composición y estructura de las partículas influirá en las posibilidades de cambio de sus cationes, tipo de cationes cambiables y pH.

Los cationes que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son los siguientes, los cuales se presentan según sus posiciones de intercambio: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} .

Para esquematizar la distribución de estos cationes adsorbidos en la zona de carga variable de las partículas sólidas del suelo se utiliza el modelo de la doble capa difusa (DCD). En este esquema tenemos una capa eléctrica negativa rígida en la fase sólida y una capa difusa de cationes adsorbidos y en equilibrio dinámico con los cationes de la solución del suelo.

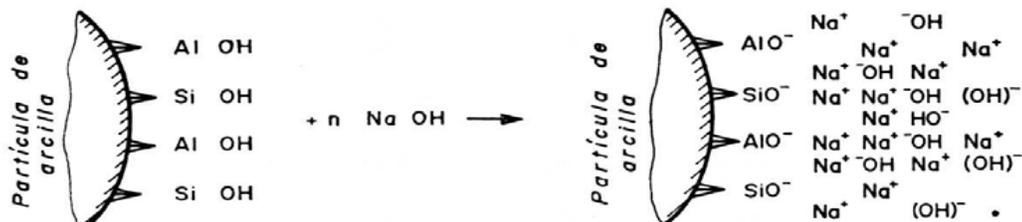


Fig. 2.3 Representación esquemática del modelo de la doble capa difusa en las cercanías de una arcilla. En la fase líquida alrededor de las partículas de arcilla se forma una concentración de cationes y de agua dipolar, donde coexiste una elevada concentración de cationes y de aniones (en menor cantidad) en las cercanías de la lámina de arcilla que va perdiendo concentración a medida que nos alejamos de ella (Nadeo y Leoni, 2002)



La capa difusa de cationes se produce por la tendencia de los cationes a difundirse una cierta distancia desde la superficie del sólido hasta que se alcanza un equilibrio entre las fuerzas de atracción eléctrica de Coulomb y la difusión debida a la energía térmica de los iones. Como consecuencia existe un gradiente de concentración de iones desde la superficie del sólido hacia la solución de mayor a menor, respectivamente.

2.4. Movimiento del agua en el suelo

El suelo es un medio poroso, el cual permite el paso de agua a través de él. El movimiento del agua en el suelo, fue descrito por Darcy en 1856. La ley de Darcy describe el volumen de agua que circula a través de una superficie con respecto al tiempo, asumiendo que el suelo es un espacio poroso y saturado, a continuación se presenta la ley de Darcy para un flujo vertical en términos de la carga hidráulica:

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} \dots\dots (2.7)$$

q = Densidad de flujo o velocidad de flujo (LT^{-1}),
 $\partial H/\partial z$ = es el gradiente de presión de agua en el medio, también conocida como carga hidráulica. Representa la variación de la carga hidráulica en la dirección del flujo.
 K = conductividad hidráulica del suelo (LT^{-1}), se representa como K_s en condiciones de flujo saturado.

La conductividad hidráulica se define como la capacidad del medio poroso para transmitir agua (Porta et al., 2003). La conductividad hidráulica se ve afectada por la textura, el tamaño y la forma de los poros, y por la viscosidad del agua en el medio, el suelo presenta una resistencia al flujo de agua, lo cual se debe a las fuerzas de interacción entre las moléculas del líquido y del suelo. La conductividad hidráulica es un parámetro que varía a lo largo del perfil del suelo, ya que el suelo es un medio heterogéneo.

Richards (1931) describe el flujo de agua tanto para condiciones saturadas como no saturadas, en forma unidimensional, con la ley de Buckingham-Darcy relacionando la densidad de flujo o velocidad de flujo q a la conductividad hidráulica y el gradiente de la humedad volumétrica o del potencial de agua del suelo mediante la relación.

$$q = -K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \dots\dots (2.8)$$

q = velocidad de percolación profunda del agua (LT^{-1}),
 $K(h)$ = Conductividad hidráulica del suelo no saturado K (LT^{-1}) en función del potencial matricial,
 h = Potencial matricial del agua en el suelo (L),
 z = profundidad en la dirección en la que se evalúa el movimiento del agua (L).

Esta ecuación asume dos hipótesis principales:



1) La fuerza que provoca el flujo isotérmico del agua en un suelo rígido y no saturado, es la suma del potencial matricial (de presión) y el potencial gravitacional. El potencial de presión del aire es cero.

2) La conductividad hidráulica del suelo no saturado es una función del contenido de agua o del potencial de presión.

Los experimentos realizados en el presente trabajo se realizaron en régimen permanente, por lo que se considera un estado estacionario. Ahora, bajo el supuesto de que el agua es incompresible, la aplicación del principio de conservación de masa al flujo de agua en un suelo indeformable permite establecer la ecuación de continuidad siguiente (Richards, 1931):

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0 \dots (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación (2.8) en la (2.9), se obtiene la ecuación diferencial de flujo insaturado del agua a través del perfil del suelo y subsuelo denominada la forma potencial matricial de la Ecuación de Richards (Jury et al., 1991):

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \right\} = 0 \dots (2.10)$$

Los valores h y $K(h)$ son propiedades hidrofísicas del suelo.

Las fuertes variaciones de $K(h)$ con la presión o la humedad, confieren a esta ecuación un carácter fuertemente no lineal.

2.5. Movimiento de solutos en el suelo

Existen compuestos que se mueven a través del suelo empleando como medio de transporte la fase líquida del suelo. Es por ello que el movimiento de solutos en el suelo se ve determinado tanto por la naturaleza del compuesto presente en la solución (soluta), así como por la naturaleza del líquido en el cual están presentes los compuestos (solvente). En general, los compuestos pueden existir en tres fases en el suelo: pueden estar disueltos en agua, como vapor en la atmósfera del suelo y como fase estacionaria adsorbida a la materia orgánica del suelo o en las superficies minerales. La concentración total (C_t) del compuesto, expresada en unidades de masa por volumen de suelo se representa así (van Genuchten y Wierenga, 1976):

$$C_t = aC_g + \theta_v C + \rho_a C_1 \dots (2.11)$$

C_g = concentración gaseosa del compuesto (masa del compuesto en vapor por volumen de aire)

a = contenido volumétrico de aire ($L^3 L^{-3}$)

C = concentración del compuesto en la solución del suelo expresada como masa del soluto por volumen de solución ($M L^{-3}$);

C_1 = concentración del compuesto adsorbido expresada como masa del soluto por masa de suelo seco ($M M^{-1}$).



Para el caso de un soluto poco o no volátil ($C_g \cong 0$), caso que es de interés en este trabajo, se considera la migración del soluto solamente en la fase sólida y en la fase líquida. Entonces la concentración del soluto es igual al soluto presente en la solución del suelo.

$$C_t = \theta_v C + \rho_a C_1 \dots \dots (2.12)$$

Para el caso de solutos no adsorbibles y no degradables, caso de interés en el presente estudio, tres mecanismos principales propician el movimiento del soluto en el suelo:

1) *Difusión* (F_{dif}). Es un proceso químico en el que el movimiento de las moléculas del soluto en el solvente se lleva a cabo a través de un gradiente de concentración (de mayor a menor concentración), y por la agitación térmica de las moléculas (Ley de Fick). Se representa de la siguiente manera (Leij y van Genuchten, 1999):

$$F_{dif} = -D_{mol} \theta_v \frac{\partial C}{\partial z} \dots \dots (2.13)$$

F_{dif} = flujo del soluto por difusión ($M L^{-2} T^{-1}$),
 D_{mol} = coeficiente de difusión molecular de la sustancia en el medio poroso ($L^2 T^{-1}$),
 θ_v = humedad volumétrica del suelo ($L^3 L^{-3}$),
 $\partial C / \partial z$ = variación de la concentración en la dirección z.

2) *Dispersión* (F_{disp}). Representa el movimiento del soluto, debido a variaciones del medio donde se mueve. En el caso del suelo, este movimiento se da por cambios en el tipo, tamaño y orientación de los poros, y también por los cambios de velocidad que ocurren incluso en un mismo poro. A este movimiento del soluto se le denomina *dispersión mecánica* y se describe con la siguiente ecuación (Leij y van Genuchten, 1999):

$$F_{disp} = -D_{mec} \theta_v \frac{\partial C}{\partial z} \dots \dots (2.14)$$

F_{disp} = flujo del soluto por dispersión mecánica ($M L^{-2} T^{-1}$),
 D_{mec} = coeficiente de dispersión mecánica del medio poroso ($L^2 T^{-1}$).

La dispersión mecánica (D_{mec}) está linealmente relacionada con la velocidad del flujo de agua cuando la tasa de flujo de agua es alta. Se expresa así (Leij y van Genuchten, 1999):

$$D_{mec} = \lambda q \dots \dots (2.15)$$

λ = dispersividad (L),
 q = velocidad de Darcy del flujo de agua ($L T^{-1}$).
 $v = q / \theta_v$ = velocidad de poro ($L T^{-1}$).



A nivel macroscópico, la difusión molecular y la dispersión mecánica se adicionan en lo que se llama dispersión hidrodinámica (D):

$$D = D_{mol} + D_{mec} \dots (2.16)$$

En las descripciones de movimiento de solutos en el suelo frecuentemente se ignora la componente D_{mol} por su valor significativamente menor de D_{mec} (Leij y van Genuchten, 1999).

3) *Convección* (F_c). Este componente hace referencia al movimiento pasivo del soluto disuelto en el agua y se describe de la siguiente manera (Leij y van Genuchten, 1999):

$$F_c = qC \dots (2.17)$$

F_c = flujo convectivo ($M L^{-2} T^{-1}$),

$q = Q/A$ = velocidad de Darcy de flujo de agua ($L T^{-1}$) que coincide con la dirección de z hacia abajo. En caso contrario en la ecuación (2.17) debe escribirse $-qC$. Q = es el caudal de agua que ingresa al perfil o columna de suelo ($L^3 T^{-1}$), y A es el área de la sección transversal del perfil o de la columna de suelo (L^2).

C = concentración del compuesto en la solución del suelo ($M L^{-3}$).

Ecuación de transporte unidimensional para solutos no reactivos

Cuando el agua está en movimiento, los mecanismos que propician el movimiento del soluto se suman para obtener el flujo del soluto en el medio en el cual se mueven.

$$F_s = F_c + F_{dif} + F_{disp} \dots (2.18)$$

Sustituyendo (2.13), (2.14) y (2.17) en (2.18) se obtiene:

$$F_s = qC - D_{mol} \theta_v \frac{\partial C}{\partial z} - D_{mec} \theta_v \frac{\partial C}{\partial z} \dots (2.19)$$

Considerando lo presentado en (2.16), la ecuación (2.19) queda de la siguiente forma:

$$F_s = qC - D \theta_v \frac{\partial C}{\partial z} \dots (2.20)$$

F_s = flujo de soluto en el suelo ($M L^{-2} T^{-1}$)

Esta ecuación refleja el flujo del soluto en el suelo (Leij y van Genuchten, 1999).

Este modelo está descrito por una ecuación diferencial parcial unidimensional de dos parámetros. Esta ecuación se basa en tres supuestos:



- El flujo de agua ocurre en estado estacionario (régimen permanente).
- El contenido de agua en el suelo es constante.
- No hay interacción entre la fase sólida y el soluto, es decir, el soluto es inerte, no reactivo.

Balace de masa

Para completar la ecuación general del transporte convectivo-dispersivo, se precisa introducir y garantizar la continuidad o conservación de la masa en el flujo. Es preciso establecer que el cambio de la concentración del soluto en solución en el tiempo es igual al cambio del flujo del soluto con la distancia.

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} = -\frac{\partial F_s}{\partial z} \dots\dots (2.21)$$

$M_1 = \theta_v C$ = es la cantidad de soluto en un volumen de suelo ($M L^{-3}$).

El cambio de flujo es negativo en función del punto de referencia, en este caso se supone para un perfil del suelo que el flujo del soluto se está moviendo hacia abajo.

Entonces sustituyendo (2.20) en (2.21) se obtiene:

$$\frac{\partial \theta_v C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(qC - D\theta_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots\dots (2.22)$$

Ahora bajo el supuesto que θ , q y D son constantes en el medio, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\theta_v \frac{\partial C}{\partial t} = D\theta_v \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - q \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots (2.23)$$

Esta ecuación corresponde al caso de transporte convectivo-dispersivo unidimensional para solutos no reactivos en el suelo en el caso cuando la dirección del flujo de agua (q) coincide con la dirección del eje z .

Ecuación de transporte unidimensional para solutos reactivos

Se introduce aquí el proceso de adsorción del soluto con el suelo donde se mueve. En este caso la ecuación de continuidad (2.21) debe escribirse así (van Genuchten y Wierenga, 1976):

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} = -\frac{\partial F_s}{\partial z} \dots\dots (2.24)$$

$M_2 = \theta_v C + \rho_o C_1$ = es la cantidad de soluto en un volumen de suelo ($M L^{-3}$),
 C_1 = concentración de la sustancia adsorbida ($M M^{-1}$).



La ecuación (2.24) podemos reescribirla en forma similar a la ecuación (2.23):

$$\theta_v \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_a \frac{\partial C_1}{\partial t} = D \theta_v \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - q \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots (2.25)$$

ρ_a = densidad aparente del suelo ($M L^{-3}$).

Para dejar la concentración adsorbida en términos de la concentración en la solución se introduce la siguiente ecuación del proceso lineal de adsorción-desorción de equilibrio (Koskinen y Harper, 1990) a la ecuación (2.25):

$$C_1 = K_d C \dots\dots(2.26)$$

C = concentración de la sustancia en la solución ($M L^{-3}$),

C_1 = concentración de la sustancia adsorbida ($M M^{-1}$),

K_d = coeficiente de distribución (o de adsorción) en caso de relación lineal entre C_1 y C .

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_a}{\theta_v} \frac{\partial K_d C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{q}{\theta_v} \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots (2.27)$$

Como K_d es una constante, entonces se obtiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_a K_d}{\theta_v} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{q}{\theta_v} \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots (2.28)$$

Donde $\rho_a K_d / \theta_v$, D y q / θ_v son constantes.

El componente de degradación

La degradación de un soluto orgánico se describe normalmente con la ecuación general que describe la degradación de la materia orgánica. Dos parámetros importantes que se obtienen de este análisis es la tasa μ a la que se degrada el soluto y el tiempo necesario para que la concentración inicial se reduzca a la mitad, conocido como el tiempo de vida media, $T_{0.5}$. Esta ecuación frecuentemente se presenta en la forma siguiente (Rowell, 1994):

$$C_T = C_{inic} e^{-\mu t_{0.5}} \text{ o } C = C_{inic} e^{-0.693/t_{0.5}} \dots\dots (2.29)$$

C_{inic} = concentración inicial del soluto ($M L^{-3}$) en el tiempo ($t = 0$),

C_T = concentración del soluto en el tiempo $t > 0$,

$\mu = \ln 2 / t_{0.5} = 0.693 / t_{0.5}$ = coeficiente que expresa la velocidad de degradación del soluto (T^{-1}),

$t_{0.5}$ = tiempo de la degradación media del soluto (T).

Durante su movimiento en el suelo, una parte del soluto se encuentra en la solución y otra parte está adsorbida en la fase sólida, de modo que la degradación del soluto se da tanto en la fase líquida como en la fase sólida. La representación de la porción de las concentraciones respectivas que se ha degradado se expresa de la siguiente manera:



$$d_l = \theta \mu_l C \text{ y } d_s = \rho \mu_s C_1 \dots (2.30)$$

d = degradación del soluto ($M L^{-3} T^{-1}$),
 l y s hacen referencia a las fases líquida y sólida, respectivamente;
 C = concentración de la sustancia en la solución ($M L^{-3}$),
 C_1 = concentración de la sustancia adsorbida ($M M^{-1}$),

Introduciendo las consideraciones de las expresiones (2.29) y (2.30), la ecuación (2.28) se escribe así (Toride et al., 1999):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho K_d}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{q}{\theta} \frac{\partial C}{\partial z} - \theta \mu_l C - \rho \mu_s K_d C \dots (2.31)$$

Donde $\rho K_d / \theta$, D , q / θ , $\theta \mu_l$ y $\rho \mu_s$ son constantes.

El componente de producción o pérdida

Bajo ciertas condiciones y de acuerdo al tipo de solutos, es posible que las reacciones o transformaciones que ocurren en el suelo den lugar a producción del soluto. Por otra parte, hay otros procesos que involucran la pérdida del soluto del sistema como las precipitaciones, la absorción por las raíces de las plantas o por volatilización que se desprecia en el modelo. Del mismo modo que con la degradación, este componente se contabiliza para cambio de distancia en la fase líquida como en la fase sólida y se describen así (Toride et al., 1999):

$$G_l = \theta \gamma_l(z) \text{ y } G_s = \rho \gamma_s(z) \dots (2.32)$$

G_l y G_s = representan la ganancia o la pérdida del soluto en la fase líquida y en la fase sólida, respectivamente ($M L^{-3} T^{-1}$). Los valores G_l y G_s pueden depender de la distancia z .
 γ_l y γ_s son las intensidades específicas de la ganancia o la pérdida del soluto como función de la distancia Z en la fase líquida ($M L^{-3} T^{-1}$) y en la fase sólida (T^{-1}), respectivamente.

Finalmente, la ecuación completa que describe el proceso de transporte de un soluto reactivo en el suelo tiene la siguiente forma (Toride et al., 1999):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho K_d}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{q}{\theta} \frac{\partial C}{\partial z} - \theta \mu_l C - \rho \mu_s K_d C + \theta \gamma_l(z) + \rho \gamma_s(z) \dots (2.33)$$

Que es la ecuación de transporte convectivo-dispersivo para solutos reactivos con el medio. Bajos los supuestos establecidos al inicio, la ecuación anterior puede escribirse también como:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \mu C + \gamma(z) \dots (2.34)$$

$v = q / \theta$ = velocidad promedio del agua en los poros del suelo.

$R = 1 + [(\rho K_d) / \theta]$ = retardo

$\mu = \mu_l + \frac{\rho K_d \mu_s}{\theta}$

$\gamma(z) = \gamma_l(z) + \frac{\rho \gamma_s(z)}{\theta}$



Debe notarse que cuando los coeficientes de degradación en la fase líquida μ_l y en la fase sólida μ_s son idénticos:

$$\mu = \mu_l R \dots (2.35)$$

En algunos casos R es menor que 1, lo que ocurre cuando la sustancia química está sujeta a exclusión aniónica, es decir, por similitud de cargas electroquímicas negativas del soluto y de las partículas de adsorción del suelo, el soluto es sujeto a una adsorción negativa (exclusión o repulsión) por lo que se provoca su salida rápida del suelo. En este caso $(1 - R)$ puede verse como el volumen relativo de exclusión aniónica, y $(-K_d)$ puede verse como el volumen específico de exclusión aniónica expresado en volumen de agua por masa de suelo ($L^3 M^{-1}$) (Toride et al., 1999).

2.6. Experimento de transporte de solutos en el suelo

El estudio del movimiento de agua y solutos en el suelo es complejo debido a la heterogeneidad del suelo y a los constantes cambios físicos y químicos que se dan en el suelo. Una forma de facilitar el estudio del suelo es considerando que el suelo es un medio en equilibrio, homogéneo e isotrópico, lo cual rara vez ocurre en campo, sin embargo, con ello se puede obtener una idea sobre los procesos que ocurren en el medio ambiente. Uno de los experimentos más importantes para entender los procesos que se dan en el suelo durante el transporte de solutos, es el experimento de desplazamiento de solutos en monolitos y columnas de suelo, el cual consiste en aplicar un soluto en la columna de suelo y monitorear el comportamiento de la concentración del soluto a la salida de la columna, después de su paso por el suelo.

En los experimentos que se realizan para la evaluación del movimiento de agua y solutos es necesario tomar en cuenta la escala de estudio, el tipo de muestras que se emplean y el tiempo de duración del experimento; ya que estos parámetros determinarán la representatividad y reproducibilidad del experimento con lo que puede ocurrir en la naturaleza.

Escala del estudio: columnas de suelo

Los estudios a nivel de campo proporcionan información representativa sobre los procesos que ocurren en la naturaleza, no obstante los experimentos con columnas de suelo en laboratorio, bajo condiciones experimentales, sirven para tener una idea más clara y precisa sobre los procesos que se dan en la naturaleza; y otra de sus ventajas es que con este tipo de experimentos se pueden evaluar diversas situaciones (salinidad, pH, tiempo de riego, presencia de raíces, humedad del suelo, entre otros).



Tiempo experimental

El soluto en el suelo se ve envuelto en procesos que determinan su presencia en el ambiente, dichos procesos en ocasiones se dan de manera tan rápida que son considerados como instantáneos, mientras que aquellos que necesitan más tiempo se consideran como estacionarios. Por ello resulta de gran interés determinar la duración del experimento, ya que de ello dependerá la viabilidad de evaluar el proceso de interés, ver Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Ejemplo de reacciones que se presentan en el suelo, según el tiempo de monitoreo. Los procesos del centro son tomados como referencia para clasificar las velocidades de los procesos, los procesos de la izquierda se dan en un tiempo corto (instantáneos) comparados con los del centro, y los de la derecha son aquellos ocurren en un periodo largo tiempo (estacionarios) (Álvarez y Muñoz, 2005).

Instantáneo		Proceso de referencia			Estacionario	
Intercambio iónico			Difusión		Mineralización	
10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	1	10^2	10^4	10^6
			min			
Sorción			Transporte		Expansión de suelo	
10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	(cambio en la estructura)	
			hr		10^2	10^3
Fotosíntesis			Transpiración		Cubierta vegetal seca	
10^{-10}	(.....)		1	10	10^3	
			hr			

Tipo de muestra

Los experimentos se pueden realizar en suelo perturbado y sin perturbar, esto dependerá del estudio que se realice. En caso de estar interesados en evaluar el efecto de la estructura del suelo en el transporte de solutos, será necesario usar columnas de suelo intactas, ya que en muestras perturbadas las propiedades del suelo cambian, se destruye la estructura del suelo. El uso de columnas alteradas de suelo (empacadas) es útil al evaluar el efecto de la matriz de suelo en el paso de solutos a través de este.

2.7. Uso de trazadores en caracterización del movimiento del agua

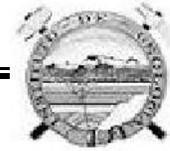
El estudio del transporte de solutos en el suelo, requiere en un primer tiempo, de una caracterización del movimiento del agua en el suelo estudiado, a partir del cual sea posible evaluar el movimiento de un soluto reactivo y los procesos involucrados. La caracterización del movimiento del agua se hace a partir del uso de trazadores o solutos inertes. Un trazador es un compuesto soluble en agua, que permanece invariable en su composición química, no



presenta reacción química alguna con el medio con el cual interactúan (intercambio iónico y absorción), y que no se encuentra de manera natural en el suelo y/o agua. Los principales trazadores empleados son:

- ▲ Las fluoresceínas. Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente, son de naturaleza orgánica. Son fáciles de detectar por métodos colorimétricos. Entre las más empleadas se encuentran: Uranina, Rhodamina FB, Eosina y Amidorhodamina. Sin embargo, este tipo de sustancias pueden ser retenidos en suelos con alto contenido de materia orgánica.
- ▲ Aniones. Normalmente se emplean el Cl^- y el Br^- , ya que estos aniones modifican la conductividad eléctrica del agua, la aumentan, haciendo fácil su detección a la salida de la columna. Una de sus desventajas es que en suelos con alto contenido de arcillas se puede favorecer una exclusión, ya que las arcillas cuentan con una carga electroquímica negativa en la superficie, por lo cual se favorecerá una salida prematura del anión. En el caso de los suelos con carga variable al pH del medio, es posible que se adsorba el trazador, provocando un retardo a su salida.
- ▲ Isótopos. Son átomos de un mismo elemento que tiene el mismo número de electrones y protones, pero distinta masa atómica. En el estudio del agua se utilizan isótopos de elementos presentes en la molécula del agua (hidrógeno y oxígeno). Para el Hidrógeno se emplea tritio o deuterio, los cuales son radioactivos, estos no son estables y se transforman en otros elementos, los cuales pueden o no ser estables; el manejo es muy complicado y nocivo para el medio ambiente, y con alto costo. En el caso del oxígeno normalmente se emplea el Oxígeno 18 el cual es un isótopo estable, es decir, permanece inalterado y persiste por un largo tiempo, durante el cual no emite radiaciones.

El concepto de trazadores inertes implica que el soluto atravesará el suelo sin que exista alguna reacción entre la superficie de las partículas y el soluto inerte, es decir, su viaje a través del suelo será similar al de una molécula de agua. El trazador por excelencia es la propia molécula del agua marcada con un isótopo. Comúnmente se emplean isótopos radioactivos (^3H , ^{51}Cr , ^{60}Co , ^{82}Br y ^{131}I) y estables (^2H , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O y ^{75}S); los primeros al ser radioactivos representan un riesgo a la salud y requieren de un manejo e instalaciones especiales, por lo que su uso ya no es tan frecuente; siendo una alternativa emplear isótopos estables, sin embargo, el costo de los análisis de laboratorio para su cuantificación llega a ser excesivo. El uso de aniones es una alternativa real si consideramos que en la mayoría de los suelos la capacidad de intercambio aniónico es baja, existen técnicas de cuantificación de aniones con alta precisión aunado a los bajos costos tanto de los análisis de laboratorio como del reactivo a utilizarse. Sin embargo, en suelos con alto contenido de arcillas (>30%), pueden ocurrir procesos reactivos como el intercambio iónico que le quitan el carácter inerte al trazador.



2.8. Estudio del transporte de solutos en columnas de suelo

El estudio de la transferencia de solutos, como se mencionó anteriormente, en el campo presenta problemas de imprecisión debido a la heterogeneidad del sistema. El uso de sistemas cerrados, como las columnas de suelo intacto y lisímetros, permite estudiar el transporte de un soluto en condiciones controladas, lo que hace posible el dominio del flujo unidireccional. Los lisímetros son ampliamente utilizados debido a que conservan la estructura natural del suelo, además, a esta escala las condiciones del entorno se pueden controlar. Las columnas de suelo intactas son una versión más pequeña de los lisímetros, sin embargo, la representación del sistema real se puede perder por la compresión o la modificación de la estructura del suelo durante la extracción de la columna. Los beneficios de las columnas de suelo intacta ante los lisímetros, es su fácil manejo y el tiempo experimental.

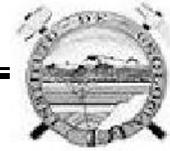
Por otro lado, el análisis de la capacidad de adsorción utilizando columnas de suelo ofrece varias ventajas sobre los estudios batch (Jackson et al., 1984). En el análisis de las columnas, el suelo está en contacto con el soluto de una manera más cercana a lo que sucede en la realidad, lo que permite ver el efecto de la estructura del suelo sobre el movimiento de solutos.

La descripción del proceso de adsorción entre la fase líquida y la matriz el suelo es esencial para comprender el movimiento de los contaminantes. Los experimentos en columnas de suelo permiten estudiar el movimiento del agua y los solutos, y la interacción entre éstos, así como las reacciones entre la fase líquida y la matriz del suelo durante el transporte. Esta técnica permite reproducir las condiciones presentes en el campo; tal como, la relación suelo: solución, la inmovilidad de la fase sólida y el tiempo de contacto entre el suelo y la solución.

La señal de entrada corresponde a la inyección del soluto estudiado en una concentración conocida por un tiempo determinado. La concentración del soluto es monitoreada a la salida de la columna. Con los datos obtenidos, se construye una curva de la concentración del soluto estudiado a través del tiempo, llamada curva de salida o curva de elución.

2.9. Curvas de elución

Una curva de elución es una gráfica en la cual se observa la variación de la concentración del soluto presente en el lixiviado a través del tiempo, cuando se inyecta un soluto en el suelo. Con la gráfica de la curva de elución se pueden identificar los procesos involucrados en la transferencia de un soluto a través del suelo, así como la estimación de los parámetros que dan lugar a estos procesos.



La forma de las curvas de elución del trazador y del soluto refleja los procesos físicos y químicos que afectan el movimiento del agua y del soluto en su paso a través de la columna de suelo. En la Fig. 2.4 se presenta las formas posibles de las curvas de elución para un soluto no reactivo, que es aplicado a una columna de suelo, en un experimento en régimen permanente de flujo de agua.

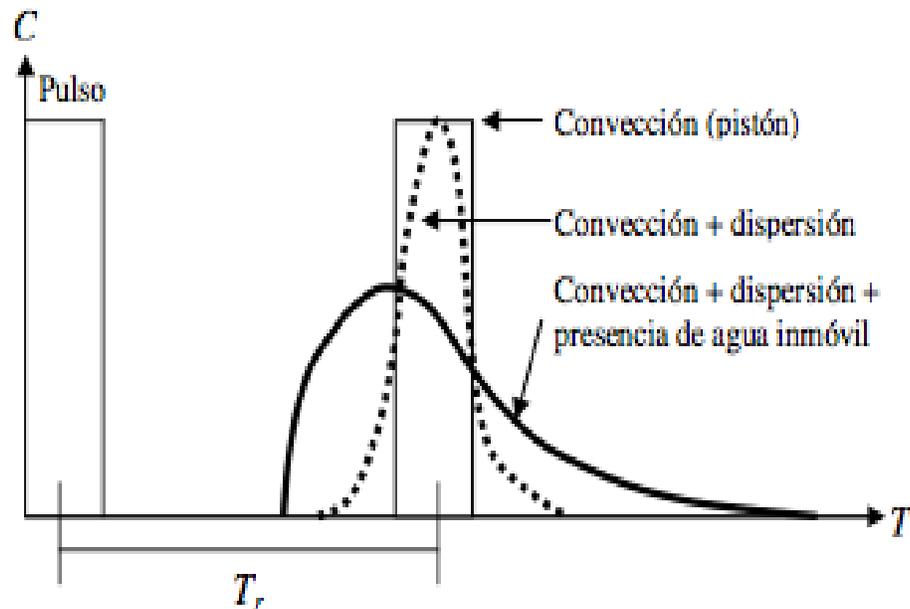
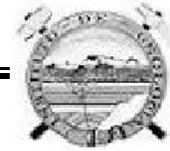


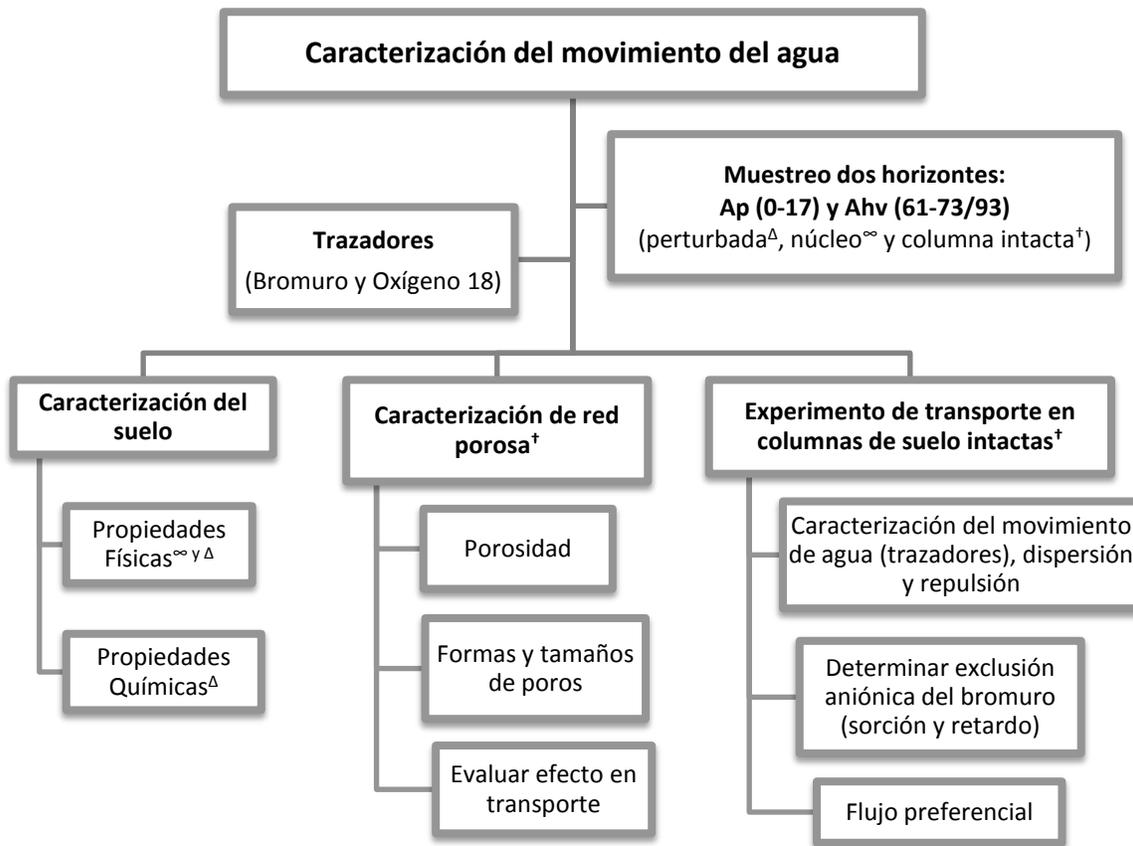
Fig.2.4 Curvas de elución de un trazador inerte para tres tipos de procesos que intervienen en el transporte. Aquí el balance de masa es igual a 1 (es decir que la masa lixiviada del suelo es igual a la masa aplicada al suelo) y el tiempo de residencia del trazador (T_r) es idéntico en los tres casos.

Observando el caso del trazador, si el movimiento fuera solamente por convección se observaría un efecto de pistón, es decir, el pulso aplicado a la entrada de la columna sería de forma igual a la salida, solamente desplazado por un tiempo T_r (tiempo de residencia). El efecto de dispersión hace que la salida del trazador tome la forma de una curva simétrica en torno a T_r . Si en la columna de suelo existen zonas de agua inmóvil o flujos preferenciales, la curva de salida del trazador se achatará y será asimétrica en torno a T_r . El contenido de agua en la fase móvil influye sobre el tiempo de salida de la curva, el coeficiente difusión-dispersión de la fase móvil influye sobre la cuesta del frente de adsorción, mientras que el coeficiente de intercambio entre las fracciones de agua móvil e inmóvil influye sobre el coleo a la derecha de la curva (Pallud, 2000, citado en Prado, 2006).



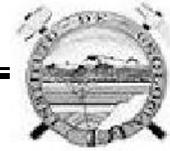
3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para que al lector se le facilite comprender lo realizado en el presente trabajo, se presenta la Gráfica 3.1 en la que cual se esquematiza la metodología empleada para lograr la caracterización del movimiento del agua en el suelo estudiado. Siendo el objetivo caracterizar y observar las diferencias en el movimiento del agua en los horizontes evaluados, y evidenciar la variación espacial de las propiedades en el suelo y su efecto en el transporte de solutos.



Gráfica 3.1 Representación esquemática de la metodología empleada durante el proyecto realizado.

En primera instancia se seleccionaron dos horizontes, el primer horizonte (Ap/0-17) corresponde a la zona afectada directamente por el laborero agrícola, mientras que el segundo (Ahv/61-73/93) representa un horizonte sin efectos directos de la labranza que se da en el sitio. Posteriormente se realizó un muestreo, durante el cual se tomaron muestras perturbadas, núcleos de suelo y columnas intactas del suelo; en ambos horizontes. Con dichas muestras se realizó una caracterización física y química del suelo, una caracterización de la red porosa y experimentos de transporte de solutos en el suelo, en los cuales se empleó el Bromuro y el oxígeno 18 como soluto de interés, logrando así caracterizar el movimiento del agua en el suelo. En los siguientes apartados se describe con mayor detalle la metodología empleada.



3.1. El sitio de estudio

El Valle del Mezquital se encuentra en la meseta central del altiplano mexicano, con una superficie aproximada de 2 429 km², a una altitud que varía entre 1 700 y 2 100 metros sobre el nivel del mar. Su clima es templado, seco, semiárido, con lluvias durante el verano y una precipitación de 700 mm (BGS et al., 1998).

En el Valle del Mezquital se pueden encontrar tres tipos de suelos: leptosol, feozem, y vertisol (Friedel et al., 2000). El uso del suelo principalmente es agrícola (CONAGUA, 2007).

En el sitio, se emplea agua residual sin tratamiento previo proveniente de la ciudad de México y su zona conurbada para regar los campos agrícolas, desde finales del siglo pasado (Jiménez y Landa, 1998). En los campos agrícolas del valle se aplica un flujo aproximado de 45 m³/s de agua residual en una superficie de 99 536 hectáreas (CONAGUA, 2007), logrando con ello una alta producción agrícola y un incremento en la recarga del acuífero subyacente.



Fig.3.1 Localización del área de estudio (Modificado de apuntes curso de campo de monitoreo ambiental, mayo, 2009)



La parcela de la cual se extrajeron las muestras para esta investigación ha sido regada con agua residual por más de 80 años, y se localiza en el Rancho Las Palmas (Fig.3.1), en el poblado de Tlahuelilpan, estado de Hidalgo. Sus coordenadas geográficas son: 20° 7' 29.16" latitud norte y 99° 12' 48.54" longitud oeste. La parcela tiene dimensiones de 180 x 135 metros, se trata de una parcela tecnificada, debido a que se labra la tierra, se siembra y se cosecha mediante maquinaria especializada. En este sitio se cultiva en rotación alfalfa, pasto forrajero y maíz. El riego se realiza por inundación de la parcela en un período que puede durar de 4 a 6 horas con una lámina de aproximadamente 20 cm.

A continuación se presenta la descripción de un perfil del suelo en la parcela, realizada durante el Curso de Monitoreo Ambiental, 2010. El perfil contaba con una profundidad de 93 cm, está bien drenado de color oscuro (10 YR 2/1) en superficie, cambiando a grisáceo (10 YR 3/1) a mayor profundidad. Uniforme en apariencia, especialmente si está húmedo, no pedregoso. Desarrollo de estructura moderada con agregados en bloques subangulares a angulares, de tamaño fino a medio (5-20 mm). Todo el perfil es friable, poroso y permeable. El examen cuidadoso permite reconocer en los horizontes incipientes slickensides, indicando propiedades vérticas (Fig.3.2). La distribución de raíces es normal con mayor densidad en los primeros 60 cm. Durante la descripción del perfil se identificaron dos horizontes Ap (0-17) y Ahv (61-73/93), los cuales corresponden a las profundidades estudiadas.



Fig.3.2 Superficie del suelo estudiado con cultivo (maíz), se observan grietas en el suelo.

3.2. Muestreo de suelo

La caracterización del suelo y los experimentos realizados durante el trabajo experimental de la tesis, requirieron de la colecta de tres tipos de muestras: muestras de suelo perturbadas, núcleos de suelo y columnas intactas de suelo. Como se ha venido mencionando se seleccionaron dos horizontes, Ap (0-17) y Ahv (61-73/93), los fueron muestreados. En ambos horizontes se tomaron los tres tipos de muestra, el modo de colecta se describe a continuación.

Muestra de suelo perturbada

Se colectaron muestras de suelo para determinar diversos parámetros físicos y químicos del suelo donde no sea necesario preservar la estructura y porosidad, tales como:



densidad real, contenido de humedad, textura, contenido de carbono y nitrógeno, y superficie específica.

El muestreo se realizó en un sitio donde no se observaron marcas del paso de los tractores. Con ayuda de pico y pala se excavó a la profundidad de estudio, con la pala se tomó aproximadamente 2 Kg de suelo para realizar los análisis, y se vertió en una bolsa de plástico. La bolsa se etiquetó con la profundidad, día y sitio donde se realizó el muestreo. Las muestras fueron transportadas y almacenadas en un cuarto frío a una temperatura de 4°C, en donde permanecieron hasta su análisis

Núcleos de suelo

Los núcleos de suelo se emplearon para determinar parámetros en donde era necesario preservar la estructura, tales como: densidad aparente, curva de retención de humedad y porosidad.

Las muestras se obtuvieron de un sitio donde se observó que existía poca perturbación, fue una zona con pocas raíces gruesas y que presentaba poca pedregosidad. Con ayuda de pico y pala se excavó a la profundidad de estudio con el muestreador y núcleo (Fig.3.3) se tomó la muestra cuidando de preservar la estructura. Los núcleos ya cuentan con un número de identificación, en el cuaderno de control se anotó la profundidad, día y sitio de donde fue tomado el núcleo, y se indicó el análisis que se realizará con la muestra. Las muestras fueron transportadas al laboratorio y almacenadas en un cuarto frío a 4°C, hasta su análisis.



Fig.3.3 Imagen de la forma en que se empleó el muestreador en campo

Para el muestreo se utilizaron dos tipos de núcleos de los cuales se tomaron 12 muestras para cada uno en cada horizonte, aunque el muestreo se realizó con la misma metodología:

- Núcleos de 5 cm de diámetro y 5.5 cm de altura, para determinar la densidad aparente del suelo.
- Núcleos de 5 cm de diámetro y 3 cm de altura, para determinar la curva de retención de humedad del suelo.

Columnas intactas

A partir de estas columnas se evaluó la porosidad y el transporte de solutos en el suelo, por ello era indispensable preservar la estructura.

Para el muestreo se seleccionó un sitio con poca o nula perturbación, fue una zona con pocas raíces gruesas y poca pedregosidad. Se excavó una zanja utilizando pico y pala, hasta la profundidad deseada. Una vez ubicado en la profundidad de estudio se hizo el modelado del monolito, para lo cual primero se definió un cubo que cumple con las dimensiones del cilindro a utilizar, en ocasiones fue necesario humedecer el suelo para lograrlo. A partir del cubo se empezó a definir una columna con dimensiones tales que permitiera el paso del cilindro contenedor. Cuando la columna de suelo contó con las dimensiones deseadas (diámetro y altura del cilindro contenedor) se procedió a colocar el cilindro en la columna de suelo. Se tuvo mucho cuidado para preservar la estructura y porosidad, es decir, no se empleó presión sobre el suelo al colocar el cilindro, para así evitar que se compactara. Una vez que fue colocado el cilindro contenedor en la columna de suelo, se cortó la columna de la base donde fue moldeado, se indicó la orientación y se etiquetó debidamente. Las columnas fueron almacenadas a 4°C, hasta su uso (Fig.3.4).

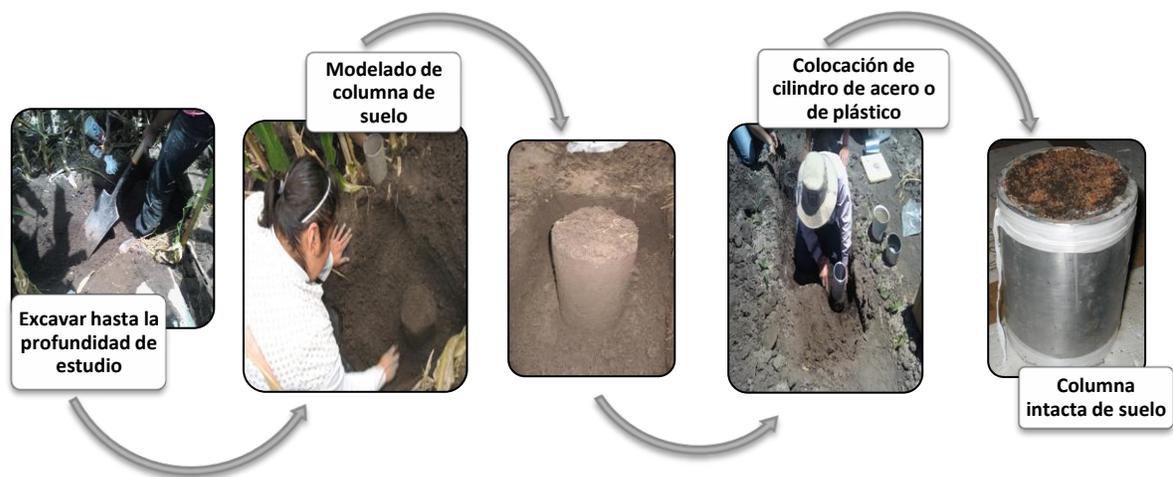


Fig. 3.4 Procedimiento de muestreo de columnas intactas.

Se colectaron columnas para los dos horizontes de estudio por duplicado, superficial (Ap) y sub-superficial (Ahv), y se utilizaron dos diferentes tipos de cilindros contenedores de la columna de suelo:

- Columnas intactas de suelo para evaluar el transporte de solutos, se emplearon cilindros de acero inoxidable de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura.



- Columnas intactas de suelo para la obtención de láminas delgadas, con las cuales se caracteriza la red porosa del suelo. Se emplean cilindros de plástico de 5 cm de diámetro y 8 cm de altura.

3.3. Caracterización del suelo

Se caracterizaron muestras de dos horizontes: superficial (Ap) y sub-superficial (Ahv). Al suelo se le determinaron diversas propiedades físicas y químicas que definen el movimiento de solutos a través del suelo. El primer horizonte corresponde a la zona afectada por el laborero agrícola, mientras que el segundo representa un horizonte sin efectos directos por la labranza. El objetivo fue caracterizar y observar las diferencias en el movimiento del agua en las profundidades antes mencionadas, y evidenciar la variación espacial de las propiedades en el suelo y su efecto en el transporte de solutos.

Densidad real: el método de picnómetro fue utilizado para determinar esta propiedad, realizando la determinación por duplicado.

Densidad aparente: se determinó por gravimetría usando dos núcleos de suelo de 5 cm de diámetro y 5.5 cm de altura, para cada horizonte.

Textura: fue determinada con el método de pipeta de Robinson. Se empleó una muestra perturbada de 20g, la cual fue secada a temperatura ambiente y tamizada a 2 mm. Para lograr cuantificar las fracciones del suelo (limo, arcilla y arena) fue necesario realizar una dispersión de las partículas del suelo, para lo cual se removieron carbonatos, sales, materia orgánica y óxidos de hierro.

Curva de retención de humedad: se obtuvo con el método de la olla de presión. Se emplearon los núcleos de 5 cm de diámetro y 3 cm de altura. La determinación se hizo por duplicado. Los núcleos se colocaron en un plato poroso y fueron saturados con una solución de CaSO_4 0.005M (sulfato de calcio), una vez saturados, con todo y plato poroso fueron colocados en una olla de presión. Con la olla de presión se aplicó la presión deseada para desalojar el agua presente en los poros, presentadas en la Tabla 3.1. El plato poroso con los núcleos se dejó en la olla de presión hasta que el agua fue desalojada por completo del suelo, lo cual se determinó, observando que en el tubo de salida de agua de la olla de presión no existiera líquido alguno. A continuación, se pesaron los núcleos inmediatamente para evitar que se hidrataran, se determinó el peso de la masa seca. Con estos datos se determinó la humedad presente en el suelo con la presión aplicada. Con la humedad del suelo observada a cada una de las presiones aplicadas se construye la curva de retención de humedad.



Tabla 3.1 Presiones empleadas para desalojar el agua presente en la red porosa del suelo, y así obtener la curva de retención de humedad. Se presentan las presiones en atmosferas (atm) y su equivalente en pF, que representan los valores de los logaritmos decimales de las fuerzas de succión medidas en g/cm².

Presión (atm)	0.1	0.33	1	2	4	8	15
Presión (pF)	2.0	2.5	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2

La porosidad: se obtuvo con la fórmula para determinar la porosidad, presentada en el capítulo 2, donde se emplea la densidad aparente y la densidad real (ecuación 2.3).

Carbono y nitrógeno total del suelo: se obtuvieron a partir de muestras secas y pulverizadas con mortero en donde se midieron en un analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 Series II, la determinación se realizó por duplicado.

Superficie específica: se midió en muestras de suelo secas y pulverizadas con mortero, mediante el método BET, empleando nitrógeno en un Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System.

El pH y la conductividad eléctrica (CE): se obtuvieron a partir de un extracto de saturación suelo - CaCl₂ 0.01M en una relación 1:2. Se empleó un medidor multiparámetro sensION156 con sondas de conductividad de 4 polos (CE) y un electrodo de platino (pH).

Cationes intercambiables: para determinar cationes intercambiables se empleó una muestra de suelo tamizada a 2 mm y secada a temperatura ambiente. La extracción de cationes se realizó con acetato de amonio (CH₃COONH₄) 1N y neutro. El extracto se analizó por espectrometría de absorción atómica (Ca y Mg) y por espectrometría de emisión (Na y K).

3.4. Caracterización de la red porosa del suelo

Para explicar el movimiento del agua a escala macroscópica (de columna de suelo), en el trabajo de tesis se consideró el análisis de algunas características del suelo a la escala de poro (escala microscópica). Para ello se aplicó el análisis de imágenes de secciones delgadas para caracterizar la porosidad del suelo; específicamente se determinaron los parámetros de porosidad, la conexión entre los poros, la tortuosidad, la forma y el tamaño de poro.

Elaboración y digitalización de láminas delgadas

Las secciones delgadas se obtuvieron a partir de las columnas intactas de suelo de 5 cm de diámetro y 8 cm de altura. La metodología empleada para la elaboración de secciones delgadas se muestra en la Fig.3.5. La columna de suelo se saturó con acetona para remplazar el agua presente en el suelo, para lo cual, la columna intacta de suelo se colocó en un



recipiente que contenía acetona y se dejó reposar hasta que se observó que la muestra estuviera saturada. Una vez que se saturó la columna de suelo con acetona, ésta fue colocada en un recipiente de 500 mL, en donde se le aplicó una resina tipo poliéster hasta cubrir totalmente la columna de suelo. Posteriormente, el recipiente con la columna de suelo fue colocado en una cámara de vacío por aproximadamente dos horas, para lograr que la resina reemplazara todo el líquido y gas presente en los poros del suelo, permitiendo así preservar la red porosa. La columna se dejó en reposo a temperatura ambiente, hasta que la resina se endureció. Una vez con la resina endurecida, se utilizó una cortadora con filo de diamante para definir un bloque, en el cual se marca la orientación (guía de ensamble) y se pulen todas sus caras, para lo cual, se emplearon lijas de carburo de silicio con tamaños de granos de: 102, 63, 50, 23, 17 y 9 μm . Posteriormente, se seleccionó la cara por analizar (horizontalmente ó verticalmente), en dicha cara se aplicó una capa de resina sobre la cual se colocó un portaobjetos, se esperó a que la resina se endureciera y posteriormente se hizo un corte empleando un dispositivo de secciones delgadas (PetroThin), con el que se obtuvo una sección delgada del suelo de aproximadamente 2 mm de espesor. Esta sección se pulió manualmente con granos finos de carburo de silicio de tamaño: 17, 9 y 5 μm ; finalmente se pulió con granos de 1 μm de óxido de aluminio en polvo hasta que se obtuvo la lámina delgada de suelo, la cual cuenta con un espesor aproximado de 55 μm . Los cortes de las muestras impregnadas de resina se realizaron de manera vertical. La elaboración de secciones delgadas se realizó en el taller de laminación del Instituto de Geología.

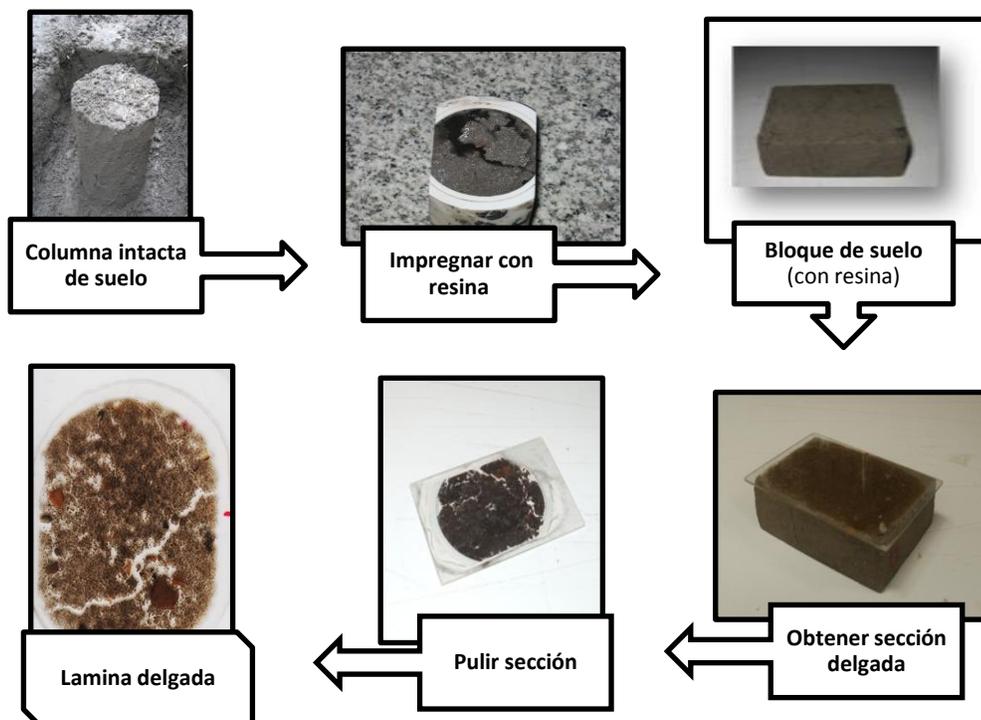
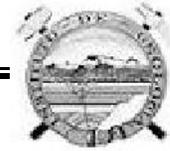


Fig.3.5 Proceso para la elaboración de láminas delgadas.



Las láminas delgadas fueron digitalizadas con un escáner óptico (CanoScan LiDE 200), al momento de tomar la imagen se colocó una regla para tener una escala de referencia, se utilizó una resolución de 600 ppp (píxeles por pulgada), en ocasiones fue necesario ajustar el brillo y nitidez para una obtener una mejor imagen de la lámina delgada, y poder procesarla con el algoritmo empleado (Image Pro[®]5.2 y “segmentación del color” (Barton y Delmas, 2002).

Procesamiento de la imagen digital de las láminas delgadas de suelo

El procesamiento de las imágenes obtenidas del escaneo fue hecho con el software Image Pro[®]5.2. La imagen fue calibrada con la escala que se colocó al momento del escaneo en mm, después se seleccionó el área de análisis. A continuación se realizó la segmentación de la imagen, la cual consiste en seleccionar la fracción porosa para que el software pueda hacer la distinción entre ésta y la matriz del suelo (Fig.3.6). Es a partir de esta distinción que se obtienen los parámetros: área de análisis, cantidad de poros, área y perímetro de cada poro. Los parámetros antes mencionados son calculados automáticamente por el software Image Pro[®]5.2, estos datos fueron almacenados en un documento Excel.

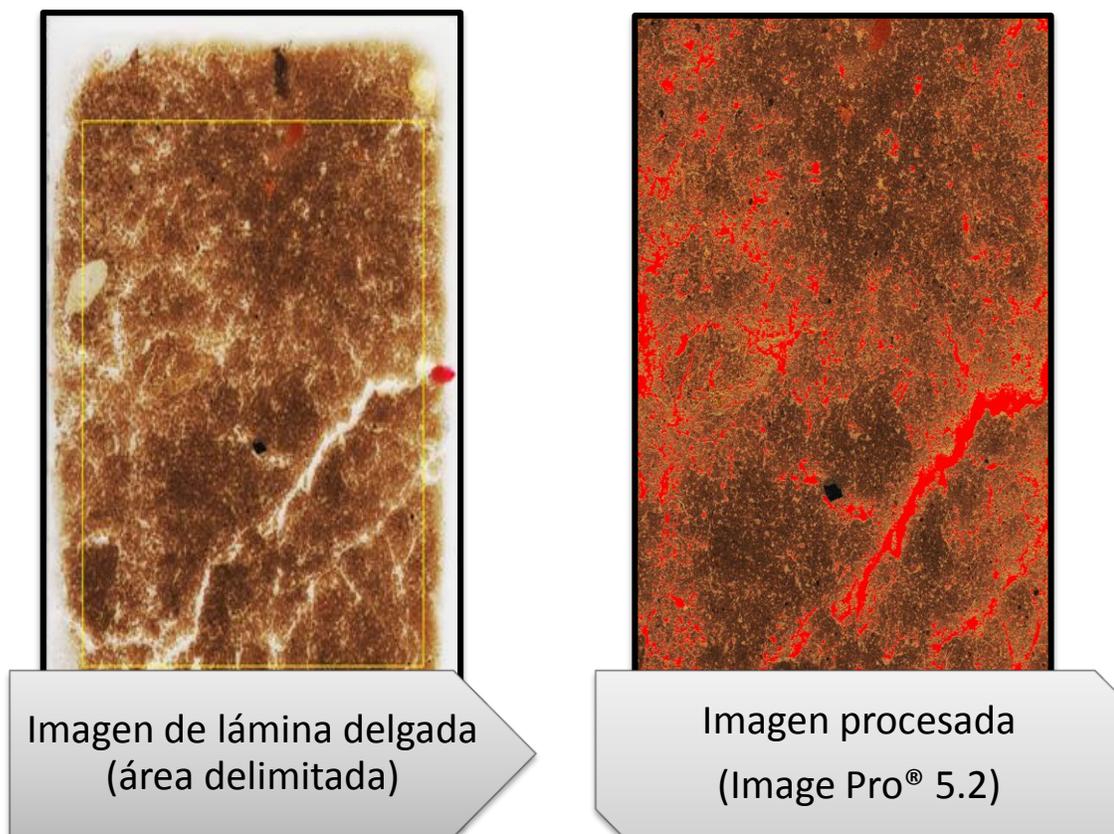
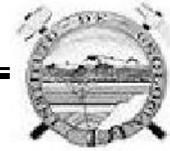


Fig.3.6 Sección delgada procesada en Image Pro[®] 5.2, se observa de color rojo los poros y en color café el suelo



Caracterización de la red porosa: determinación de los diferentes parámetros

Con las imágenes ya procesadas y la información del área y perímetro de cada poro, se determinaron los parámetros de cada imagen analizada.

- *Porosidad total de la lámina delgada.* Esta porosidad corresponde al área total ocupada por los poros, referida a la superficie total de la imagen. La porosidad está en función de la escala de análisis, en el trabajo de tesis se utilizó mm^2 y $\text{píxeles}/\text{cm}^2$.

- *Forma de poro.* La forma de cada poro fue estimada mediante el índice longitudinal (I_a , Coster y Chermant, 1985), estimado a partir del área (A) y perímetro (P) de cada poro sobre la imagen, a partir de la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{P^2}{4\pi A} \dots\dots (3.1)$$

Este índice toma el valor mínimo de uno para un poro perfectamente redondo, y es más grande a medida que el poro está alargado. Para determinar la forma de poro se tomó en cuenta la siguiente clasificación propuesta por Ringrose-Voase (1996).

Poros tubulares, $I_a < 5$

Poros fisura, $5 < I_a < 10$

Poros de empaquetamiento, $I_a > 10$

- *Tamaño de poro.* El tamaño de cada poro es estimado por el área de su sección sobre la imagen (en píxeles, referida en mm^2). Los poros fueron clasificados en cuatro clases de tamaño (según Prado et al., 2009).

Clase 1, área $> 1 \text{ mm}^2$

Clase 2, $0.09 \text{ mm}^2 < \text{área} < 1 \text{ mm}^2$

Clase 3, $0.01 \text{ mm}^2 < \text{área} < 0.09 \text{ mm}^2$

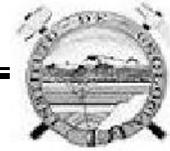
Clase 4, área $< 0.01 \text{ mm}^2$

3.5. Experimento de transporte de solutos en columnas de suelo intactas

El experimento fue realizado en un cuarto a temperatura constante, con luz artificial, utilizando columnas intactas de suelo. Se empleó un simulador de lluvia de teflón (Fig.3.7), el cual cuenta con unas agujas que nos permiten aplicar la solución en la parte superior de la columna (simulador de lluvia) y captar el lixiviado en la parte inferior de la columna de suelo.



Fig.3.7 Simulador de lluvia de teflón, empleado durante el experimento.



Columnas de suelo

Se emplearon columnas de suelo intactas colectadas en cilindros de acero inoxidable, las cuales tienen 10 cm de diámetro y 15 de altura, con la metodología antes descrita en el muestreo de suelo.

Solutos y compuestos a emplear

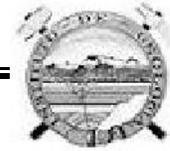
- CaCl_2 .- Se utilizó una solución de CaCl_2 0.01 M, la cual se empleó para poner la columna en régimen permanente y estabilizar el pH y fuerza iónica en el suelo.
- H_2^{18}O .- Se utilizó agua marcada con el isótopo estable de oxígeno (O^{18}). Este trazador se seleccionó para caracterizar el movimiento del agua a través de la columna.
- Bromuro (Br^-).- El anión es aplicado en la columna de suelo en una solución de KBr 0.1 M ésta concentración permitió cuantificar al anión con un electrodo específico (Orion ionplus Sure-Flow). Y así poder caracterizar el movimiento del anión en los suelos evaluados y poder emplearlo como trazador para estos suelos en futuros estudios.

Preparación de la columna y dispositivo experimental

Previo al experimento, la columna se sacó del cuarto frío y se puso a temperatura ambiente por un día. Transcurrido ese tiempo, se pesó la columna de suelo y se tomó una muestra pequeña de suelo a la cual se le determinó humedad. En la base del simulador de lluvia, se colocó una reja de acero inoxidable, sobre la cual se colocó un filtro de nitrocelulosa de 0.45 micras y arena químicamente pura. Tal arreglo sirvió para evitar la pérdida de suelo en la base de la columna, definir el tamaño de coloides en suspensión y asegurar un buen contacto entre la base del simulador y el suelo en la base de la columna, respectivamente. La base del simulador se colocó en un tripié y sobre la base se colocó la columna de suelo, verificando que la columna se encontrara nivelada.

En la parte superior de la columna se ensambla el reservorio del simulador, el cual fue previamente llenado con la solución aplicada sobre la columna de suelo. La solución que se aplicó en la columna se puso en el recipiente de 1 L, el cual se colocó sobre la balanza para registrar el peso de solución que se aplicó. Se utilizó un tubo capilar de teflón conectado a una bomba peristáltica, el cual en un extremo se introdujo al recipiente contenedor de la solución a aplicar y en el otro extremo en la parte superior del simulador de lluvia, lo que permitió el bombeo de la solución al reservorio del simulador de lluvia.

El lixiviado en la base de la columna fue bombeado por un capilar que estaba conectado a la bomba peristáltica, a las celdas de conductividad eléctrica (CE) y a un



electrodo pH, en donde se midió temperatura, CE y pH, estos datos fueron almacenados en un data logger.

Por último todo el lixiviado fue enviado a un colector de fracciones en donde el flujo de salida de la columna se discretizó según el volumen de interés. Estas muestras se almacenaron en el cuarto frío (4°C) hasta su análisis, donde se evaluó la concentración de los solutos para así construir las curvas de elución (concentración del soluto vs tiempo) para cada profundidad. En la Fig. 3.8 se presenta el dispositivo experimental.

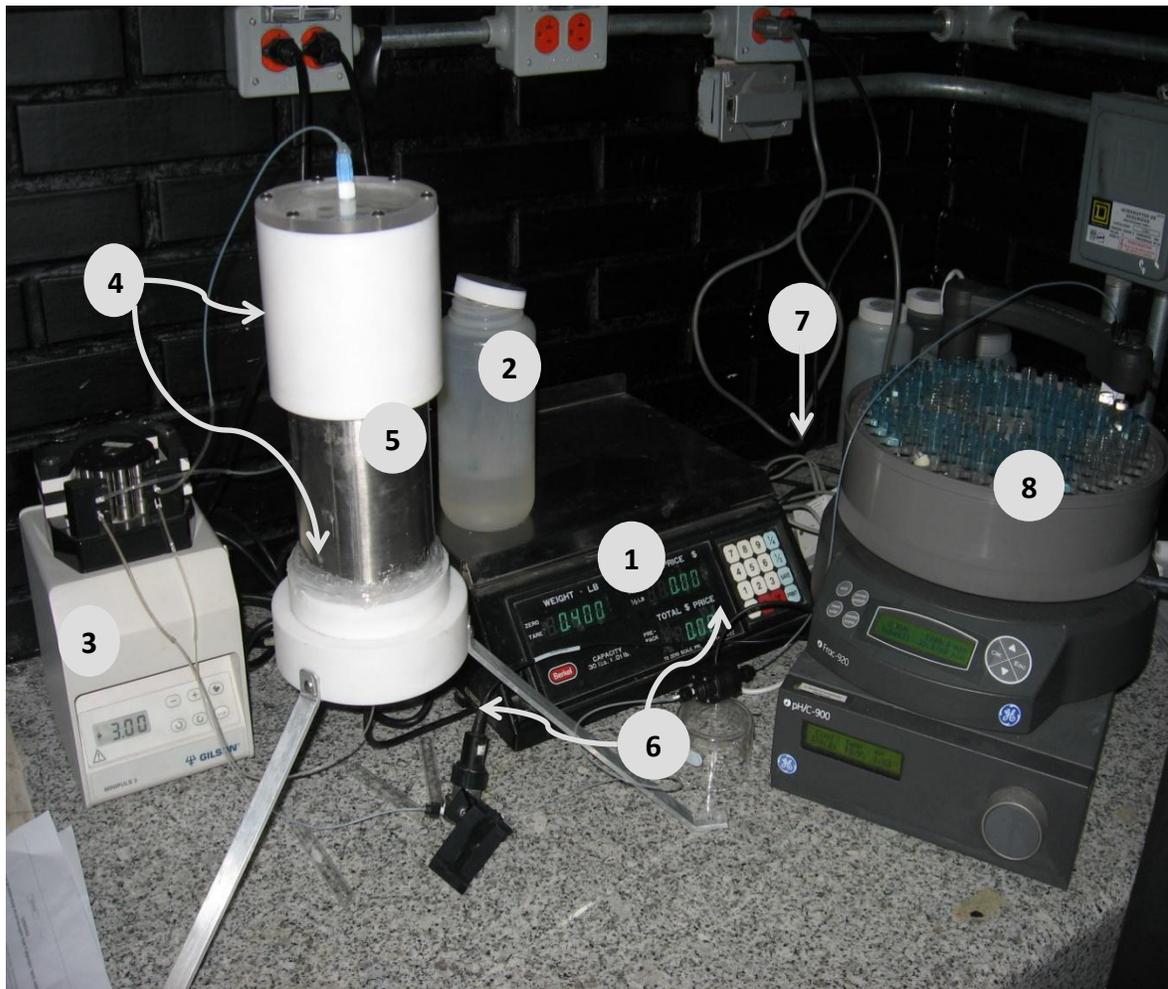


Fig. 3.8 Dispositivo experimental: 1) balanza, para verificar el flujo aplicado; 2) recipiente contenedor de solución aplicada, según los solutos aplicados se utilizó un recipiente de plástico ó de vidrio; 3) bomba peristáltica, con ella se mantiene el flujo a través de la columna de suelo; 4) simulador de lluvia (teflón), consiste en un reservorio de 250 mL aproximadamente y una base; 5) columna intacta de suelo en cilindro de acero, 6) electrodo de pH y CE, se utilizaron para monitorear el pH, conductividad eléctrica y temperatura en línea al flujo de salida del simulador; 7) data logger, almacena los parámetros leídos con las celdas de pH y CE y 8) colector de fracciones, se empleó para discretizar el lixiviado de la columna de suelo, el cual fue almacenado en tubos de ensayo.



Parámetros a monitorear

Al inicio del experimento la columna fue pesada, esto se debe de repetir antes de aplicar el pulso y al final del experimento. De igual manera se llevó un control sobre el volumen de solución aplicado en la columna, anotando la variación de peso del recipiente en donde se encontraba la solución.

El régimen permanente se alcanzó cuando la conductividad eléctrica (CE) del lixiviado, el peso de la columna, el pH y el flujo a la entrada y salida de la columna, fueron constantes.

Descripción del experimento

Los parámetros experimentales se muestran en la Tabla 3.2. El flujo aplicado en las columnas fue inferior a la conductividad hidráulica saturada de suelo ($K_s = 0.24$ cm/min), la cual se midió en campo, con el objeto de lograr el régimen permanente a un contenido de humedad inferior a la saturación.

La solución aplicada sobre la superficie de la columna varió a lo largo del experimento. En principio se usó una solución de CaCl_2 0.01M, esta solución se utilizó hasta que se alcanzó el régimen permanente en la columna.

A continuación, se retiró la parte superior del simulador para cambiar la solución por una de CaCl_2 0.01 M + H_2^{18}O 1mL/L + KBr 0.1 M, la columna se pesó y se volvió a montar el dispositivo. Esta solución se aplicó en la columna hasta alcanzar por lo menos medio volumen de poro (V_p), el cual se obtuvo al multiplicar el volumen total de la columna por la humedad volumétrica del suelo.

Transcurrido ese tiempo, la solución se cambió nuevamente por una de CaCl_2 0.01 M, la cual se continuó aplicando hasta que el valor de CE vuelve a ser el mismo que se leyó cuando se alcanzó el régimen permanente, con CE constante se dio por concluido el experimento. Finalmente se detiene el flujo, y la columna es retirada del simulador, es pesada y almacenada en el cuarto frío (4°C).

Los parámetros experimentales de las columnas de suelo se muestran en la Tabla 3.2, en la cual se presentan las columnas de suelo evaluadas para cada horizonte, superficial y sub-superficial.

Tabla 3.2 Parámetros de experimento de transporte en columnas de suelo

Suelo	Altura de la columna (cm)	Diámetro (cm)	Porosidad (%)	Humedad volumétrica (cm^3/cm^3)	Flujo (cm^3/min)	Velocidad Darcy (cm/min)	Volumen de poro (cm^3)	Duración del pulso (Volumen de poro)
Superficial	13	10	60	0.42	0.25	0.0032	425	0.43
Sub-superficial	15	10	56	0.33	0.25	0.0032	387	0.49



3.6. Análisis de solutos

Aniones y cationes

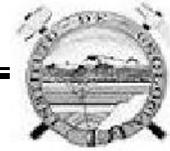
Los análisis de aniones y cationes mayoritarios en muestras de la solución de salida de la columna de suelo, fueron realizados por medio de la técnica de cromatografía de iones, utilizando un equipo constituido de una bomba binaria de la marca Waters modelo 1525, un automuestreador de la misma marca modelo 717 y un detector conductimétrico marca Waters modelo 432, del laboratorio de Química de Aguas del Instituto de Geología de la UNAM.

La determinación y cuantificación de aniones se realizó utilizando como fase estacionaria, una columna IC-PaK[®] de Waters cuyas dimensiones son: 4.6x75 mm, empleando como fase móvil una solución constituida de acetonitrilo:butanol:gluconato borato de sodio:agua en una relación 12:2:2:84 en modo isocrático a un flujo de 1 mL/min.

La determinación y cuantificación de cationes se realizó utilizando como fase estacionaria, una columna Metrosep C4[®] de Metrohm cuyas dimensiones son: 4X100 mm, empleando como fase móvil una solución constituida de HNO₃ 1.9 mM + ácido dipicolínico 0.8 mM en modo isocrático a un flujo de 0.9 mL/min.

Trazadores

- El ¹⁸O se determinó mediante espectrometría de masas en el laboratorio de Geoquímica Isotópica del Instituto de Geología la Universidad Autónoma de México (UNAM). El equipo utilizado fue un Espectrómetro Thermo Finnigan MAT 253 conforme al método de prueba por equilibrio con CO₂ a 25°C por 36 horas utilizando gas Bench con una incertidumbre de 0.2%.
- El Br⁻ se determinó por conductimetría utilizando un electrodo específico (Orion ionplus Sure-Flow).



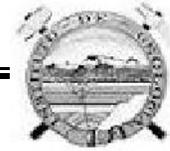
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades físico - químicas del suelo en estudio

A continuación se presenta una tabla con los valores obtenidos de las propiedades físicas y químicas del suelo determinadas en el laboratorio.

Tabla 4.1 Propiedades físicas y químicas del suelo.

	Superficial (5-20)	Sub- superficial (65-80)
pH	8.01 ± 0.02	8.43 ± 0.01
Conductividad eléctrica (mS/cm)	1.55 ± 0.002	1.64 ± 0.004
% Carbono total	2.28	0.96
% Nitrógeno total	0.25	0.09
Cationes intercambiables		
Ca (cmol _c /kg)	22.05	22.02
Mg (cmol _c /kg)	8.51	10.93
K (cmol _c /kg)	2.32	2.96
Na (cmol _c /kg)	2.03	4.48
Densidad aparente (g/cm³)	1.13	1.27
Densidad real (g/cm³)	2.85	2.89
Textura	franco arcillo limoso	arcillo limoso
Arcilla %	34	48
Limo %	54	40
Arena %	12	12
Superficie específica (m²/g)	66	115
Porosidad (%)	60	56



pH

Los valores de pH obtenidos nos indican que estos suelos son moderadamente alcalinos (Siebe et al., 2006), el valor de pH más alto se presenta en el horizonte sub-superficial, 8.43, y el menor en el horizonte superficial, 8.01. Este dato es importante ya que en un suelo que tiende a la alcalinidad la carga negativa del suelo aumenta (Velazco et al., 1987).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) para los suelos analizados, nos dice que estos suelos no presentan problemas de salinidad (Tabla 2.5), la CE es menor en el horizonte superficial, esto podría relacionarse a que durante el muestreo no se consideró el contenido de humedad del suelo. Un elevado contenido de humedad permitiría que las sales se disolvieran y se movieran a través del suelo, precipitando en zonas donde el contenido de humedad disminuye (Abu-Awwad 1996 y Rusan et al., 2007); lo cual explicaría que la conductividad eléctrica fuese mayor en el horizonte sub-superficial.

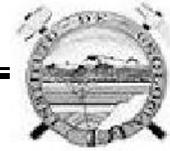
Nitrógeno y carbono total

Los valores obtenidos de nitrógeno y carbono total son mayores para el horizonte superficial, estos datos se pueden correlacionar con el contenido de materia orgánica la materia orgánica se acumula en la parte superficial del suelo (Mohammad y Mazahreh, 2003); además se incrementa en suelos que son regados con agua residual y también en suelos que llevan mayor tiempo siendo regados con este tipo de aguas (Rusan et al., 2007 y Friedel et al., 2000).

La materia orgánica cuenta con una alta capacidad de retención de agua, capacidad de intercambio iónico y superficie específica; por lo que su presencia influye sobre el movimiento de soluto y agua en el suelo. De igual forma su presencia en el suelo favorece la formación de agregados permitiendo que la macro y mesoporosidad se incrementen.

Cationes intercambiables

En la Tabla 4.1 se presentan los cationes intercambiables en los suelos estudiados, en la cual se observa que los cationes intercambiables en los suelos son calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na). El contenido de cationes es mayor en el horizonte sub-superficial; lo cual muy probablemente se deba al alto contenido de arcilla en este horizonte, que favorece la adsorción de cationes. También se observa que en el horizonte superficial el catión dominante es el Ca, seguido por el Mg, K y Na; algo similar sucede en el horizonte sub-superficial, solo que en este suelo el Na se encuentra en mayor cantidad que el K, lo que nos sugiere que existe un mayor contenido de Na en este suelo.



Densidad aparente y densidad real

La densidad real obtenida es similar en los suelos estudiados, lo cual nos indica que el material parental de los suelos en estudio es el mismo. En el caso de la densidad aparente se obtuvieron valores diferentes, debido a factores como la variabilidad espacial de este parámetro a través del suelo, la compactación y el contenido de materia orgánica son factores que hacen variar dicho parámetro; a mayor compactación la densidad aparente aumenta y a mayor contenido de materia orgánica la densidad aparente disminuye (Porta et al., 2003). De este modo, en los suelos estudiados, la menor densidad aparente en el horizonte superficial se asocia, principalmente, con el mayor contenido de materia orgánica.

Textura y superficie específica

Los suelos analizados tienen una textura franco arcilloso limoso (superficial) y arcillo limoso (sub-superficial), el contenido de arcillas es mayor conforme la profundidad aumenta. La superficie específica (S_E) aumenta cuando el tamaño de la partícula es menor, lo cual se observa con los resultados obtenidos, en donde S_E es mayor para el suelo con mayor contenido de arcillas. Este dato se correlaciona positivamente con la capacidad de intercambio de iones (Fournier et al., 2002), lo cual se observó al momento de obtener los cationes intercambiables los cuales dominaron en el suelo con mayor S_E (sub-superficial).

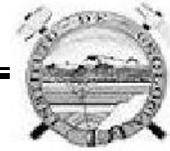
Porosidad

Como se observa en la Tabla 4.1 la porosidad es menor en el horizonte sub-superficial, lo cual se relaciona con la mayor densidad aparente debida a los factores que se mencionaron en el análisis de resultados de este parámetro. La porosidad es determinada principalmente por la textura, estructura y la cantidad de materia orgánica (Donoso, 1992), en este caso la porosidad es determinada por la estructura del suelo y el contenido de materia orgánica. Más adelante se hablará de la caracterización de la red porosa, en la cual se detallará el tamaño y forma de poros, la conectividad de estos, entre otros parámetros que determinan el movimiento de agua y solutos en el suelo.

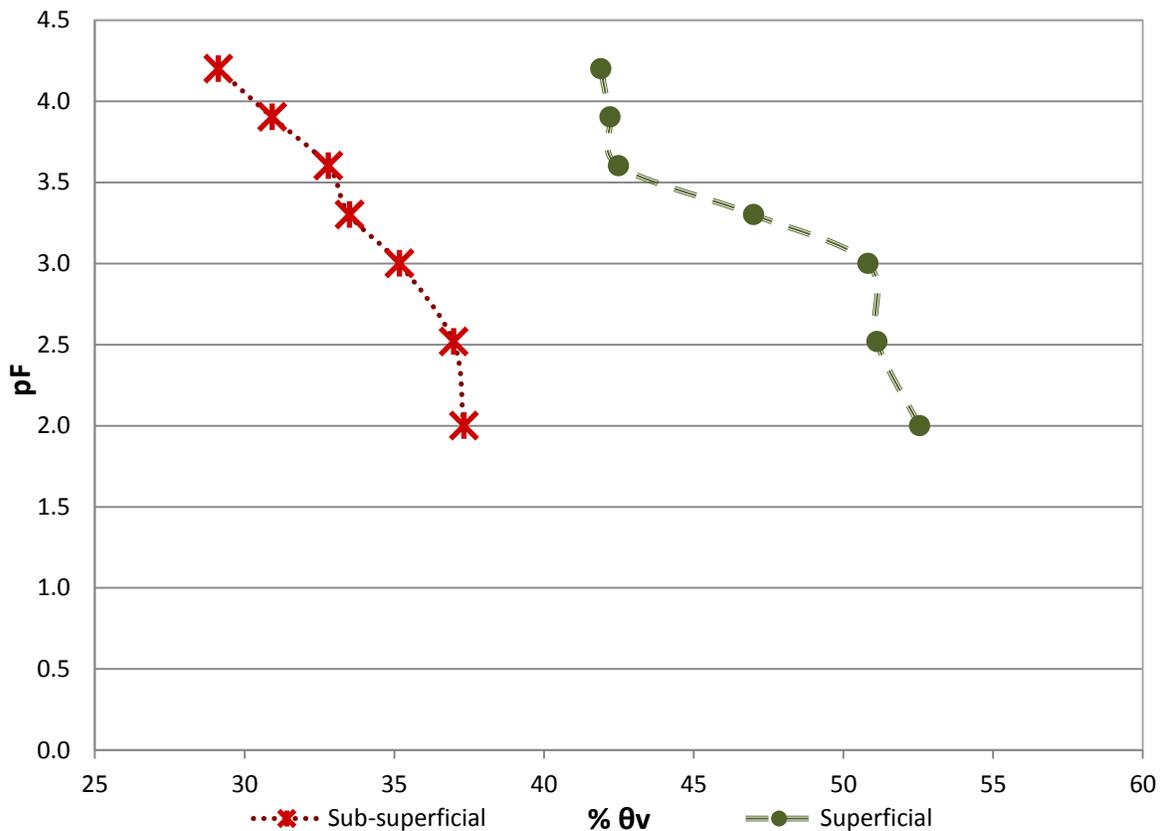
Curva de retención de humedad

En la Gráfica 4.1 se presenta la curva de retención de humedad para las dos profundidades evaluadas, en la cual se observa la humedad volumétrica en el suelo a una presión dada (succión). En el horizonte superficial se puede observar una mayor capacidad de almacenamiento de agua a todas las presiones aplicadas (Tabla 3.3, succión), lo cual se atribuye a las propiedades físicas que presentó este suelo: mayor porosidad, mayor contenido de materia orgánica, mayor densidad aparente, principalmente.

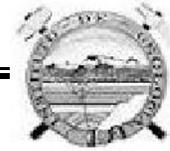
A partir de estas gráficas se puede inferir el tamaño de poros presentes en el suelo; para lo cual se considera que el agua que se encuentra de 0 – 2.4 pF es la que se mueve por



gravidad a través de los macroporos, entre 2.5 – 4.0 pF se encuentra el agua que se mueve por capilaridad en los mesoporos, finalmente una presión mayor a 4.1 pF se encuentra el agua higroscópica la cual se encuentra en los microporos (Gajardo, 2005). Con lo dicho anteriormente, se puede concluir que en el horizonte superficial existe mayor cantidad de macroporos y mesoporos, ya que el agua fue desalojada del suelo fácilmente en el rango de presiones 0 – 4.0 pF, que corresponde a los macroporos y mesoporos; mientras que en el horizonte sub-superficial el agua desalojada por los macroporos y mesoporos fue en menor porcentaje que el horizonte superficial, por lo que se infiere que el movimiento del agua en este suelo está determinado por la presencia de microporos, presentando mayor dificultad de movimiento el agua en el suelo sub-superficial que en el superficial. Lo antes presentado se atribuye a la textura del suelo, mayor contenido de arcilla favorece la presencia de microporos, siendo más arcilloso el suelo sub-superficial lo cual se pone de manifiesto con la pendiente suave que presenta la curva de retención de humedad para este suelo. En el caso del suelo superficial el constante laboreo que se da en el sitio favorece la presencia de macroporos y mesoporos (Prado et al., 2009); en contraparte, un mayor contenido de materia orgánica explica la mayor capacidad de almacenamiento de agua en este suelo, contando con una capacidad de almacenamiento de agua muy alta.



Gráfica 4.1 Curvas de retención de humedad a las profundidades evaluadas (ver anexo Tabla 1).

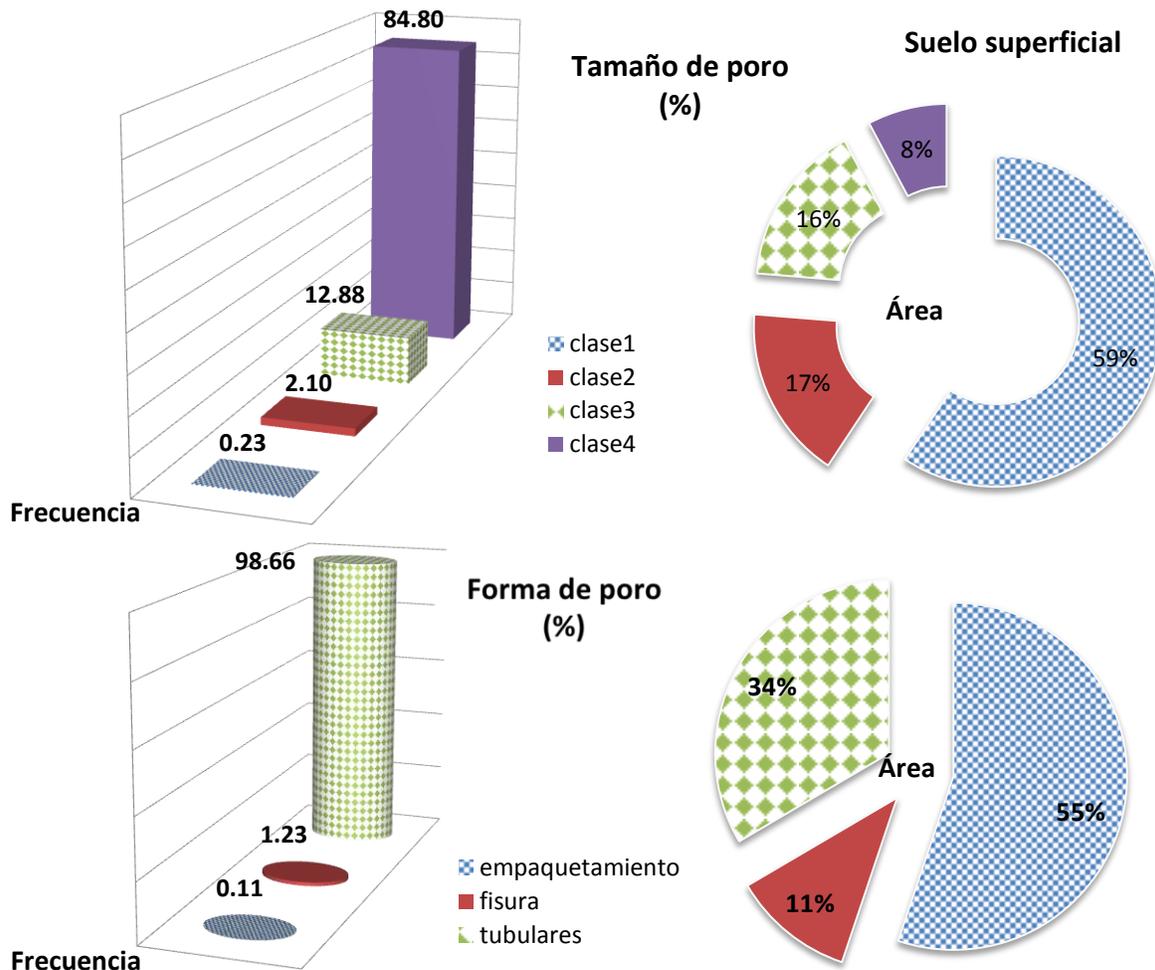


4.2. Caracterización del movimiento del agua

La caracterización del movimiento del agua en un suelo permite entender los procesos que gobiernan el movimiento del fluido y el transporte de los solutos que la utilizan como vector.

Caracterización de la red porosa

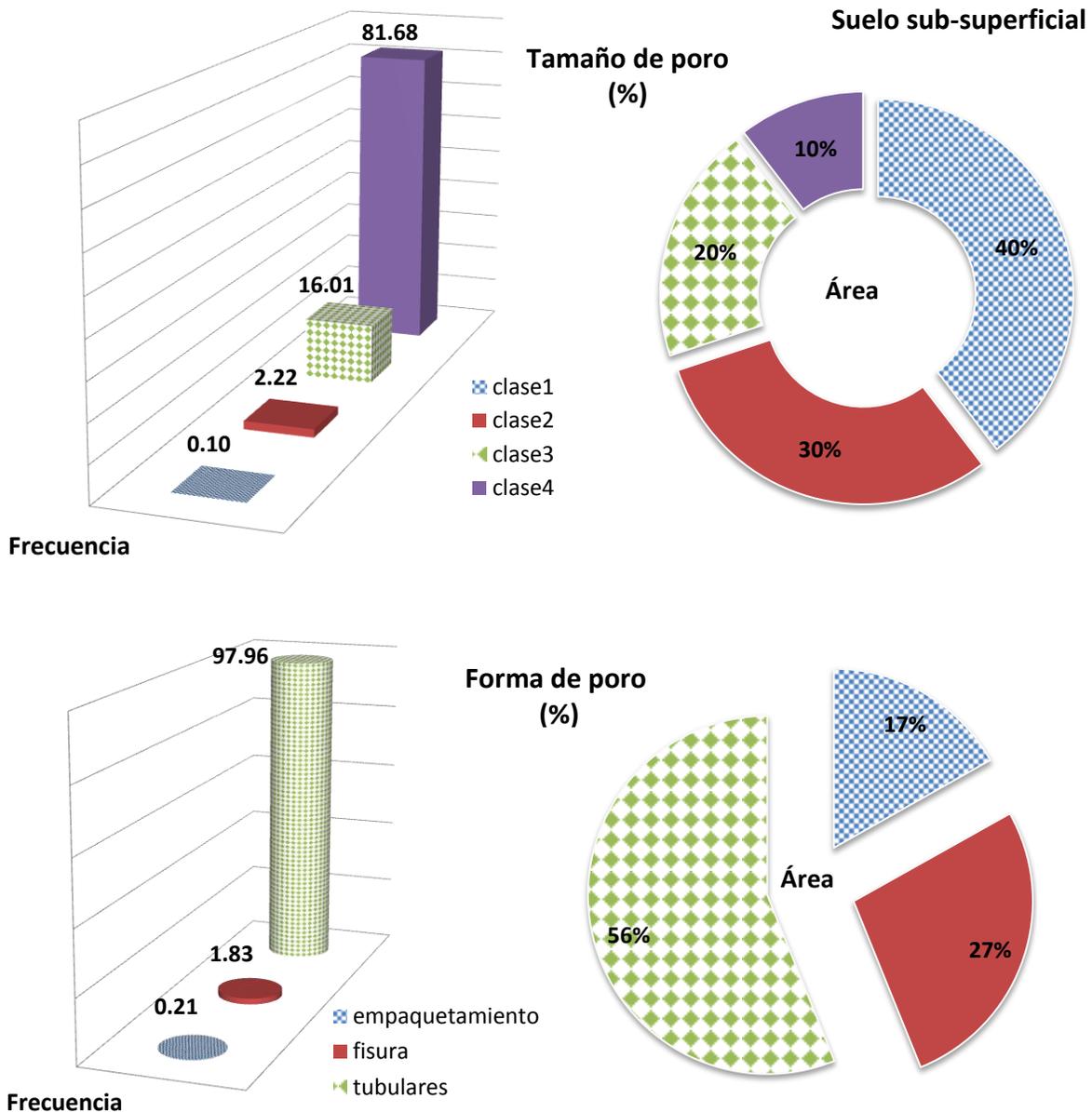
Como se ha mencionado anteriormente; los poros presentes en el suelo son un parámetro que se debe considerar al momento de evaluar el movimiento de solutos en el suelo. Por lo que en el presente trabajo se caracterizó la red porosa empleando imágenes digitales de láminas delgadas del suelo en estudio. A continuación se presentan las gráficas (4.2 y 4.3) que se obtuvieron de los datos de forma y tamaño de poro para las profundidades evaluadas.



Gráfica 4.2 Tamaño y forma de poros en el suelo superficial. Donde: Clase 1, área > 1 mm²/Clase 2, 0.09 mm² < área < 1 mm²/ Clase 3, 0.01 mm² < área < 0.09 mm²/ Clase 4, área < 0.01 mm² (ver anexo Tabla 2).



En la Gráfica 4.2 se presenta los datos que se obtuvieron para el horizonte superficial, en donde se observa que en este suelo abundan los poros de clase 4 (84.80%, de menor área) y los tubulares (98.66%). Referente al área de los poros, los poros de clase 1 ocupan mayor área (59%), mientras que los de clase 4 ocupan apenas el 8%; los poros de empaquetamiento tienen mayor área en este suelo, 55%, seguidos por los tubulares con 34%.



Gráfica 4.3 Tamaño y forma de poros en el suelo sub-superficial. Donde: Clase 1, área > 1 mm²/Clase 2, 0.09 mm² < área < 1 mm²/ Clase 3, 0.01 mm² < área < 0.09 mm²/ Clase 4, área < 0.01 mm² (ver anexo Tabla 2).



Ahora en la gráfica 4.3 se presentan los datos que se obtuvieron para el suelo sub-superficial. En este horizonte abundan los poros más pequeños, clase 4 (81.68%) y los tubulares (97.96%), pero ocupan mayor área los poros más grandes, clase 1 (40%) y los tubulares (56%).

La diferencia entre los horizontes evaluados radica en que en el horizonte superficial ocupan mayor área los poros de empaquetamiento, lo cual se debe al constante laboreo que se da en este suelo, favoreciendo la formación de poros de empaquetamiento y la destrucción de poros naturales (fisura y tubulares) (Prado et al., 2009).

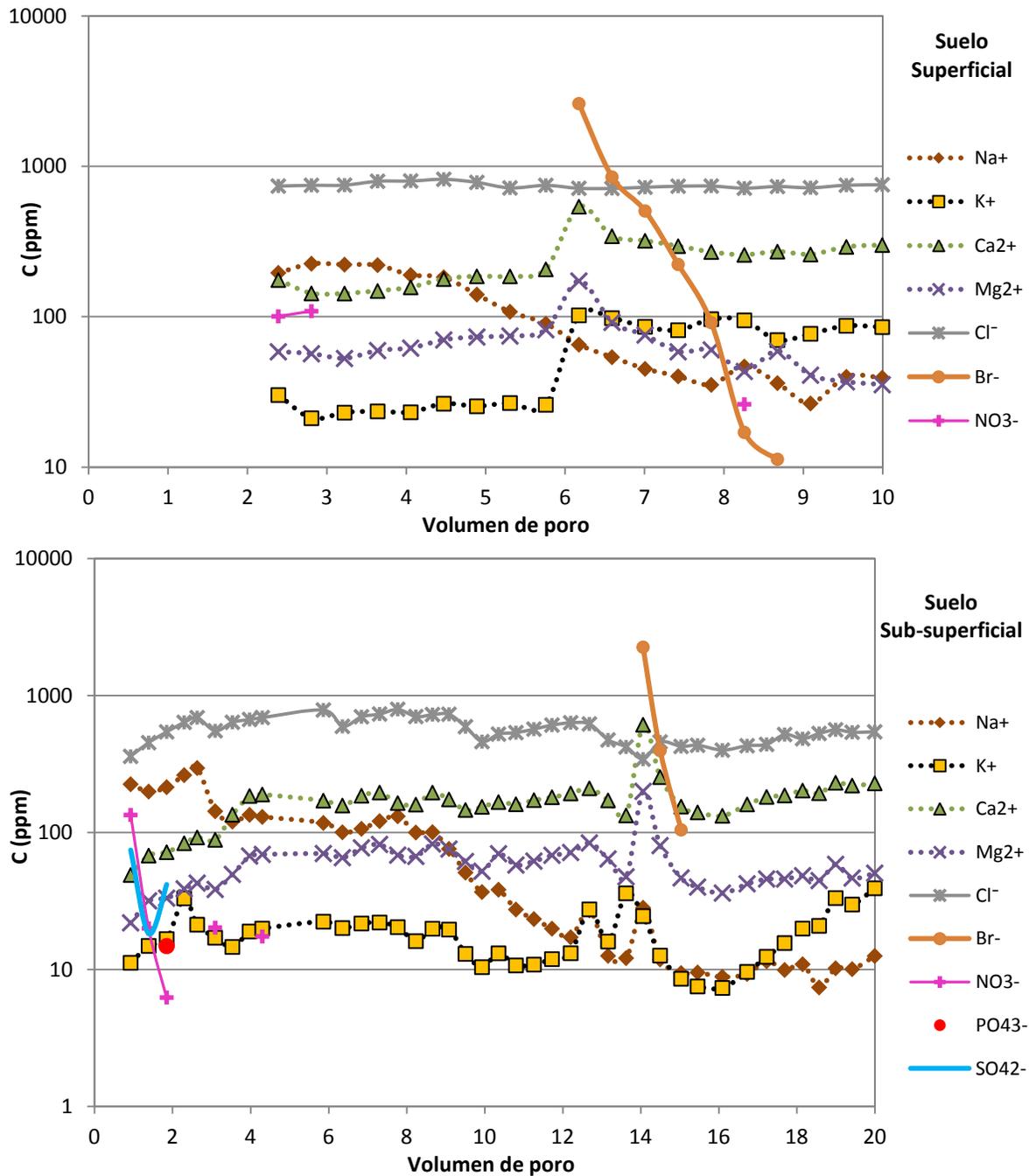
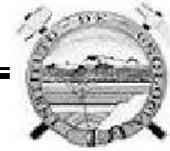
A partir de la curva de retención de humedad y mediante el análisis de imágenes de secciones delgadas de los suelos evaluados, se pudo determinar que en el suelo superficial existe un mayor frecuencia de macroporos y mesoporos que en el suelo sub-superficial, lo cual favorece a la conductividad hidráulica de 0.24 cm/min (muy rápida; FAO, 1963). Es decir, en el suelo superficial una porción del agua se moverá libremente debido a la gravedad, favoreciendo así el movimiento rápido de soluto. Por otro lado, en el suelo sub-superficial, se observó que predominan los microporos, debido a lo cual la velocidad de infiltración de agua es menor.

Transporte de solutos

Aniones y cationes

Durante el experimento de transporte de solutos en las columnas intactas de suelo se tomaron muestras del lixiviado, para evaluar el comportamiento de los iones presentes en el suelo. En la Gráfica 4.4 se presenta la concentración de iones disueltos en la solución de salida del suelo y su variación en el tiempo experimental.

Los iones determinados en el lixiviado de ambas columnas de suelo fueron Na^+ (sodio), K^+ (potasio), Ca^{2+} (calcio), Mg^{2+} (magnesio), Cl^- (cloruro), Br^- (bromuro) y NO_3^- (nitrato); dichos iones se encuentran en la solución durante todo el experimento a excepción del Br^- y NO_3^- . El Br^- se presentó una vez que se aplicó el pulso (CaCl_2 0.01M + KBr 0.1M + H_2^{18}O) en la columna de suelo, con lo cual se corroboró que en los suelos estudiados el Br^- no se encuentra de manera natural y puede ser empleado como trazador en estos suelos. El NO_3^- fue detectado solamente en las primeras muestras de los lixiviados (primeras horas experimentales); debido a la similitud de cargas entre el suelo y el anión es poco probable que el anión se encontrara adsorbido en el suelo, por lo que se piensa que este anión se formó a partir del amonio que se encontraba retenido por la fase sólida del suelo y con la aplicación de la solución (CaCl_2 0.01M) y la presencia de oxígeno al estar en condiciones de no saturación, se formó nitrato, el cual se movió a través del suelo de tal forma que fue detectado en la solución de salida de la columna de suelo.



Gráfica 4.4 Se muestran la duración del experimento en volumen de poro y la concentración de los iones detectados en la solución de salida de la columna de suelo (partes por millón, ppm). El pulso (CaCl_2 0.01M + KBr 0.1M + H_2^{18}O) fue aplicado el día 9 y 27, en la columna del suelo superficial y sub-superficial respectivamente (ver anexo Tabla 5 y 6).

Como se puede observar en la Gráfica 4.4 la concentración de todos los iones estaba en equilibrio, confirmando que el experimento fue realizado en régimen permanente, a excepción del Na^+ el cual tiende a disminuir a través del tiempo. Dicho equilibrio se



interrumpió cuando a la columna de suelo se le aplicó el pulso (CaCl_2 0.01M + KBr 0.1M + H_2^{18}O), la concentración de cationes en la solución de salida aumentó en el momento en que el Br^- fue detectado, lo cual se atribuye a intercambio catiónico. El potasio (K) aplicado junto con el Br^- incrementó el intercambio catiónico del suelo, el incremento de concentración de Ca y K se debe a que estos se encuentran presentes en el pulso aplicado al suelo durante el experimento; mientras que el incremento de Mg se debe a que este se intercambia de posiciones adsorbidas con el Ca y K, debido al incremento de concentración en la solución de los últimos. Por otro lado la concentración del Na tiende a disminuir; probablemente se deba a que los iones adsorbidos de Na sean pocos, por lo que tiende a solubilizarse menos. De esta forma se logra explicar el repentino aumento de los cationes en el lixiviado, mientras que la concentración de los aniones no se ve afectada por la aplicación del pulso.

Además de los iones ya mencionados, en el suelo sub-superficial se encontró PO_4^{3-} (fosfatos) y SO_4^{2-} (sulfato), de igual forma que el NO_3^- , estos aniones se encontraban en el suelo y se disolvieron en el momento en que el contenido de humedad aumentó, favoreciendo con ello su movimiento a través del suelo. Lo cual es confirmado con el valor de CE, el cual fue mayor en el suelo sub-superficial.

Trazadores: Oxígeno 18 (^{18}O) y Bromuro (Br^-)

Las curvas de elución (Gráfica 4.5 y 4.6) presentan la variación de la concentración del soluto, en este caso Br^- y ^{18}O , a través del tiempo. Dichas curvas son adimensionales, pues se representa la concentración relativa de cada soluto, haciendo una relación entre la concentración medida en el lixiviado (C) y la concentración del soluto aplicada a la columna de suelo (C_0); mientras que el tiempo es representado en forma de volumen de poro, el cual se calculó previamente. En la gráfica es considerado tiempo cero al momento en que se aplicó la solución con los solutos (Br^- y ^{18}O) a la columna de suelo.

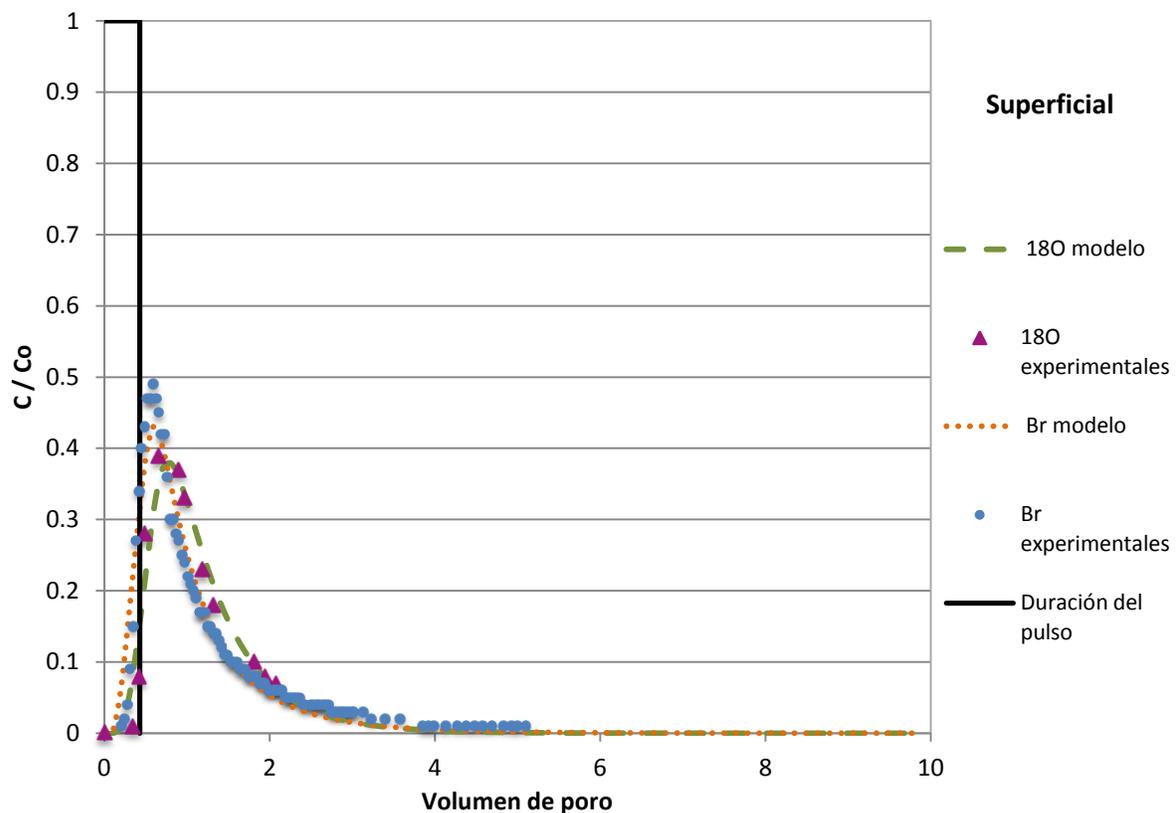
Las curvas de elución experimentales fueron modeladas usando la ecuación de convección dispersión para una dimensión (transporte unidireccional vertical). Se obtuvo el parámetro de dispersión fijando un retardo de 1, por ajuste del modelo a los datos experimentales de ^{18}O , usando el código CXTFIT 2.1 (Toride et al., 1999) en modo inverso. Las condiciones de frontera fueron de concentración impuesta en el límite superior de la columna, la concentración relativa de 1 durante el tiempo que duró la aplicación del pulso, mientras que una concentración de cero una vez concluido éste y hasta el final de la corrida; la condición de sistema semi-infinito se asumió en la base de la columna.

En la Gráfica 4.5 se representa el pulso aplicado a la columna de suelo y las curvas de elución que se obtuvieron para los solutos, tanto experimentalmente como con el modelo que se obtuvo con el algoritmo utilizado, en la columna del horizonte superficial. La duración del pulso en volumen de poro fue de 0.43 y una concentración relativa de 1, su representación gráfica es en forma de pulso (aplicación de una concentración dada durante



un tiempo dado). La curva de elución para el ^{18}O en el suelo superficial es ligeramente asimétrica, se verificó el balance masa, es decir, la masa de entrada fue igual a la masa de salida (área bajo la curva de elución). El modelo que describe mejor los datos fue el modelo en equilibrio físico. La forma achatada de la curva se atribuye a procesos dispersivos en los que se ve envuelto el soluto por su paso en el suelo (Melamed et al., 1994).

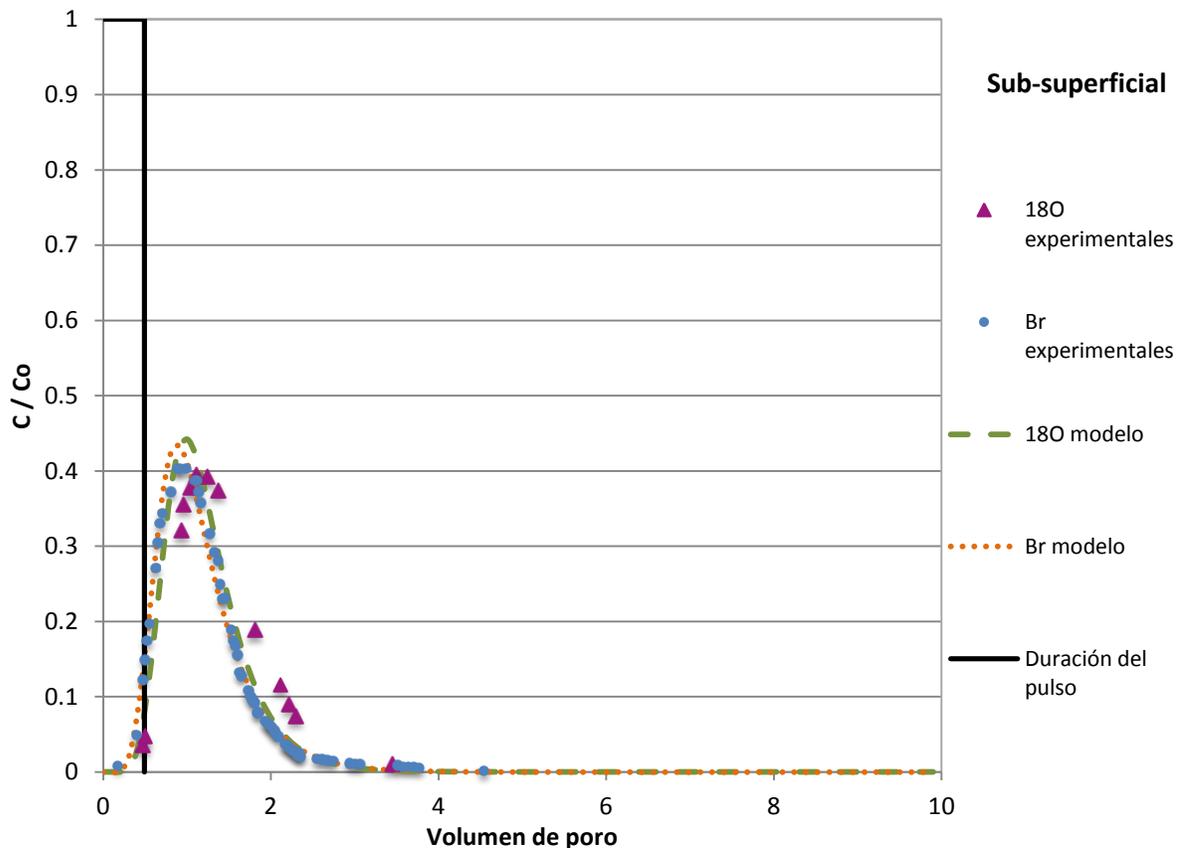
Si se observa la curva de elución para el Br^- , ésta es similar a la del ^{18}O , ligeramente asimétrica debido al coleo que presenta la curva al final de la gráfica, muy probablemente el ^{18}O tendría un comportamiento similar pero debido a que no se obtuvieron muestras del ^{18}O en la parte final de la curva no se puede observar este coleo en la gráfica. La forma achatada de la curva y el coleo de ésta, nos indica que el Br^- está sujeto a procesos dispersivos, al igual que el ^{18}O . El balance de masa para el bromuro se cumple, con lo que se corrobora que en el suelo no hay sorción ni liberación del soluto. El Br^- presenta una salida anticipada con respecto al ^{18}O , este resultado puede indicar el proceso de repulsión aniónica en la columna de suelo, este resultado será discutido más adelante.



Gráfica 4.5 Curva de elución (concentración vs. tiempo) de los trazadores (^{18}O y Br^-) aplicados en el suelo superficial. La concentración (C/C_0) se presenta de manera adimensional, en donde C_0 es la concentración aplicada y C la concentración en el lixiviado. El tiempo está dado en volumen de poro (Vp), el cual se obtuvo al multiplicar el volumen total de la columna por la humedad volumétrica del suelo (ver anexo Tabla 3).



Las curvas de elución de los trazadores y la señal del pulso aplicado de la columna sub-superficial, se muestran en la Gráfica 4.6. El pulso fue aplicado durante 0.49 volúmenes de poro y con una concentración relativa de 1. La curva obtenida para el ^{18}O es simétrica; dando cuenta del movimiento en equilibrio físico. Al igual que el suelo superficial, en este suelo se presentan procesos dispersivos, lo cual se infiere a partir de la forma achatada de la curva y el ligero coleo que se observa; el balance de masa realizado fue satisfactorio. La curva de elución del Br^- es muy similar que la del ^{18}O , es simétrica y achatada. El balance de masa realizado para el Br^- , nos permite ver que en el suelo no existen procesos de sorción – desorción sobre el soluto, ya que se obtuvo un balance satisfactorio entre la entrada y la salida del soluto. Similar a lo observado en el suelo superficial, el Br^- sale anticipadamente con respecto al ^{18}O , por lo que también en este suelo, se observa el proceso de repulsión aniónica.



Gráfica 4.6 Curva de elución (concentración vs. tiempo) de los trazadores (^{18}O y Br^-) aplicados en el suelo sub-superficial. La concentración (C/C_0) se presenta de manera adimensional, en donde C_0 es la concentración aplicada y C la concentración en el lixiviado. El tiempo está dado en volumen de poro (V_p), el cual se obtuvo al multiplicar el volumen total de la columna por la humedad volumétrica del suelo (ver anexo Tabla 4).

Como se mencionó en párrafos anteriores, para correr el modelo en modo inverso (algoritmo CXTFIT 2.1, Toride et al., 1999), se usaron datos de las curvas de elución. Los resultados obtenidos de dispersión y retardo se presentan en la Tabla 4.2.

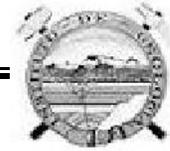


Tabla 4.2 Parámetros determinados con CXTFIT 2.1 (Toride et al., 1999).

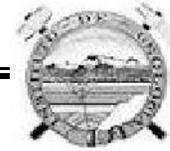
Suelo	Trazador	Velocidad de poro (cm/min)	Retardo	Dispersión (cm ² /min)	r ²	Modelo
Superficial	¹⁸ O	0.0107	1	0.033	0.92	Equilibrio
	Br	0.0107	0.87	0.061	0.96	Equilibrio
Sub-superficial	¹⁸ O	0.0119	1	0.016	0.84	Equilibrio
	Br	0.0119	0.93	0.022	0.99	Equilibrio

El valor de retardo igual a la unidad para el ¹⁸O fue un dato de entrada al modelo, siendo el trazador ideal de la molécula del agua no presenta reacción química con el suelo. Los valores de retardo obtenidos para el bromuro (Br⁻), fueron inferiores a la unidad, con lo que se corrobora que el Br⁻ en este suelo sufre de repulsión aniónica. La salida anticipada del anión, retardo menor a 1, se debe a la similitud de cargas electrostáticas negativas del soluto y la carga superficial neta de las partículas del suelo, en estas condiciones, el Br⁻ es sujeto a una adsorción negativa (exclusión o repulsión) por lo que su movimiento es acelerado provocando una salida rápida del suelo.

La dispersión obtenida para el ¹⁸O fue mayor para el suelo superficial que el sub-superficial, lo cual se atribuye a la heterogeneidad presente en el suelo. En el suelo superficial se presenta una gran variación en la forma y tamaño de poros, ya que debido al constante laboreo que se da en este suelo se destruyen los poros naturales y se da lugar a los poros de empaquetamiento; mientras que en el suelo sub-superficial predominan los poros naturales que en este caso son microporos, los cuales se deben principalmente al contenido de arcilla. Por lo que se considera que el suelo sub-superficial presenta mayor homogeneidad en poros, resultando en una menor dispersión del soluto en este suelo.

En el caso del Br⁻, la dispersión obtenida fue mayor a la dispersión del ¹⁸O en ambas profundidades; esto se puede correlacionar con la reacción del anión con las cargas de superficie de las partículas del suelo, lo cual provoca una mayor dispersión en el movimiento de este soluto comparado con el movimiento del soluto inerte (¹⁸O).

Por lo ya mencionado se puede decir que el movimiento del agua (H₂¹⁸O) a través del suelo se ve afectado por la heterogeneidad tamaños y forma de poros existentes en el suelo, la dispersión será mayor a mayor grado de heterogeneidad. En el caso del bromuro, el movimiento del anión es afectado tanto por la heterogeneidad del suelo, como por la reacción de repulsión que sufre en su paso por el suelo evaluado.



Repulsión aniónica

Debido a la carga neta negativa del suelo, el movimiento del anión (Br^-) se ve acelerado por la repulsión que recibe de parte de la doble capa eléctrica que se encuentra en la superficie de las partículas del suelo. De esta forma, es indispensable cuantificar dicho efecto para poder utilizar el anión como trazador en estos suelos.

En el trabajo realizado por Raymundo (2008), se menciona que $(1 - R)$ puede verse como el volumen de exclusión aniónica (V_{ex}) (Toride et al., 1999). Con lo antes presentado y los valores experimentales de retardo obtenidos con el algoritmo CXTFIT 2.1 para el Br^- , se calcula un volumen de exclusión aniónica de 0.13 y 0.07, para el suelo superficial y sub-superficial respectivamente. Los valores obtenidos nos indican que existe un mayor volumen de exclusión aniónica, casi el doble, en el suelo superficial que en el sub-superficial.

Por otro lado, se calculó el volumen potencial de exclusión para el bromuro, debido a las arcillas de los suelos evaluados, siguiendo la metodología propuesta por Dousset et al. (2007). El cálculo se realizó empleando un valor promedio de la superficie específica de la arcilla, $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{Kg}$, y un promedio del espesor de la doble capa, 0.5 nm, reportado por Veeh et al. (1994). Con base en esto, se determinó el volumen de exclusión aniónica, en las columnas de suelo estudiadas, a partir de la siguiente ecuación.

$$V_{\text{ex}} = (B_M * V_R) / V_p \dots \dots (4.1)$$

Donde:

V_{ex} = volumen de exclusión aniónica

V_R = volumen de exclusión debido a la arcilla ($\text{L}^3 \text{M}^{-1}$)

B_M = arcillas presentes en la columna de suelo (M)

V_p = volumen de poro en la columna de suelo (L^3)

Con la ecuación antes presentada se obtiene un valor de 0.04 para el suelo superficial y de 0.07 para el suelo sub-superficial. Resulta importante indicar que esta ecuación nos permite obtener el volumen de exclusión aniónica debido a la presencia de la doble capa difusa de las arcillas, es decir, considera que la repulsión aniónica se debe exclusivamente a las arcillas presentes en el suelo.

También se determinó el volumen de exclusión aniónica teórica según la metodología de Rose et al. (2009) y Melamed et al. (1994). Los autores proponen estimar, en un primer tiempo, el espesor de la doble capa difusa a partir de la ecuación 4.2 (Schofield, 1947).

$$\delta = Q / \sqrt{\beta c} \dots \dots (4.2)$$

Donde:



Q = factor que depende del radio de valencia entre el catión y el anión, para sales monovalentes, como el bromuro, es 2

β = constante de la doble capa difusa, $1.078 \times 10^{16} \text{ m mol}_c^{-1}$ a 20°C

c = concentración del soluto en la solución (M L^{-3})

En donde se obtiene un espesor de la capa difusa de 1.93 nm, con este dato y la ecuación 4.3 se determina el volumen de exclusión.

$$V_{ex} = S_E * \rho_a * \delta \dots\dots(4.3)$$

Donde:

S_E = superficie específica del suelo ($\text{L}^2 \text{M}^{-1}$)

ρ_a = densidad aparente (M L^{-3})

δ = espesor de la doble capa difusa (L)

Se obtiene un valor de 0.14 y 0.28 para el suelo superficial y sub-superficial respectivamente.

A manera de resumen de los cálculos previos, en la Tabla 4.3 se presentan los valores obtenidos de exclusión aniónica, tanto teóricos como experimentales en los suelos evaluados, donde se designa como dato teórico 1 al método empleado por Dousset et al. (2007) y dato teórico 2 al método empleado por Rose et al. (2009) y Melamed et al. (1994).

Tabla 4.3 Valores obtenidos del volumen de exclusión aniónica para el bromuro en los suelos estudiados.

	Volumen de exclusión aniónica (V_{ex})		
	Experimental	Teórico 1 <i>(Dousset et al., 2007)</i>	Teórico 2 <i>(Rose et al., 2009 y Melamed et al., 1994)</i>
Superficial	0.13	0.04	0.14
Sub-superficial	0.07	0.07	0.28

Experimentalmente (primera columna, Tabla 4.3), se obtuvo que la exclusión aniónica fue mayor para el suelo superficial que el sub-superficial, esto podría correlacionarse positivamente con el contenido de materia orgánica en el suelo, la cual es mayor en el suelo superficial. Velazco et al. (1987) menciona que a pH básico existe un aumento en el aporte de cargas negativas en el suelo, este aporte se debe principalmente a la materia orgánica. Esto corresponde con lo encontrado en el suelo superficial, el cual es moderadamente alcalino y cuenta con mayor contenido de materia orgánica que el suelo sub-superficial, por lo que se espera que la repulsión aniónica sea mayor en el suelo superficial, lo cual coincide con los resultados obtenidos.



Al comparar los datos teóricos con los experimentales, se observa que en el suelo superficial se obtuvieron datos similares entre el dato experimental y el dato teórico 2, mientras que el dato teórico 1 está muy por debajo del valor obtenido experimentalmente. La ecuación empleada para determinar el dato teórico 2 nos permite obtener una mejor aproximación de la exclusión aniónica en suelos con una mayor densidad de carga (Schofield, 1947); mientras que el dato teórico 1, asume que la exclusión aniónica del suelo se debe exclusivamente a las arcillas presentes en el suelo. La mejor aproximación obtenida en el suelo superficial utilizando el dato teórico 2, puede deberse a que este suelo presenta una mayor densidad de carga debido al mayor contenido de materia orgánica en este suelo (4 %), respecto al suelo sub - superficial (1 %), la cual incrementa la carga negativa del suelo y con ello el espesor de la capa difusa (Oades, 1984).

La exclusión aniónica experimental del suelo sub-superficial tuvo una mejor correlación con el dato teórico 1, mientras que el dato teórico 2 obtenido se encuentra muy por arriba del dato experimental. Con base en este resultado podemos estimar que en este suelo, la repulsión del bromuro es definida, principalmente, por el contenido de arcilla.

Con lo ya presentado, se corrobora que en los suelos estudiados existe una repulsión aniónica hacia el bromuro. Dicha repulsión se ve definida por las propiedades del suelo, en el suelo sub-superficial el contenido de arcilla es la propiedad que define el grado de repulsión aniónica, mientras que en el suelo superficial también se debe considerar el contenido de materia orgánica.

El bromuro como trazador en suelos del Valle del Mezquital

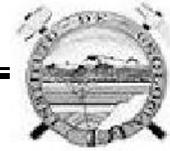
En los suelos del Mezquital, los aniones son susceptibles de sufrir repulsión aniónica debido al alto contenido de arcillas (>30 %) y a una carga negativa alta del suelo. La repulsión aniónica se debe a la similitud de cargas negativas existente en el suelo y el soluto (anión, Br), permitiendo que la movilidad del bromuro se incremente en el medio. El hecho de que exista una reacción físico-química como la repulsión aniónica, afecta el carácter inerte del trazador, con la posible sub o sobre estimación de la velocidad de flujo, dispersión del suelo y estimación de la capacidad de retención del suelo respecto a los solutos reactivos que se deseen evaluar.

En este contexto, uno de los alcances de este trabajo es la caracterización del movimiento del anión bromuro, que permita su utilización como trazador en experimentos de transporte en suelos del Valle del Mezquital. La caracterización incluyó la estimación de las propiedades físicas y químicas del suelo (textura, porosidad, densidad aparente, carbono y nitrógeno total, entre otras); así como el espesor de la doble capa, y el volumen de exclusión aniónica teórica y experimental para el bromuro. De esta forma, los resultados obtenidos en la tesis, nos permiten sugerir las siguientes condiciones para la utilización del bromuro como trazador: la concentración de la solución de bromuro se sugiere que sea de



alrededor de 0.1 M, ya que dicha concentración nos permite evaluar el movimiento del anión en este suelo y nos facilita su análisis con un método simple como un electrodo de ión selectivo (electrodo ion selectivo, Orion ionplus Sure-Flow). Por otro lado Lueneberg (2012) evaluó la resistencia que desarrollan las bacterias hacia los antibióticos en suelos del Valle del Mezquital; empleando en experimentos de transporte una concentración 0.02M del bromuro, ya que una concentración mayor resulta toxico para las bacterias del suelo, dicha concentración presentó problemas al momento de su análisis con el electrodo ión selectivo. La concentración no se recomienda ser menor a 0.02 M debido a que el número de aniones excluidos desde la doble capa en la cercanía de las superficies cargadas aumenta cuando la concentración del soluto disminuye, ya que la región de exclusión se incrementa; y también es de considerar que para una concentración menor sería necesario analizar el bromuro con HPLC, incrementando el costo de análisis

La repulsión aniónica encontrada para el bromuro en los suelos evaluados, puede considerarse constante en suelos del Valle del Mezquital que presenten características similares. En suelos superficiales estas condiciones son un contenido de arcilla de 35-40% y un contenido de materia orgánica superior al 3%, mientras que para suelos sub-superficiales las condiciones que debe presentar el suelo son un contenido de arcilla de 45-50% y uno de materia orgánica. El grado de repulsión aniónica no se ve afectado por el contenido de agua del suelo, es decir, puede usarse en experimentos de transporte tanto en régimen permanente (contenido constante de agua) como en régimen transitorio; o bien, en condiciones de saturación o no saturación del suelo. La exclusión aniónica ocurre independientemente al contenido de agua del suelo y a la velocidad de flujo (James y Rubin, 1986).



5. CONCLUSIONES

El objetivo del presente estudio fue caracterizar el movimiento del agua en dos horizontes de un perfil de suelo, y evidenciar el efecto que tiene el uso y manejo del suelo sobre el movimiento del agua. Estas son las principales conclusiones a las que se llegó con el trabajo realizado:

❖ El contenido de materia orgánica tiende a ser mayor en horizontes superficiales, lo cual se corroboró en el estudio, ya que se obtuvo un mayor contenido de materia orgánica en el suelo superficial que el sub-superficial.

❖ A partir de la curva de retención de humedad y mediante el análisis de imágenes de secciones delgadas de los suelos evaluados, se pudo determinar que en el suelo superficial predominan los macroporos y mesoporos en mayor cantidad que en el suelo sub-superficial.

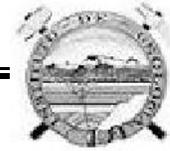
❖ En el horizonte sub-superficial el movimiento del agua es lento; gracias a su textura arcillosa y a que en este horizonte se preservan los poros naturales, tubulares y microporos.

❖ El movimiento del agua se caracterizó empleando H_2^{18}O , observando que se dispersó durante su paso a través del suelo. Se obtuvo una mayor dispersión en el suelo superficial que en el sub-superficial, lo cual se atribuye a la mayor heterogeneidad de poros presente en el primer suelo.

❖ El movimiento del bromuro es afectado por la heterogeneidad de poros del suelo y la carga superficial de éste. Se corroboró que en los suelos estudiados existe una repulsión aniónica hacia el bromuro; debido a la naturaleza química del suelo (carga neta negativa predominantemente) y del anión empleado (Br^-), el movimiento del soluto se ve acelerado (exclusión aniónica).

❖ La exclusión aniónica fue mayor en el suelo superficial que el sub-superficial. Dicha repulsión se ve definida por las propiedades del suelo, en el suelo sub-superficial el contenido de arcilla es la propiedad que define el movimiento del bromuro, a mayor contenido de arcilla mayor repulsión aniónica; mientras que en el suelo superficial también se debe considerar el contenido de materia orgánica, que aumenta la carga negativa del suelo, y con ello la repulsión aniónica hacia el bromuro.

❖ Se logró poner en evidencia que en el suelo del Valle del Mezquital, los aniones son susceptibles de sufrir repulsión aniónica debido al alto contenido de arcillas (>30 %) y al incremento de la carga neta negativa del suelo debido al contenido de materia orgánica. Concluyendo que debido al contenido de materia orgánica la exclusión aniónica es mayor en

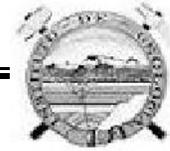


el suelo superficial y se recomienda una concentración del anión Br 0.1-0.02 M para los análisis futuros en estos suelos.

❖ El movimiento del agua en el suelo es definido por el tamaño de los poros debido al tamaño de las partículas que constituyen el suelo y al contenido de materia orgánica que favorece una estructura en agregados, sin embargo, la porosidad del suelo superficial también se ve afectada por las actividades agrícolas del sitio: labranza, tipo de cultivo, fauna del suelo, presencia de raíces. De este modo, en el suelo superficial, el laboreo constante del suelo destruye la estructura natural del suelo, mientras que la presencia de raíces favorece la formación de rutas preferenciales. Permitiendo así el movimiento de solutos hacia horizontes más profundos, lo que puede representar un incremento del riesgo de contaminación del acuífero somero.

❖ En las columnas de suelo intactas se observó que el movimiento del agua (empleando $H_2^{18}O$ como trazador), ocurre en equilibrio físico (ausencia de flujos preferenciales). Este resultado se relaciona con el régimen utilizado en los experimentos: régimen permanente. El hecho de mantener un contenido de humedad del suelo y un flujo de agua constante, hicieron que las grietas del suelo se cerraran, debido a la característica de expansión-contracción del suelo estudiado. Siendo de interés realizar estudios en régimen transitorio, en los cuales se podría observar los flujos preferenciales del suelo y determinar su efecto en el movimiento de solutos a los acuíferos del sitio.

❖ Con el trabajo desarrollado y los resultados obtenidos se logró observar los efectos que la agricultura (uso y manejo del suelo) tiene sobre las características del suelo que definen el movimiento del agua en el suelo, así también, se logró caracterizar el movimiento del agua. En esto último se concluye que en el horizonte superficial existe una mayor heterogeneidad en la forma y distribución de tamaños de poros del suelo, provocando una mayor dispersión; en ese horizonte también se observó una mayor conductividad hidráulica debido a la presencia de poros de mayor tamaño resultado del laboreo así como de la presencia de raíces de plantas a esa profundidad. La conductividad hidráulica decrece con la profundidad debido a la disminución de macroporos en el horizonte sub- superficial.



BIBLIOGRAFÍA

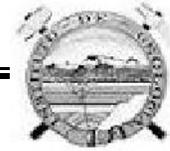
- Abu-Awwad A.M., 1996. Irrigation water management for onion trickle irrigated with saline drainage water, *Dirasat*, 23 (1) 46–55.
- Álvarez B. J., Muñoz C. R., 2005. Soil – water – solute process characterization: an integrated approach. CRC Press.
- British Geological Survey (BGS), Comisión Nacional del Agua (CNA), London School of Hygiene and Tropical Medicine (LSHTM), University of Birmingham (UB), 1998. Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo state, México, Final Report, Department for International Development, Comisión Nacional del Agua, British Geological Survey, London School of Hygiene and Tropical Medicine, University of Birmingham. Final Report. pp. 155.
- British Geological Survey (BGS), Comisión Nacional del Agua (CNA), 1995. Effects of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital valley, Hidalgo State, Mexico. Phase 1 Report – February 1995. BGS Technical Report WD/95/24.
- Bullock P., Newman A.C.D., Thomasson A.J., 1985. Porosity aspects of the regeneration of soil structure after compaction. *Soil Tillage Res.*, 5, pp. 325–341.
- Cervantes A. A., Armienta M.A., 2004. Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, México, *Geofísica Internacional* Vol. 43, Num. 3, pp. 477-493.
- Cifuentes E., Blumenthal U.J., Ruiz G., Bennett S., 1991. Health impact evaluation of wastewater use in Mexico. *Public Health Rev*;19:243-50
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición-2007. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Coster M., Chermant J.L., 1985. *Précis d'analyse d'images*. CNRS, Paris, France
- Del Arenal R., 1985. Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Univ. Nat. Autón. México, Ins. Geología, Revista*, vol. 6, núm. 1, pp. 86-97.
- Domínguez J.M., Schifter I., 1992. Las arcillas: el barro noble. . Fondo de Cultura Económica, 1992 96pp
- Donoso C. 1992. *Ecología Forestal: El Bosque y su Medio Ambiente*. Universidad Austral de Chile. Editorial Universitaria. Santiago. Chile.
- Dousset S., Thevenot M., Pot V., Šimunek J., Andreux F., 2007. Evaluating equilibrium and non- equilibrium transport of bromide and isoproturon in disturbed and undisturbed soil columns. *Journal of Contaminant Hydrology* 94, 261-276.
- FAO, 1963. Report on survey of the Lower Volta floodplain. Vol. II. Soil survey and classification. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.



-
- Friedel J., Langer T., Siebe C., Stahr K., 2000. Effects of long-term wastewater irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and activities in Central Mexico. *Biology and Fertility of Soils* 31:414-421.
 - Forrer I., Papritz A., Kasteel R., Flühler, H., Luca, F., 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 313–322.
 - Fournier L.L., Filgueira R.R., Sikora L.J., Rawls W.J., PAchepsky Y.A., superficie específica de un hapludult típico. Efectos de la aplicación de materia orgánica. *Ciencia del Suelo* 20 (2) 2002 pp.118-121
 - Gajardo P.J., 2005. Evaluación del crecimiento en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill sometidos a tres sistemas de riego: surco, microaspersión y goteo en el valle central de la VIII región (Mulchén). Universidad Católica de Temuco Facultad de ciencias agropecuarias y forestales departamento de ciencias forestales Temuco – Chile
 - Garza V., 2000. Reúso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez, (Chih., México). En el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública. *Revista salud pública y nutrición (RESPYN)*. Julio-Septiembre Volumen 1, numero 3.
 - Gibson R., Becerril E., Silva V., Jiménez B., 2007. Determination of acidic pharmaceuticals and potential endocrine disrupting compounds in wastewaters and spring waters by selective elution and analysis by gas chromatography–mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1169, 31–39.
 - Gutiérrez M. E., Siebe C., Sommer I., 1996. Effects of land application of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: A bibliographical review. *Environmental Reviews* 3, 318-330.
 - Gutiérrez S., Silva B., 1998. Aplicación de un modelo hidrogeoquímico en el valle del Mezquital, Hidalgo, Comisión Nacional del Agua, Gerencia nacional del agua, Gerencia regional de aguas del Valle de México, Gerencia Técnica.
 - Hallaire V., Curmi P., Widiatmaka, 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *E´tude et Gestion des Sols* 4, 115–126.
 - Helmer R., Hespanhol I., 1997. Water pollution control. A guide to the use of water quality management principles, PNUMA, CCAIS, OMS.
 - Hillel D. 2008. *Soil in the environment: crucible of terrestrial life*. Elsevier.307pp
 - Ismail, S.N.A., 1975. Micromorphometric Soil Porosity Characterization by Means of Electro-optical Image Analysis (Quantimet 720). Soil Survey Institute, Wageningen.
 - Jackson, D.R., Garrett, B.C. and Bishop, T.A., 1984. Comparison of batch and column methods for assessing the leachability of hazardous waste. *Environ. Science Technology*, 18: 666-673.



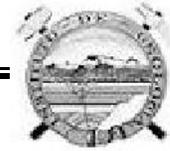
-
- James R.V., Rubin J., 1986. Transport of chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1142-1149.
 - Jiménez B., 1995. Wastewater reuse to increase soil productivity. *Wat. Sci. Tech.* 32, 173–180.
 - Jiménez B., Landa H., 1998. Physico-chemical and bacteriological characterization of wastewater from Mexico City. *Water Science and Technology*, Volume 37, Number 1, pp. 1-8(8).
 - Jiménez B., Chávez A., 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case, *Water Science and Technology*, 50(2):269-273.
 - Jury W.A., Gardner W.R., Gardner W.H., 1991. *Soil Physics*. Fifth Ed. John Wiley & Sons INC, New York, USA. 328 p.
 - Koskinen WC, Harper SS., 1990. *Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts, and Modeling*. Madison, Wisconsin, USA. pp. 51-101.
 - Leij F.J., van Genuchten M.Th., 1999. Principles of solute transport. En Skaggs RW, van Schilfhaarde J (Edit.). *Agricultural drainage, agronomy series*, No. 38. ASA, CSSA and SSSA Publ. Madison, Wisconsin, USA. pp. 331-359.
 - Lueneberg K., 2012. Dispersión de factores determinantes de resistencia a antibióticos en suelos del Valle de Mezquital, Hidalgo. Posgrado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Melamed R., Jurinak J.J., Dudley L. M., 1994. Anion Exclusion-Pore Water Velocity Interaction Affecting Transport of Bromine through an Oxisol *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1405–1410
 - Mohammad M.J., Mazahreh N., 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater, *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 34 (9 & 10) 1281–1294.
 - Müller K., Duwig C., Prado B., Siebe C., Hidalgo C., Etchevers J., 2012. Impact of long-term wastewater irrigation on sorption and transport of atrazine in Mexican agricultural soils. *J Environ Sci Health B.* 47(1):30-41.
 - Murphy C.P., Bullock P., Turner R.H., 1977. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. I. Principles and techniques. *J. Soil Sci.* 28, 498–508.
 - Nadeo J.R., Leoni A.J., 2002. Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos facultad regional la plata. U.T.N. / Facultad de Ingeniería U.N.L.P 62pp
 - Oades J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and soil* 76, 319- 337.



-
- Pallut C., 2000. Etude multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique et microbiologique d'un sol soumis à un apport de solutés: application à l'ammonium et au 2, 4-D Thèse Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1. 259p.
 - Porta J., López M., Roquero C., 2003. Edafología: para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. edición mundi – prensa
 - Prado B., 2006. Etude du mouvement de l'eau et du transfert réactif du nitrate dans les sols volcaniques du bassin versant élémentaire de la Loma, Mexique. Tesis Doctoral. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Francia. 231 p.
 - Prado, B., Duwig, C., Márquez, J., Delmas, P., Morales, P., Etchevers, J.D. 2009. Image Processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. *Agricultural Water Management*. 96(10) 1377-1386
 - Protz, R., Shipitalo, M.J., Mermut, A.R., Fox, C.A., 1987. Image analysis of soils— present and future. *Geoderma* 40, 115–125.
 - Raymundo E., 2008. parámetros de transporte de atrazina en un andosol y un vertisol de México, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
 - Richards LA (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1: 318- 333.
 - Ringrose A.J., 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant Soil* 183, 27–47.
 - Rose D. A., Abbas F., Adey M. A., 2009. The effect of surface–solute interactions on the transport of solutes through porous materials. *European Journal of Soil Science*. Volume 60, Issue 3, June, pages 398–411
 - Rowell, D. L. 1994. *Soil Science: methods and applications*. Longman Scientific & Technical, Harlow, England. 350 p
 - Rucks L., García F., Kaplán A., Ponce de León. J., Hill, M., 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de agronomía – Universidad de la República.
 - Rusan M.J.M., Hinnawi S., Rousan L., 2007. Long term effect of wastewater irrigation on soil and crop quality parameters. *Desalination* 215. 143-152
 - Schlichting E., 1986. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. Journal of plant nutrition and soil science, volume 149, issue 4, pages 492–499.
 - Siebe C., 1994. Akkumulation, Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in langjährig mit städtischen Abwässern bewässerten Böden in Zentralmexiko. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim.
 - Siebe C., Cifuentes E., 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in Central Mexico –An overview. *International journal of Environmental Health Research*. 5, 161-173.



-
- Siebe C., Fischer W., 1996. Adsorption of Pb, Cd, Cu and Zn by two soils of volcanic origin under long term irrigation with untreated sewage effluent in Central Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 159, 357 - 364.
 - Siebe C., 1998. Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use Manage.* 14, 119–122.
 - Siebe C., Jahn R., Stahr K., 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de los suelos en el campo. Segunda edición
 - Siemens J., Huschek G., Siebe C., Kaupenjohann M., 2008. Concentrations and Mobility of Human Pharmaceuticals in the World's Largest Wastewater Irrigation System, Mexico City-Mezquital Valley. *Water Research.* 42, 2124-2134
 - Sugita, F., Gillham, R.W., 1995. Pore scale variation in retardation factor as a cause of nonideal reactive breakthrough curves. 1. Conceptual model and its evaluation. *Water Resour. Res.* 31, 103–112.
 - Tan K.H., 1994. *Environmental Soil Science*. Marcel Dekker Inc. New York, USA. 304 p
 - Toride N, Leij FJ, van Genuchten MTh (1999) The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. USDA Publ., USA. 119 p.
 - USDA (US. Department of Agriculture), 1951. Soil survey manual. Washington, D.C., 593p. (USDA. Agricultural Handbook N° 18).
 - van Genuchten MTh, Wierenga PJ (1976) Mass transfer studies in sorbing porous media I. analytical solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 473-480.
 - Vázquez J., Tapias R., 2008. *Edafología y Climatología Forestal*. Departamento de Ciencias Agroforestales-Escuela Politécnica Superior-Universidad de Huelva.
 - Veeh R.H., Inskeep W.P., Roe F.L., Fergusson A.H., 1994. Transport of chlorosulfuron through soil columns. *J. Environ. Qual.* 23, 542-549.
 - Walker P.J.C., Trudgill T.S., 1983. Quantimet image analysis of soil pore geometry: comparison with travel break breakthrough curves. *Earth Surf. Process. Landforms* 8, 465–472.



Anexos

Tabla 1. Datos empleados para graficar la curva de retención de humedad.

Succión (pF)	2.0	2.5	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2
θ_v Superficial (%)	52.54	51.11	50.81	46.99	42.48	42.20	41.89
θ_v Sub-superficial (%)	37.32	36.98	35.17	33.50	32.79	30.92	29.11

Tabla 2. Tamaño y forma de poros del suelo superficial y sub-superficial.

Superficial					
	Tamaño de poro	Frecuencia	%	mm ²	%
	clase1	7	0.10	109.99	59.30
	clase2	155	2.22	31.49	16.98
	clase3	1120	16.01	29.61	15.96
	clase4	5715	81.68	14.39	7.76
Total		6997	100.00	185.48	100.00
	Forma de poros	Frecuencia	%	mm ²	%
	empaquetamiento	15	0.21	102.30	55.15
	fisura	128	1.83	21.12	11.39
	tubulares	6854	97.96	62.06	33.46
Total		6997	100.00	185.48	100.00
Sub-superficial					
	Tamaño de poro	Frecuencia	%	mm ²	%
	clase1	40	0.23	120.78	39.60
	clase2	370	2.10	92.48	30.33
	clase3	2272	12.88	59.80	19.61
	clase4	14959	84.80	31.92	10.47
Total		17641	100.00	304.97	100.00
	Forma de poros	Frecuencia	%	mm ²	%
	empaquetamiento	19	0.11	51.42	16.86
	fisura	217	1.23	82.41	27.02
	tubulares	17405	98.66	171.14	56.12
Total		17641	100.00	304.97	100.00



Tabla 3. Datos que se obtuvieron del experimento con las columnas de suelo intactas, donde se evaluó el movimiento del ^{18}O y el bromuro. Dichos datos se emplearon para graficar la curva de elución del suelo superficial.

Superficial			
Bromuro		^{18}O	
Volumen de poro	Br C/Co	Volumen de poro	^{18}O
0.00	0.00	0.00	0.00
0.24	0.02	0.35	0.01
0.28	0.04	0.42	0.08
0.31	0.09	0.49	0.28
0.35	0.15	0.63	0.39
0.38	0.27	0.80	0.37
0.42	0.34	0.87	0.33
0.45	0.40	1.08	0.23
0.49	0.43	1.22	0.18
0.56	0.47	1.70	0.10
0.59	0.49	1.84	0.08
0.66	0.45	1.98	0.07
0.73	0.42		
0.76	0.36		
0.80	0.30		
0.94	0.25		
1.01	0.22		
1.08	0.20		
1.18	0.17		
1.32	0.14		
1.42	0.12		
1.56	0.10		
1.84	0.08		
2.19	0.05		
2.40	0.04		
3.13	0.03		
3.58	0.02		
3.85	0.01		



Tabla 4. Datos que se obtuvieron del experimento con las columnas de suelo intactas, donde se evaluó el movimiento del ^{18}O y el bromuro. Dichos datos se emplearon para graficar la curva de elución del suelo sub - superficial.

Sup- superficial			
Bromuro		^{18}O	
Volumen de poro	C/Co	Volumen de poro	C/Co
0.00	0.00	0.00	0.00
0.17	0.01	0.47	0.04
0.40	0.05	0.96	0.36
0.55	0.20	1.12	0.40
0.71	0.34	1.37	0.37
0.91	0.40	1.81	0.19
0.99	0.40	2.29	0.07
1.14	0.37	3.30	0.01
1.27	0.32		
1.32	0.29		
1.40	0.25		
1.53	0.19		
1.73	0.11		
1.94	0.07		
2.32	0.02		
3.06	0.01		
3.77	0.01		



Tabla 5. Concentraciones (ppm) de aniones y cationes, detectados en los lixiviados de las columnas de suelo intactas durante el tiempo experimental para el suelo sub - superficial.

Iones (ppm)								
Volumen de poro	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
0.9	224.88	11.17	48.91	21.88	359.59		134.19	
1.4	198.81	14.86	67.86	31.69	452.73		19.95	
1.8	214.10	16.67	71.78	33.17	542.72		6.24	14.81
2.3	262.17	33.04	83.44	38.77	636.95			
2.6	295.39	21.21	91.93	42.70	689.45			
3.1	142.87	17.04	88.39	38.39	552.65		20.19	
3.5	120.07	14.60	134.94	49.45	637.33			
4.0	134.48	18.92	184.61	67.35	668.52			
4.3	129.87	19.88	189.35	69.18	690.01		17.41	
5.9	117.42	22.34	170.74	70.17	783.89			
6.4	100.33	20.04	157.25	65.47	595.32			
6.8	106.32	21.66	185.37	77.19	699.51			
7.3	120.97	22.02	195.66	81.80	732.88			
7.8	131.31	20.35	164.00	68.33	792.88			
8.2	99.93	16.08	159.79	66.96	702.40			
8.7	100.48	19.83	195.57	82.50	725.67			
9.1	75.82	19.56	174.11	75.69	729.84			
9.5	50.93	12.99	145.92	61.36	592.06			
9.9	36.77	10.39	153.89	52.15	460.38			
10.4	38.21	13.11	166.65	69.94	522.48			
10.8	27.39	10.70	160.79	57.86	535.88			
11.3	23.33	10.85	172.16	61.83	568.43			
11.7	19.84	11.90	180.96	68.17	608.55			
12.2	17.18	13.12	192.63	71.44	632.71			
12.7	26.96	27.47	210.09	83.86	619.84			
13.2	12.57	15.99	171.40	64.10	473.66			
13.6	12.10	35.94	133.21	47.46	420.95			
14.1	28.21	24.51	611.62	199.53	343.05	2252.22		
14.5	11.84	12.63	253.72	80.18	457.91	395.88		
15.0	9.41	8.55	154.51	46.59	424.70	104.50		
15.5	9.50	7.51	140.15	39.93	433.13			
16.1	8.83	7.32	132.27	36.11	399.01			
16.7	9.27	9.60	160.18	42.21	429.80			
17.2	11.49	12.37	181.75	45.77	439.62			
17.7	9.91	15.58	186.47	45.74	518.87			
18.2	10.92	19.89	202.27	48.34	483.54			
18.6	7.39	20.82	193.35	44.55	528.09			
19.0	10.20	33.21	230.50	58.54	562.29			
19.4	10.05	29.76	219.94	46.50	539.22			
20.0	12.54	39.16	228.43	50.47	543.29			



Tabla 6. Concentraciones (ppm) de aniones y cationes, detectados en los lixiviados de las columnas de suelo intactas durante el tiempo experimental para el suelo superficial.

Iones (ppm)							
Volumen de poro	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻
2.4	196.0	30.2	175.6	58.6	740.4		100.7
2.8	225.6	21.2	143.1	56.8	749.1		109.1
3.2	222.4	23.1	142.9	52.8	751.4		
3.6	220.7	23.5	148.5	59.6	797.1		
4.1	189.8	23.2	157.1	61.9	800.6		
4.5	183.2	26.4	178.2	70.1	821.6		
4.9	140.6	25.4	185.9	73.4	783.8		
5.3	108.1	26.7	185.8	74.5	719.7		
5.8	90.0	26.0	206.9	82.0	748.7		
6.2	65.3	102.3	540.0	173.0	715.7	2617.2	
6.6	53.9	97.9	343.7	91.9	714.1	850.4	
7.0	45.1	85.8	320.5	75.7	727.2	505.5	
7.4	40.2	81.4	295.1	58.5	738.7	223.1	
7.8	35.3	96.4	269.7	60.3	740.6	91.4	
8.3	46.7	94.8	258.2	43.3	717.1	17.0	26.2
8.7	36.2	70.0	271.4	59.0	735.3	11.3	
9.1	26.5	77.1	259.9	40.9	721.8		
9.5	39.9	87.1	291.7	36.9	750.1		
10.0	39.3	85.4	300.0	35.4	755.3		