
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA



*Caracterización Espectroscópica de
Materia Orgánica procedente de suelo
de San Rafael, Estado de México*

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G O
P R E S E N T A :
JOSÉ ALFREDO OLIVARES ALEGRÍA

DIRECTOR: M en C. A. Lourdes Castillo Granada

Marzo de 2009



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.

DEDICATORIA

A mi esposa

Diana Miroslava, te amo, gracias por compartir tu vida con la mía y por tu apoyo incondicional.

A mis hijas

Irlanda (mi morita), gracias por enseñarme que a pesar de la adversidad se puede seguir adelante, por tus ganas de vivir y por hacer de lo ordinario algo extraordinario, te amo.

Camila (mi bebé loco) que has traído alegría a nuestras vidas, por transmitir tu energía y darnos ánimos de seguir adelante, te amo.

A mis padres

Alfredo y Eufracia quienes me han dado amor, cariño y su apoyo total.

A mis hermanos

Guadalupe, Jesús y Agustín, por su apoyo incondicional y por hacer que la vida sea más placentera a su lado, los quiero.

A mis sobrinos

Anahí, Alexis, Cristhian, Paul, Ulises, Daniel, Samantha, Denisse, Michelle y Uriel; les deseo éxito en las metas que se propongan, los quiero.

A José Pérez, gracias por tu apoyo en todo momento.

A Marco Antonio, chamaco irreverente sigue con tus sueños y seguirás creciendo, te quiero.

AGRADECIMIENTOS

A la M. en C.A. Lourdes Castillo Granada por su amistad, por su apoyo en la elaboración de éste trabajo, por sus consejos, sugerencias y sobre todo por su tiempo.

A la Biol. Maricela Arteaga Mejía, por su amistad y por la dedicación puesta en el presente trabajo para que llegara a buen término.

A los miembros del Jurado:

Biol. Elvia García Santos

M. en C. Efraín Ángeles Cervantes

Dr. Gerardo Cruz Flores

Gracias por su tiempo y sugerencias para lograr un buen trabajo de tesis.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y en especial a la Carrera de Biología.

A mis compañeros y amigos.

ÍNDICE

	Pág.
1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	6
3. MARCO TEÓRICO	7
4. ÁREA DE ESTUDIO	26
5. HIPÓTESIS	34
6. OBJETIVOS	35
7. METODOLOGÍA	36
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
9. CONCLUSIONES	66
10. LITERATURA CITADA	68
ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.	
1	Ubicación Tlalmanalco, estado de México	27
2	Microlocalización del área de estudio	27
3	Clima área de estudio	28
4	Fisiografía área de estudio	29
5	Hidrología superficial área de estudio	31
6	Geología área de estudio	32
7	Edafología área de estudio	33
8	Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino (BP)	38
9	Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino – Encino (BPE)	39
10	Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades: San Juan Parcela (SJP)	40
11	Espectros comparativos de la extracción con hexano en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona	42
12	Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino (BP)	43
13	Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino – Encino (BPE)	44
14	Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: San Juan Parcela (SJP)	45
15	Espectros comparativos de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona	47
16	Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino (BP)	49
17	Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino – Encino (BPE)	51
18	Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: San Juan Parcela (SJP)	53
19	Espectros comparativos de ácidos húmicos en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona	55
20	Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino (BP)	56
21	Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino – Encino (BPE)	57
22	Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: San Juan Parcela (SJP)	58
23	Espectros comparativos de ácidos fúlvicos en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona	59

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
24	Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de Bosque de Pino	61
25	Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de Bosque de Pino-Encino	63
26	Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de Zona Agrícola	64

ÍNDICE DE CUADROS

		Pág.
1	Propiedades generales del humus	13
2	Grupos núcleo de las sustancias húmicas	20
3	Grupos funcionales externos	21
4	Regiones del infrarrojo e intervalos	22
5	Número de onda y designación de señal para grupos funcionales	24
6	Coordenadas geográficas de Tlalmanalco	26
7	Parámetros edáficos evaluados	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A	Método de extracción secuencial de materia orgánica y fracciones de suelo	72
Anexo B	Determinación de la textura del suelo, análisis del Boyoucos	74
Anexo C	Determinación del pH	75
Anexo D	Determinación materia orgánica, método de Walkley y Black	76
Anexo E	Determinación del Carbón Orgánico Total	77

1. RESUMEN

La NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo del 2005, define al suelo como el material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

El suelo sirve como medio de crecimiento para diversos organismos, mantiene complejas interacciones dinámicas con la atmósfera y los estratos que se encuentran por debajo de él, permitiendo el mantenimiento de los servicios ambientales de los ecosistemas e influyendo en el clima y el ciclo hidrológico (SEMARNAT, 2005).

En el presente trabajo se realizó la extracción secuencial de materia orgánica proveniente de tres sitios de muestreo a cuatro profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm), para la extracción secuencial de la materia orgánica se adaptó el método propuesto por Schnitzer y Schuppli (1989).

Se eligió un área forestal constituida por comunidades de Bosque de Pino (BP) y Bosque de Pino-Encino (BPE), así mismo se eligió un área agrícola denominada San Juan Parcela (SJP); dichas zonas se ubican en Tlalmanalco, estado de México.

Una vez realizada la extracción secuencial de la materia orgánica se obtuvieron los espectros correspondientes a través de espectroscopia en el infrarrojo para las muestras de suelo provenientes del Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino y para San Juan Parcela a sus diferentes profundidades; una vez obtenidos los espectros se les asignó los grupos funcionales de acuerdo a las señales identificadas en cada espectro y posteriormente se realizó la comparación entre dichas zonas

Se evaluó la materia orgánica, carbón orgánico total, textura y pH para las muestras obtenidas a sus diferentes profundidades.

Se observó que existe una disminución en las señales obtenidas tanto para ácidos húmicos y ácidos fúlvicos respecto a la profundidad para las tres zonas de estudio, lo cual se confirmó con los resultados obtenidos para materia orgánica y carbón orgánico total; Sin embargo, los grupos funcionales siguen siendo los mismos para las cuatro profundidades.

El análisis de los espectros IR de los ácidos húmicos provenientes de la zona SJP, muestra una presencia de grupos poco oxidados (-OH de polisacáridos), respecto a los ácidos húmicos provenientes de las zonas de PB y BPE.

Los ácidos fúlvicos muestran señales que disminuyen en el BP y BPE debido a la presencia de grupos fenol. Se observó que hay un aumento de las señales en la muestra de SJP lo que nos indica una mayor esterificación de los alcoholes y fenoles de bajo peso molecular.

Se observó que el contenido de MO y de COT es más alto para las muestras provenientes del BP y BPE; mientras que el contenido en la muestra proveniente de SJP es menor debido a que esta zona al estar desprovista de vegetación y en una constante labor de cultivo los procesos de humificación son mínimos.

Palabras Clave: Materia Orgánica, Ácidos Húmicos, Ácidos Fúlvicos, Espectroscopia en el Infrarrojo.

2. INTRODUCCIÓN

Los suelos constituyen uno de los recursos naturales que se caracterizan por su gran heterogeneidad, lo que les posibilita cumplir con una diversidad de funciones vitales para el sostenimiento de los ecosistemas y de la vida humana. El suelo es reconocido como sostén y sustento de cultivos y bosques, como medio que posibilita el filtrado del agua y su recarga, como soporte de la biodiversidad, y en general, como patrimonio nacional (Cotler *et al.*, 2007).

El término suelo se deriva de la palabra latina *solum*, que significa piso. Se define como la capa superior de la tierra, que puede ser cavada, arada, etc.; específicamente como la capa superior, en la que las plantas crecen.

El suelo es un complejo a causa de la gran variedad de su composición física y química. Está formado a partir de masas de rocas parcialmente meteorizadas, y minerales de la corteza terrestre.

Todas las rocas y minerales de la corteza terrestre proceden de minerales primarios, que fueron el resultado del enfriamiento y cristalización de masas en fusión. Los minerales primarios contienen todos los elementos químicos, que las plantas captan del suelo, a excepción del nitrógeno (Thompson, 1978).

El suelo puede ser definido también como una mezcla de materia mineral, materia orgánica, agua y aire (Foth, 1980).

Según la recomendación de la *Soil Science Society of America*, la materia orgánica del suelo (MOS) se define en los términos siguientes: «Es la fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en los suelos y sustancias producidas y resintetizadas por los habitantes del suelo». Esta fracción se determina en general en suelos que pasan por un tamiz con maya de 2 mm (Fassbender, 1987). La composición de los ácidos húmosos varía en dependencia del tipo de suelo pero también respecto de la forma de extracción y fraccionamiento. El estudio de las propiedades químicas de la fracción húmica y fúlvica se suele realizar después de su fraccionamiento, que se basa en las distintas solubilidades en ácidos y álcalis.

3. MARCO TEÓRICO

El suelo se ha formado por meteorización de rocas y minerales y la acumulación de materia orgánica. Los minerales, se pueden encontrar en el suelo, y su distribución en la superficie de la tierra de forma muy variable. Estos diferentes minerales se diferencian en composición química y en su velocidad de meteorización. La materia mineral varía en el tamaño de partícula y en composición química.

La variación de las partículas afecta a la capacidad de retención de agua, la aireación del suelo y otras propiedades físicas (Thompson, 1978).

La fracción orgánica del suelo consiste en organismos vivos, plantas secas y residuos de origen animal. Esta porción orgánica es la fracción químicamente más activa, que almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, regula los cambios de pH, propicia también las relaciones convenientes entre aire y agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbón.

Los microorganismos y las raíces comprenden un porcentaje pequeño en masa de la MOS total (Bohn *et al.*, 1993).

La descomposición de la MOS se efectúa esencialmente por dos clases de procesos microbianos:

- La humificación que aporta la producción de nuevos compuestos orgánicos englobados bajo la designación general del humus.
- La mineralización que consiste en una liberación en forma de moléculas inorgánicas o de iones (H_2O , CO_2 , NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) de los elementos incorporados primitivamente a la materia orgánica de origen.

El fenómeno de la descomposición reviste, en la vida del suelo una importancia prioritaria ya que el humus ejerce una profunda influencia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas (Gaucher, 1971).

Los factores que intervienen en la formación del suelo determinan el contenido de la MOS; según Jenny citado en Bohn *et al.*, 1993, el orden relativo de importancia de los factores que determinan el contenido de materia orgánica de los suelos con drenaje adecuado son: clima > vegetación > topografía > roca madre > edad.

El clima desempeña una función importante en la determinación del contenido de la MOS debido a que ejerce una enorme influencia en la distribución del tipo de plantas, sustancias producidas por las plantas y la intensidad de la actividad microbiana. También ejerce influencia sobre la cantidad total de residuos que vuelven al suelo cada año y su velocidad de descomposición.

El efecto de la topografía en la formación del suelo está condicionado por el efecto de la humedad. Un suelo en una pendiente pronunciada presenta mucho desbordamiento provocado por las aguas, quedando poca humedad para las plantas. El suelo de una pendiente tiene menos profundidad, ya que el desarrollo de las raíces está limitado por la ausencia de agua. El suelo de una pendiente muy pronunciada tiene más aireación, es más templado y la materia orgánica se descompone más rápidamente. En consecuencia, el contenido de materia orgánica en las pendientes es menor que en las zonas llanas, siendo iguales los demás factores. El contenido en MOS situado en una zona de depresión es mayor, ya que allí la vegetación es más abundante y la velocidad de descomposición más lenta.

El efecto del material primario en la MOS es muy importante y en gran parte depende de la vegetación que allí se desarrollará. A este respecto, la adición mineral es el factor principal.

En general, habrá más MOS con más materia mineral (Thompson, 1978).

La roca madre determina el contenido de la MOS principalmente a través en su efecto en la textura del suelo. En una zona de clima y topografía similares el contenido de la MOS tiende a incrementarse con el contenido de arcilla, esta fuerte interacción entre las arcillas y la materia orgánica también hace resaltar los efectos de la MOS en las propiedades físicas y químicas del suelo (Bohn *et al.*, 1993).

También, tiende a haber una correlación entre el contenido de arcillas del suelo y el contenido de materia orgánica. Mientras mayor es el suministro combinado de agua y nutrientes se favorece la producción y acumulación de más materia orgánica en los suelos de textura más fina (Foth, 1972).

Para comprender el factor tiempo respecto a la historia de la acumulación de la materia orgánica se consideran cinco fases:

- Acumulación gradual del nitrógeno suficiente para dar lugar a vegetación.
- Posiblemente una aceleración en la velocidad de acumulación de materia orgánica, debido a la mayor cantidad de nitrógeno y otros elementos.
- Disminución de la acumulación anual de materia orgánica.
- Fase de equilibrio de la madurez permaneciendo constante la cantidad de materia orgánica.
- Disminución gradual del contenido de materia orgánica alcanzando ya el estado de madurez (Thompson, 1978).

La materia orgánica recientemente mezclada en el suelo tiene la misma composición que los vegetales, pero con un grado inferior de hidratación; esta constituida por una mezcla de hidratos de carbono y proteínas en la cual el porcentaje de carbono es superior al de nitrógeno (Gaucher, 1971).

La descomposición de la MOS implica la oxidación del carbono por organismos heterótrofos que emplean la energía de la oxidación en su metabolismo. A medida que la materia orgánica se convierte en partículas finamente divididas también decrece el tamaño de los organismos que propician su descomposición, la cual continua mientras el oxígeno, agua, temperatura y los niveles de nutrientes sean los indicados para los organismos que la descomponen (Bohn *et. al.*, 1993).

En la formación de humus a partir de los residuos vegetales, hay una rápida reducción de los constituyentes solubles en agua, de las celulosas y de las hemicélulosas (Foth, 1972).

Las sustancias húmicas constituyen aproximadamente el 60 % de la materia orgánica (Muscolo, *et al*; 2007).

El humus es una mezcla de compuestos complejos y no un material único. Esto nos lleva a la siguiente definición; el humus es una mezcla compleja resistente, de sustancias oscuras o negras, amorfas y coloidales que se han modificado a partir de los tejidos originarios o han sido sintetizados por los organismos del suelo (Buckman y Brady, 1982).

El humus es algo tan polifacético y tan intangible que se hace difícil de definir. La definición se ha hecho desde el punto de vista de su origen y de sus diferencias con otros compuestos orgánicos que llegan al suelo, pero a un nivel de generalización tal que no excluya radicalmente al llamado humus bruto ya que se considera también parte del humus.

El humus es el conjunto de los productos orgánicos, estables y finales del proceso de transformación de los compuestos vegetales y animales que llegan al suelo (proceso de humificación), su existencia es inherente a todos los suelos su calidad y cantidad dependen de factores edafogénicos; su existencia influye fuertemente en la fertilidad y en los procesos edafogénicos de los suelos. Las sustancias húmicas son de alto peso molecular y son generalmente ácidas (Nardo *et. al.*, 2005).

El humus se diferencia substancialmente de los compuestos orgánicos que le dieron origen:

- Prácticamente no posee moléculas pequeñas libres, fácilmente metabolizables por los microorganismos.
- Posee un grado mayor de carbonización y un contenido menor de oxígeno, lo que se traduce en una menor entropía (contiene mayor cantidad de nitrógeno).
- Las macromoléculas que lo componen a pesar de ser semejantes nunca son idénticas, ni en ellas se repiten ordenadamente las mismas estructuras.
- Tiene grupos carboxilos e hidroxilos que le confieren características ácidas, pudiendo intercambiar bases con el medio, casi carece de grupos metoxilos.
- El humus en su conjunto y sus fracciones principales poseen color oscuro, en el espectro visible, la densidad óptica disminuye sistemáticamente al aumentar la longitud de onda (Duchafour, 1984).

El humus difícilmente puede ser definido químicamente. La evolución del humus corresponde a un proceso continuo de creación y de destrucción; es igualmente una mezcla de compuestos orgánicos ternarios (C, H, O) y sobre todo cuaternarios (C, H, O, N) englobando en sus moléculas o fijando sobre los elementos minerales tales como el Fe, S, P, K, Ca, Na, Mg, etc.

Químicamente estos fenómenos de humificación pueden reducirse a:

- Simplificaciones o degradaciones de moléculas acompañadas generalmente de oxidaciones.
- Las polimerizaciones y condensaciones progresivas de moléculas colindantes con la formación de gruesas moléculas de compuestos insolubles cíclicos (ácidos húmicos, quinonas, polifenoles) o en cadena (poliurónidos) a partir de compuestos con pequeñas moléculas cíclicas solubles como los polifenoles o en cadena como los sacáridos.
- La síntesis de sustancias orgánicas, resultante de la multiplicación de los microorganismos y de un reciclaje de su materia protoplásmica (bacterias, hongos) (Gaucher, 1971).

Tipos de humificación

Humificación biológica

Es el proceso que caracteriza a los suelos ricos en bases que gozan de buena aireación, presencia de lombrices, pH elevado y actividad microbiológica alta; suelos que, por otro lado permiten un ciclo biológico rápido con mineralización activa de precursores hidrocarbonados y nitrogenados, según la ecología del suelo, la humificación biológica se caracteriza por la degradación activa de la lignina y/o celulosa.

Humificación abiológica

Es el mecanismo de humificación que se presenta cuando la actividad biológica disminuye motivada por un factor ecológico (vegetación ácida), local (hidromorfismo), o geológico (roca madre muy ácida). La insuficiencia tanto de bases como de oxígeno modera los procesos biológicos, y provoca la acumulación de una gruesa capa de materia orgánica poco evolucionada.

Este tipo de humificación es muy lento y produce sustancias poco polimerizadas y solubles en agua (Cepeda, 1991).

Propiedades físicas del humus

La materia orgánica aumenta la porosidad del suelo y por lo mismo su capacidad para que el agua tienda a reducir la evaporación, aumenta la permeabilidad y actúa como un buen regulador de la humedad del suelo.

La materia orgánica contribuye a aglomerar las partículas del suelo y a favorecer la formación de agregados de mediano y pequeño tamaño que mejor convienen a las plantas cultivadas.

Finalmente tiende a limitar el fenómeno de contracción y el agrietado del suelo (Gaucher, 1971).

Estas propiedades dan cuerpo y cohesión a los suelos demasiado ligeros, mientras que suaviza las tierras pesadas; aumenta la permeabilidad al aire y al agua y favorece la circulación dentro del suelo, al que hace más mullido y más aireado.

Propiedades químicas del humus

Como la arcilla, el humus tiene la propiedad de fijar los cationes indispensables para la nutrición vegetal (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y también NH_4^+) y de liberarlos de acuerdo a las necesidades de las plantas, aumenta el poder fijador del suelo y su capacidad de intercambio (Gaucher, 1971).

La mayor parte de las propiedades electroquímicas del humus han sido determinadas en ácidos húmicos, pues estos son mucho más fáciles técnicamente.

El humus en los suelos retiene cationes metálicos di- y trivalentes (Ca, Mg, Fe, Cu, Zn) muchos más que los cationes metálicos alcalinos (Na, K). Se ha demostrado que podría retener el Mn enérgicamente y que este podría ser desplazado por otros iones metálicos con fuerza creciente según el orden, Ni, Co, Cu y Zn (Russell, 1968).

Propiedades biológicas del humus

La materia orgánica es realmente el soporte de la vida del suelo; asegura la actividad biológica dando a los microorganismos y a los animales de la microfauna su alimentación y por su oxidación la energía vital.

Por otra parte, los “microconstituyentes” del humus actúan como factores de crecimiento o como sustancias rizógenas, y ejercen una acción estimulante sobre las raicillas.

Finalmente, el humus contribuye en gran parte a imponer al suelo su coloración. Sólo puede darle tintes oscuros, negruzcos, grisáceos o pardo-oscuro (Gaucher, 1971).

Constitución coloidal del humus

El humus es prácticamente insoluble en agua, aunque una parte puede formar una suspensión coloidal. Es soluble en gran cantidad en álcalis diluidos y algunos de sus constituyentes se pueden disolver en soluciones ácidas (Foth, 1972)

El humus del suelo, esta organizado casi en igual forma que la arcilla; la lignina modificada, los poliurónidos, las proteínas-arcillosas, y sin duda otros constituyentes funcionan también como micelas complejas. Bajo condiciones ordinarias éstas llevan innumerables cargas negativas pero en lugar de estar constituidas principalmente de Si, O, Al y Fe, como los cristales silícicos, las micelas húmicas están compuestas de C, H, O, N, S y P así como de otros elementos. Las cargas negativas proceden de los grupos -COOH y -OH, de los cuales el H ácido puede ser reemplazado por intercambio catiónico (Buckman y Brady, 1982).

En la Cuadro 1 se muestran las propiedades generales del humus.

Cuadro 1 Propiedades generales del humus

Propiedad	Observaciones	Efectos en el suelo
Color	El color oscuro típico de muchos suelos lo origina la materia orgánica.	Puede facilitar el calentamiento.
Retención de agua	La materia orgánica puede retener hasta veinte veces su peso de agua.	Ayuda a evitar la desecación y la contracción, mejora la retención de la humedad en los suelos arenosos.
Combinación con minerales arcillosos	Enlaza las partículas del suelo en unidades estructurales llamadas agregados.	Permite el intercambio de gas; estabiliza la estructura; incrementa la permeabilidad.
Quelación	Forma complejos estables con Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , y otros cationes polivalentes.	Amortigua el aprovechamiento de elementos traza que son capturados por las plantas.

FUENTE: Bohn *et al.*, 1993.

Cuadro 1 Propiedades generales del humus (continuación)

Propiedad	Observaciones	Efectos en el suelo
Solubilidad en agua	La insolubilidad de la materia orgánica es el resultado parcial de su asociación con la arcilla; las sales de cationes di y tri valentes en combinación con la materia orgánica también son insolubles; la materia orgánica aislada es parcialmente soluble en agua.	La materia orgánica en pequeñas cantidades se pierde por lixiviación.
Relaciones con el pH	La materia orgánica del suelo amortigua el pH del suelo en los límites entre ligeramente ácido, neutralidad y alcalino.	Ayuda a mantener una reacción uniforme (pH) en el suelo.
Intercambio catiónico	La acidez total de las fracciones aisladas de humus varía entre 3 000 y 14 000 moles Kg ⁻¹ .	Incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo del 20 % a 79 % de la CIC de muchos suelos se debe a la materia orgánica.
Mineralización	La descomposición de la materia orgánica produce CO ₂ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ y SO ₄ ²⁻ .	Fuente de elementos nutritivos para el crecimiento de las plantas.
Combinación con moléculas orgánicas	Influye en la bioactividad, persistencia y biodegradabilidad de los plaguicidas.	Modifica la relación de aplicación de los plaguicidas para un control efectivo.

FUENTE: Bohn *et al.*, 1993.

Tipos de humus

1. *Mull Cálculo*: Es el humus alcalino de los medios cálcicos bajo clima templado o subárido (estepa), es rico en ácidos húmicos de síntesis muy polimerizados y de gruesas moléculas, en las que predomina el nitrógeno heterocíclico, fuertemente coagulado en grupos por los iones Ca²⁺ y en compuestos urónicos. Este humus se forma al mismo tiempo que la roca madre calcárea.

El pH oscila de 7 a 8,5, la relación C/N está próxima a 10, el índice de saturación es elevado cercano a 100. La coloración es oscura; negra, pardo negruzca o gris negra.

Se distinguen los principales subtipos siguientes:

- Mull cálcico forestal (mull rendzina).
- Mull de los prados calcáreos
- Humus de las estepas de climas semiáridos.
- Mull-moder (suelos calcáreos de montaña).

2. *Mull forestal o humus dulce*: Se forma en suelos no calcáreos, pero de complejo absorbente saturado de calcio y ricos en bases, en condiciones medias de temperatura, suficientes desde el punto de vista de humedad y con una insolación tamizada.

El pH es ligeramente ácido: de 5,5 a 6,5; la relación C/N es inferior a 20, oscila generalmente entre 12 y 15. Este humus está saturado en la mayor parte de Ca^{2+} y parcialmente de H^+ . La humificación es rápida.

3. *Moder o amphimull*: Es un término intermedio entre los tipos precedente y el siguiente. Si el mull se encuentra en condiciones de acidez más marcada y el ritmo de la humificación es más lento, se comprueba la aparición de procesos que caracterizan el moder: destrucción de los agregados, complejión de sales de hierro, puesta en marcha de lavado.

Se produce en los suelos forestales que empiezan a degradarse, su pH es inferior a 5 y puede descender hasta 4, la relación C/N varía de 15 a 25, el porcentaje de saturación de cationes es débil, la humificación es bastante lenta.

4. *Mor o humus bruto*: Es el humus de los medios ácidos y de tendencia anaerobia. Esta constituido por una importante proporción de compuestos fúlvicos solubles, de complejos de compuestos húmicos y de lignina, pobres en nitrógeno y difícilmente floculables. La humificación es lenta.

El pH siempre es inferior a 5, está comprendido generalmente entre 4 y 3,5; la relación C/N, francamente superior a 20, varía con lo horizontes. El porcentaje de saturación es muy bajo, igual o inferior a 10.

El mor se forma en rocas madres ácidas o muy pobres en bases o en suelos húmedos, constituyendo un medio anaerobio en climas fríos, muy húmedos, o muy secos, a partir de residuos vegetales lignificados de descomposición difícil.

5. *Las turbas*: Son sustancias húmicas producidas por la descomposición de vegetales en medio inundado: la base del vegetal se pudre en el agua, mientras continúa creciendo por sus partes aéreas, hundiéndose estas progresivamente bajo el agua para pudrirse a su vez (Gaucher, 1971).

Componentes orgánicos del humus

El humus es complejo y variable. En la materia orgánica del suelo pueden identificarse un gran número de compuestos orgánicos, pero en todo caso, tales compuestos identificados apenas constituyen el 10 % o el 15 % de su peso total.

La mayoría de los compuestos identificables se descomponen con demasiada facilidad para poderlos considerar humus (Stevenson, 1994).

Las sustancias húmicas se encuentran ordenadas en los siguientes grupos:



Ácidos húmicos

A este grupo pertenecen aquellas sustancias que pueden ser extraídas del suelo con soluciones débiles de NaOH, NH₄OH, NaHCO₃, etc y precipitan en forma de sustancias oscuras, al ser acidulado el extracto que contiene ácidos inorgánicos (HCl, H₂SO₄).

Los ácidos húmicos contienen de 3,5 % a 5,0 % de nitrógeno siendo esta la parte constitucional de la molécula. Durante su hidrólisis ácida la mitad del nitrógeno contenido se transforma en solución. Estas sustancias nitrogenadas se componen de amidas, mono y diaminoácidos.

Algunos investigadores han confirmado la presencia de compuestos aromáticos de origen diverso en la molécula de humus. Entre los productos de oxidación se han extraído fenoles, quinonas y ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales, al parecer, son productos derivados de la desintegración de los anillos bencénicos.

Los grupos funcionales de los ácidos húmicos son los siguientes:

- Grupos carboxilo: $-\text{COOH}$. Son característicos de los ácidos orgánicos. El átomo de hidrógeno en el grupo funcional: $\text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{H}$, al ionizarse deja en anión carboxilato: $\text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{O}^-$, cargado negativamente, capaz de interactuar con los cationes.
- Grupos hidróxilo fenólicos: , el H del ion hidróxilo fenólico es un ácido más débil que el grupo funcional de los ácidos carboxílicos, presenta una ligera tendencia a ionizarse, dejando el anión correspondiente el cuál es un sitio cargado negativamente .
- Grupo amina: $-\text{NH}_2$. El nitrógeno suele integrarse a las estructuras orgánicas con tres enlaces covalentes unidos a átomos de carbono e hidrógeno (Cepeda, 1991).

Ácidos fúlvicos

Los primeros conocimientos sobre los ácidos crénico ($\text{C}_{24}\text{H}_{24}\text{O}_{16}$) y apocrénico ($\text{C}_{24}\text{H}_{12}\text{O}_{12}$) o ácidos fúlvicos se deben a las investigaciones realizadas en la primera mitad del siglo XIX por el científico sueco Berzelius. El ácido crénico tiene un color amarillo claro y cuando se oxida en el aire forma una coloración pardo oscuro transformándose de esta manera en una sustancia poco soluble, clasificado como ácido apocrénico. Los estudios realizados por los suecos Berzelius y Mulder y por el ruso German, comprobaron que los ácidos crénicos y apocrénicos contienen menos carbono (44 % - 49 %) y más oxígeno que los ácidos húmicos. Estos ácidos destruyen rápidamente la fase mineral del suelo y, en particular los minerales de silicato.

Los ácidos fúlvicos tienen alta capacidad de intercambio catiónico de hasta 700 mg equivalentes a 10 g de sustancia. Estos, por su composición química son similares a los ácidos húmicos y contienen grupos carboxilo, metoxilos e hidróxidos fenólicos, los cuales determinan las reacciones de intercambio iónico.

Al igual que los ácidos húmicos, los fúlvicos contienen nitrógeno; y al ser hidrolizados con el HCl 6N, casi un 20 % a un 30 % de nitrógeno total pasa a la solución en forma de aminoácidos. Contienen, además aminoazúcares y, posiblemente sustancias reductoras en mayor cantidad que los ácidos húmicos (Cepeda, 1991).

Huminas

Al grupo de sustancias húmicas que no son extraídas del suelo con soluciones alcalinas se les denomina huminas. Debido a que este grupo de sustancias ocupa una posición intermedia entre los ácidos húmicos y el carbón, Springel lo llamó carbón húmico. Más tarde Berzelius cambió dicho término por humina ($C_{40}H_{30}O_{15}$) y Mulder, por su parte, dio el nombre de ulmina ($C_{40}H_{32}O_{11}$) a la forma insoluble del ácido úlmico. Las huminas están compuestas por sustancias vegetales de humificación incompleta (Cepeda, 1991).

Ácidos himatomelánicos.

Las sustancias extraídas con alcohol del gel bruto de ácido húmico, se denominan ácidos himatomelánicos. Estos presentan una coloración chocolate pardo que con el agua forman suspensiones y soluciones coloidales, pero que con el alcohol disoluciones puras. Según un gran número de investigadores, los ácidos himatomelánicos representan una mezcla de sustancias oxidadas y reducidas derivados de los ácidos húmicos (Cepeda, 1991).

Los componentes de la materia orgánica del suelo «huminas, ácidos húmicos, fúlvicos e himatomelánicos» son, al parecer ya sustancias de distinto grado de madurez o ya derivados de los productos humificados (Stevenson, 1994).

Extracción secuencial de materia orgánica

La composición de los ácidos humosos varía en dependencia del tipo de suelo pero también respecto de la forma de extracción y fraccionamiento. Los ácidos fúlvicos están más oxidados y menos carbonizados que los húmicos.

Se puede considerar que los ácidos humosos están compuestos por tres elementos fundamentales: núcleo, cadenas alifáticas laterales y grupos funcionales periféricos; por tanto, si los ácidos humosos son sometidos a la acción de una hidrólisis ácida la cual destruye los enlaces péptido y glucocidos se atacará con una cierta selectividad a esta parte de la macromolécula, la hidrólisis ácida (2 % HCl) de estos compuestos produce aminoácidos, carbohidratos (hexosas, pentosas, ácidos urónicos, aminoazúcares), compuestos cíclicos nitrogenados, ácidos grasos, entre otros.

La hidrólisis alcalina destruye también el núcleo de la macromolécula y en la solución aparecen, además de los compuestos antes citados una gran cantidad de compuestos cíclicos aromáticos. Estos compuestos, que predominan en el núcleo son hidrófobos, y transmiten esta propiedad al mismo. Por esta causa el núcleo se encuentra condensado ya que tiende a reducir su superficie de contacto con el medio acuoso adoptando la forma esférica.

Los ácidos humosos se pueden separar en fracciones mediante métodos químicos (sedimentación escalonada) o fisicoquímico (Gelfiltración, eletroforésis, etc), estableciéndose una cadena de fracciones a lo largo de la cual las propiedades de los ácidos humosos que la constituyen van variando paulatinamente.

A pesar de que los métodos de separación tienen principios distintos, o sea, separan a las macromoléculas, según distintas propiedades de las mismas, las fracciones obtenidas por los distintos métodos guardan relación.

Los ácidos humosos están más carbonizados y absorben más radiación electromagnética de $1600,0 \text{ cm}^{-1}$ de longitud lo cual indica una gran riqueza en sus dobles enlaces fenólicos; en cambio los ácidos humosos menores absorben con más intensidad la radiación de $1010,0 \text{ cm}^{-1}$ y $1388,0 \text{ cm}^{-1}$, correspondiente al umbral de excitación de los enlaces C=O, C-OH y -CH- los cuales se encuentran más frecuentemente en los compuestos constituyentes de las cadena alifáticas (Duchaufour, 1984).

Del procedimiento clásico de extracción alcalina de muestras de suelo se producen tres fracciones: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (MacCarthy, 2001). Donde los ácidos húmicos constituyen 3 % a 4 % de cenizas en materia orgánica absolutamente seca, mientras que los ácidos fúlvicos de 7 % a 10 % (Kononova, 1982).

El estudio de las propiedades químicas de la fracción húmica se suele realizar después de su fraccionamiento, que se basa en las distintas solubilidades en ácidos y álcalis (Porta *et al.*, 1994).

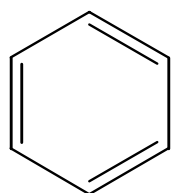
Otra gran diferencia entre las dos fracciones es que en los ácidos húmicos disminuyen la presencia de oxígeno formando parte de los grupos funcionales carboxilo, alcohol y carbonilo. El oxígeno que no forma

parte de grupos funcionales polares como los descritos, puede estar presente en grupos funcionales menos polares (como el enlace éster y éter), dentro del núcleo de la estructura húmica. La concentración de grupos funcionales ácidos en los ácidos fúlvicos podría parecerse sustancialmente más elevada que en cualquier otro polímero orgánico natural (Mortvedt *et al.* 1983).

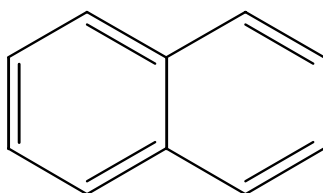
Se puede indicar que las sustancias húmicas presentan un núcleo principal de carácter aromático unido en su periferia a grupos radicales que confieren al conjunto sus características químicas y fisicoquímicas, y a grupos de enlace que favorecen la polimerización (Porta *et al.*, 1994).

Como núcleo de las sustancias húmicas pueden estar presentes moléculas como: benceno, naftaleno, antraceno, furano, pirrol, indol, piridina y quinona (Cuadro 2).

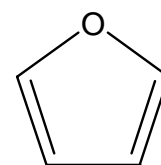
Cuadro 2 Grupos núcleo de las sustancias húmicas



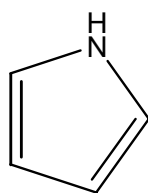
Benceno



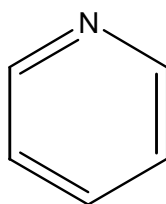
Naftaleno



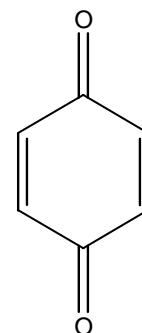
Furano



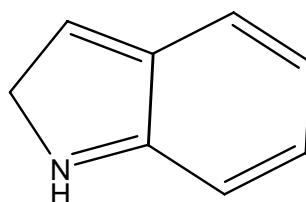
Pirrol



Piridina



Quinona



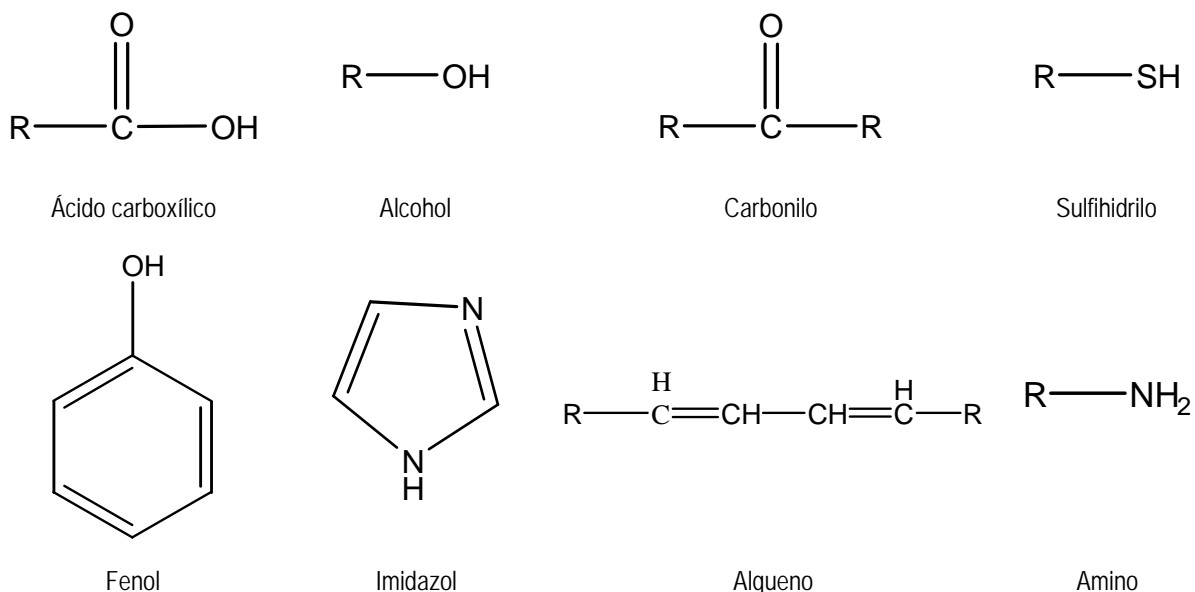
Indol

FUENTE: Porta *et al.*, 1994.

Entre los grupos funcionales externos se identifican: ácido carboxílico, fenol, alcohol, imidazol, sulfihidrido, carbonilo y amino (Porta *et al.*, 1994).

En la Cuadro 3 se muestran los grupos funcionales externos.

Cuadro 3 Grupos funcionales externos



FUENTE: Porta *et al.*, 1994.

Espectroscopia infrarroja

Para un análisis elemental de grupos funcionales, las técnicas más usadas para la caracterización de sustancias húmicas se dividen en no-destructivas y destructivas. Las primeras incluyen la espectrofotometría en el UV visible, espectrofluorometría, espectroscopia en el infrarrojo, resonancia magnética nuclear, rayos X, microscopía electrónica, análisis de difracción del electrón, mediciones de viscosidad, tensión superficial y dimensiones del peso molecular (Schnitzer y Khan, 1978).

La espectroscopia en el infrarrojo tiene una gran aplicación en el análisis cuantitativo y cualitativo. Su principal aplicación ha sido la identificación de grupos funcionales en compuestos orgánicos (Skoog y Leary 1994). Su elevada selectividad a menudo hace posible la cuantificación de una sustancia en una mezcla compleja, no siendo necesario una separación previa (Skoog y Leary 1994).

El método de espectroscopia infrarroja se emplea en la investigación de la estructura química de las sustancias, este método esta basado en la aparición de señales de absorción características al pasar los rayos infrarrojos a través de las sustancias, lo que esta relacionado con la excitación de vibraciones de los grupos funcionales en ella. Este método permite obtener datos sobre la presencia de la sustancia de distintas agrupaciones atómicas y grupos funcionales sin alterar su integridad química (Kononova, 1982).

La espectroscopia en el infrarrojo (IR) abarca las regiones del espectro comprendidas entre los números de onda de $12800,0 \text{ cm}^{-1}$ a 10 cm^{-1} aproximadamente, lo que corresponde a las longitudes de onda de $0,78 \mu\text{m}$ a $1000,0 \mu\text{m}$. Tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de los instrumentos es conveniente subdividir la región infrarroja en cercano, medio y lejano. La gran mayoría de las aplicaciones analíticas se basan en el empleo del infrarrojo medio comprendida entre los $4000,0 \text{ cm}^{-1}$ y los $400,0 \text{ cm}^{-1}$, corresponde a longitudes de onda de $2,50 \mu\text{m}$ y $15,00 \mu\text{m}$ (Skoog y Leary, 1994).

Unidades diferentes han sido adoptadas por diversos investigadores, por lo que es necesario familiarizarse con cada convención. La cantidad de luz absorbida se grafica comúnmente «por ciento de transmisión», lo cual significa que en una región de máxima absorción aparece como un valle en la mayoría de los curvas en el infrarrojo (Cuadro 4) (Shriner *et al.*, 1991).

Cuadro 4 Regiones del infrarrojo e intervalos

Región	Longitud de onda (λ) en μm	Número de onda (ν) cm^{-1}	Frecuencia en (ν) en Hz
Cercano	0,78 a 2,5	12800 a 4000	$3,80 \times 10^{14}$ a $1,20 \times 10^{14}$
Medio	2,5 a 50	4000 a 200	$1,20 \times 10^{14}$ a $6,00 \times 10^{12}$
Lejano	50 a 1000	200 a 10	$6,00 \times 10^{12}$ a $3,00 \times 10^{11}$

FUENTE: Shriner *et al.*, 1991.

La unidad más empleada para indicar la posición de las señales en un espectro es el número de onda en cm^{-1} , la longitud de onda en micras (μ) se usa como una alternativa. Las micras se convierten a número de onda sacando su recíproco y multiplicándola por 10000,0 (Shriner *et al.*, 1991).

Para absorber radiación infrarroja, una molécula debe experimentar un cambio neto en el momento dipolar como consecuencia de su movimiento vibratorio o rotatorio. Sólo en estas circunstancias puede interaccionar la molécula con el campo eléctrico alternante de la radiación y causar cambios en su movimiento. Las posiciones relativas de los átomos en una molécula no están exactamente fijas, sino que fluctúan continuamente como consecuencia de multitud de tipos vibracionales (Skoog y Leary, 1994).

Las vibraciones corresponden a las categorías básicas de extensión y flexión. Una vibración por extensión supone un cambio continuo en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos sin cambio en el ángulo de enlace. Las vibraciones por flexión se caracterizan por un cambio en el ángulo de enlace y son de cuatro tipos: de tijera, oscilación, sacudida y torsión (Skoog y Leary, 1994).

Con los años, se ha acumulado información empírica relativa a la gama de frecuencias con que puede esperarse que varios grupos funcionales absorban. Las tablas de correlación proporcionan un medio conciso para resumir esta información de modo que sea útil para fines de identificación. Así mismo permiten conjeturar los grupos funcionales presentes y ausentes en una molécula, basándose en la posición de las señales en el espectro de absorción IR. Por lo general, no es posible identificar sin ambigüedad una u otra de las fuentes de todas las señales en un espectro IR dado o la identidad exacta de la molécula. Las tablas de correlación sirven de punto de partida en el proceso de identificación

La espectrofotometría de IR es usada para la caracterización total de materiales húmicos de diversos orígenes, para la evaluación de los efectos de diferentes extractantes químicos, modificaciones químicas como son: metilación, acetilación, saponificación para la formación de derivados. Esto también puede ser usado para detectar cambios de estructura química de materiales húmicos, seguir una oxidación, y tratamiento similares a la pirolisis. El espectro IR refleja el predominio del contenido de oxígeno en grupos funcionales como, ácidos carboxílicos ($R-CO_2H$), hidróxilo ($R-OH$, $Ar-OH$) y carbonilo ($R_2-C=O$) en materiales húmicos (Schnitzer, 1978).

Los grupos funcionales más comunes identificados en el infrarrojo son: acetilenos ($RC\equiv CH$ y $RC\equiv CR$), anhídrido de ácido, haluro de acilo, ácido carboxílico, alcoholes, aldehído, amidas, aminas, ésteres, éteres, hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos, cetonas, nitrilos ($C\equiv N$), compuestos nitrados, olefinas,

iminas, misceláneas (que contienen grupos con azufre, fósforo, silicio, flúor, cloro y bromo) y sales inorgánicas y compuestos derivados (Shriner *et al.*, 1991).

La intensidad relativa de la señal de absorción en el Infrarrojo con Transformadas de Fourier, ha sido usada exitosamente para evaluar la degradación y humificación de la turba (Lehtovaara *et al.*, 1988) y la descomposición aeróbica de la materia orgánica (Invar *et al.*, 1989), citados por (Niemeyer *et al.* 1992). De acuerdo con Schnitzer (1994) citado por Schulten y Schnitzer (1997), estructuralmente las dos fracciones húmicas son similares, y las señales encontradas correspondientes a grupos funcionales en los espectros de infrarrojo se muestran en la Cuadro 5.

Cuadro 5 Número de onda y designación de señal para grupos funcionales

Número de onda (cm ⁻¹)	Designación de señal
3400	Vibraciones de estiramiento de O-H (asociado) en fenoles, alcoholes, ácidos carboxílicos y agua (Schnitzer y Khan, 1978, Almendros <i>et al.</i> , 1990, Celi <i>et al.</i> , 1997).
3030	Vibración de alargamiento de C=C-H aromático (hombro) (Bellamy 1975, Nakanishi 1977).
2900	Estiramiento C-H, CH ₂ y CH ₃ alifático (Niemeyer <i>et al.</i> 1992, Hempfling 1988).
1725	Vibración de estiramiento del carbonilo C=O, de COOH o COOR (Niemeyer <i>et al.</i> , 1992, Hempfling <i>et al.</i> , 1988).
1650	Vibración de alargamiento C=O de quinona (Nakanishi 1977, Soler Rovira <i>et al.</i> , 2002).
1630	Vibración de alargamiento -C=C- de alqueno conjugado con fenoles (Bellamy 1975).
1615	Vibración de alargamiento de C=C de aromáticos conjugados (Nakanishi 1977).
1600	Enlace de estiramiento múltiple C=C aromático (Niemeyer <i>et al.</i> , 1992).
1460	Deformación C-H, alcano CH ₃ , o estiramiento C-C, aromático (Niemeyer <i>et al.</i> 1992, Hempfling 1988).
1400	Vibración de deformación O-H y estiramiento C-O de fenol (Bellamy 1975).

Cuadro 5 Número de onda y designación de señal para grupos funcionales (continuación)

Número de onda (cm ⁻¹).	Designación de señal.
1050	Alcoholes Primarios (Bellamy 1975).
1100	Alcoholes Secundarios (Bellamy 1975).
1150	Alcoholes Terciarios (Bellamy 1975).
1200	Fenoles (Bellamy 1975).
1225	Vibración de deformación O-H y estiramiento C-O de ácido carboxílico (Celi et al 1997).
1150	Estiramiento C-O-C (ésteres) alifáticos y anillos (Bellamy 1975).
1200	Vibración de alargamiento -C-O-H de fenol (Bellamy 1975).
1050	Deformación de O-H y estiramiento C-O, de restos de polisacáridos, alcoholes primarios o restos de silicatos (Francioso et al. 2000, Rovira et al 2002, Piccolo 1998).
990	Deformación C-H, aromático (Bellamy 1975, Niemeyer <i>et al.</i> , 1992).
770	Deformación C-H, aromático (Bellamy 1975, Niemeyer <i>et al.</i> , 1992).

FUENTE: Schulten y Schnitzer, 1997.

pH

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 el pH se define como el "*Logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno en el suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo, expresado en términos de la escala de pH, de 0 a 14**".

Textura

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 la Textura del suelo se define como "*la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla. Las cuales al combinarse generan las clases texturales*".

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en San Rafael perteneciente al municipio de Tlamanalco, estado de México.

De acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, estado de México publicado en la Gaceta de Gobierno el 4 de Marzo del 2008, Tlamanalco se localiza en la porción oriente del estado de México y colinda con los municipios de Chalco e Ixtapaluca al norte; Amecameca y Ayapango al sur; el estado de Puebla al este; y los municipios de Cocotitlán, Temamatla y Tenango del Aire al oeste.

Tlamanalco cuenta con una superficie de 15 857,66 hectáreas, siendo su cabecera municipal Tlamanalco de Velásquez.

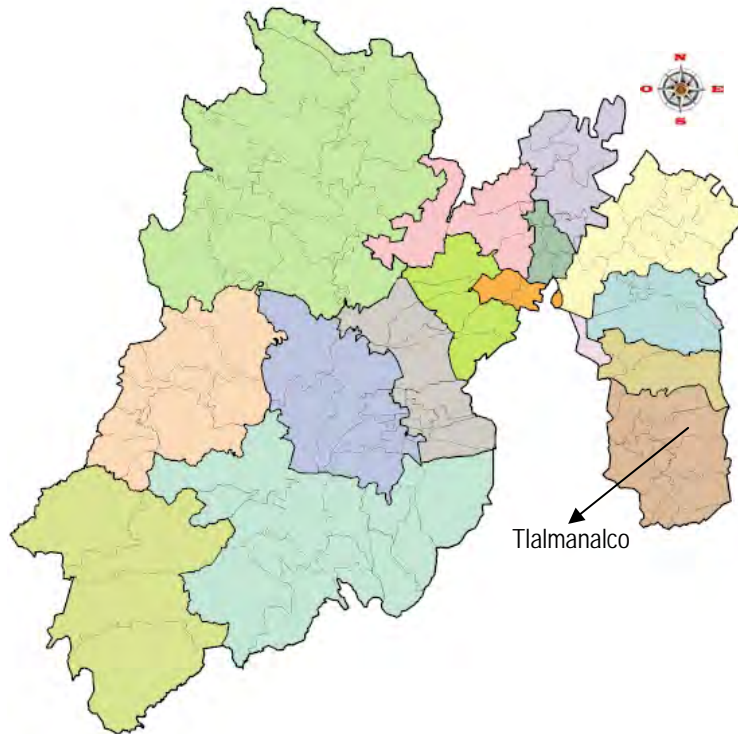
La altitud en la cabecera del municipio alcanza 2 400 msnm sus coordenadas geográficas se muestran en la Cuadro 6 y en la Figura 1 se muestra ubicación general; mientras que en la Figura 2 se ubica microlocalización del área de estudio.

Cuadro 6 Coordenadas geográficas de Tlamanalco

	Minima	Máxima
Longitud	99°26'37"	99°44'02"
Latitud	19°52'02"	20°12'43"

FUENTE: <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/edomex/nuestro-estado/regiones-y-municipios>.

Figura 1 Ubicación Tlalmanalco, estado de México



FUENTE: <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/edomex/nuestro-estado/regiones-y-municipios>.

Figura 2 Microlocalización del área de estudio



FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

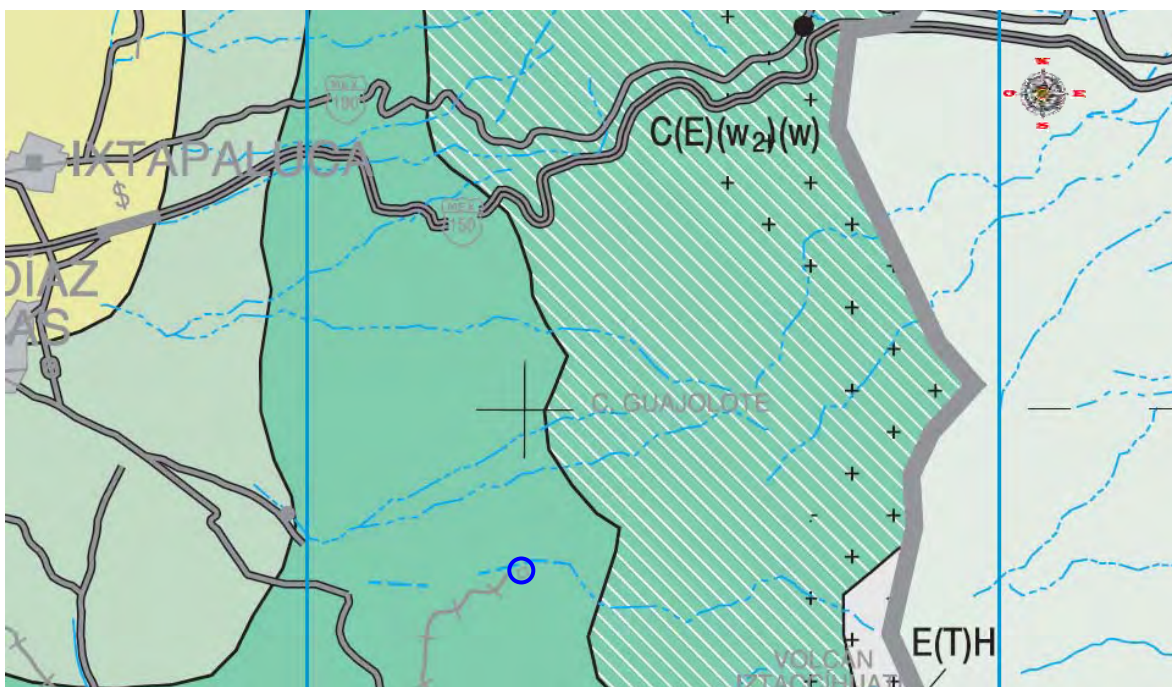
Clima

El área de estudio presenta un tipo de clima $C(W_2)(w)$ perteneciente a un clima templado (Figura 3), Subtipo de mayor humedad dentro de los templados subhúmedos (Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003).

Se presentan heladas a partir del mes de noviembre extendiéndose hasta febrero. Los vientos dominantes tienen una dirección norte-sur. La temperatura promedio es de $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, una máxima de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una mínima de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La precipitación anual promedio se encuentra entre los $1\ 000\text{ mm}$. Aunque es importante destacar que en las partes más bajas correspondientes a la cabecera municipal llueve alrededor de los 800 mm y en las partes más altas correspondientes a la zona montañosa se presentan lluvias promedio hasta de $1\ 300\text{ mm}$ sumando a ello los deshielos del Iztaccíhuatl (Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, 2008).

Figura 3 Clima área de estudio



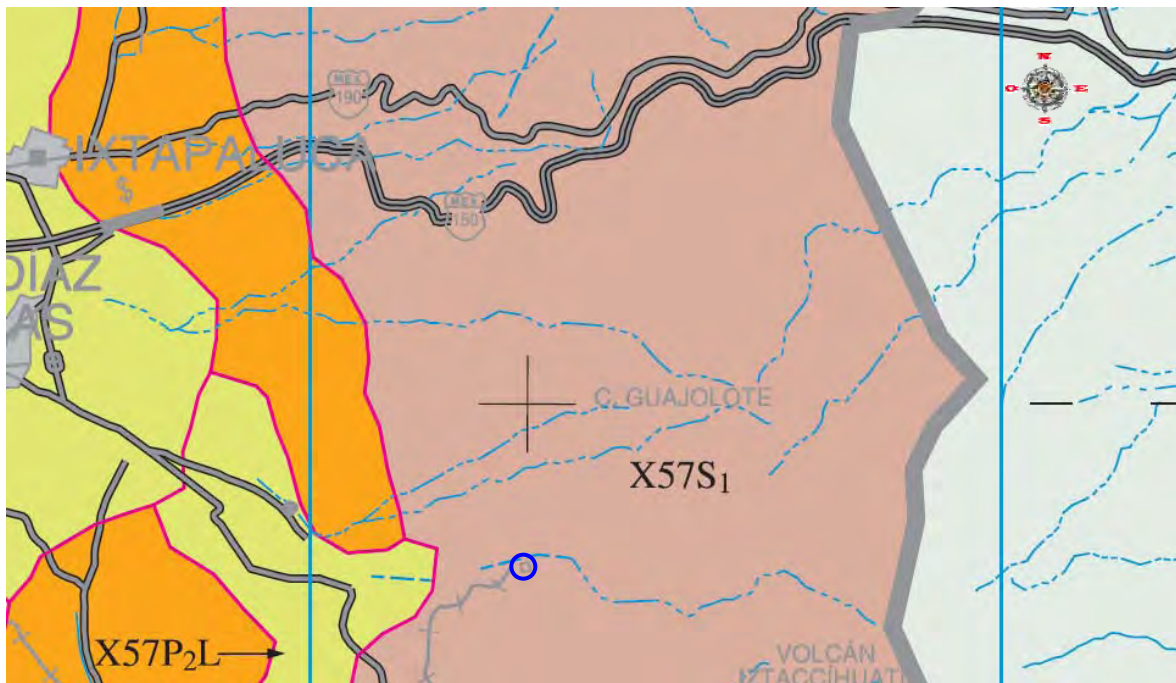
FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

Orografía

De acuerdo a la Síntesis de Información Geográfica Estado de México editada por el INEGI, 2003 (Figura 4). El área de estudio se ubica en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, que forma parte del Sistema Montañoso de la Sierra Nevada, de la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac (X57S₁).

Los puntos más altos en el municipio se localizan en las cimas del Iztaccíhuatl correspondientes a la cabeza con 5 140 msnm., al pecho con 5 280 msnm. y las rodillas con 5 000 msnm. (Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, 2008).

Figura 4 Fisiografía área de estudio



FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

Geomorfología

De acuerdo con la ubicación geográfica del municipio, éste se caracteriza por presentar un relieve muy accidentado con la presencia de lomas, laderas y mesetas, que presenta ondulamientos variados, los cuáles conforman el macizo montañoso característico de la región. A partir de la cota 3 600 msnm.; en las laderas del volcán Iztaccíhuatl se originan microclimas por la variación altitudinal que presenta.

Dentro de las elevaciones con mayor altitud destacan los cerros: Tlacachelo, Caluca, Chilapa, El Obrador, El Ocopipila, Xacaltepec, El Guajolote, Teocamac y El Mirador, los cuales rebasan los 3 000 msnm.

Otros cerros con menor altura son: La Luna, Sultepec, Tenayo y Chiconquiac.

Hidrología

El área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica del Alto Pánuco (Figura 5), en la Cuenca del Río Moctezuma y de las Microcuencas del Río Tlalmanalco o de La Compañía, del Río Amecameca y del Río Atoyac, el cual forma parte de la Región Hidrológica del Río Balsas (Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, 2008).

La microcuenca del Río Atoyac, tiene su parteaguas al extremo norte de las zonas altas de Tlalmanalco e Ixtapaluca; gran parte de sus escurrimientos, son generados por deshielos.

La superficie comprendida dentro de la microcuenca del Río Tlalmanalco o de la Compañía, representa el 40 % del municipio, cubre el lado oeste del volcán Iztaccíhuatl; Sus escurrimientos principales son los arroyos El Cedral, Ocotepec, Infiernillo, Agua del Marrano, Tlalmanalco, Nahualac, Santo Domingo, todos ellos conducidos por el Canal San Rafael.

En los últimos años esta microcuenca ha registrado una disminución de lluvia, probablemente debido a la expansión urbana sobre su superficie.

La microcuenca Amecameca atraviesa por una pequeña porción del municipio, la mayoría de sus escurrimientos provienen de los deshielos del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl.

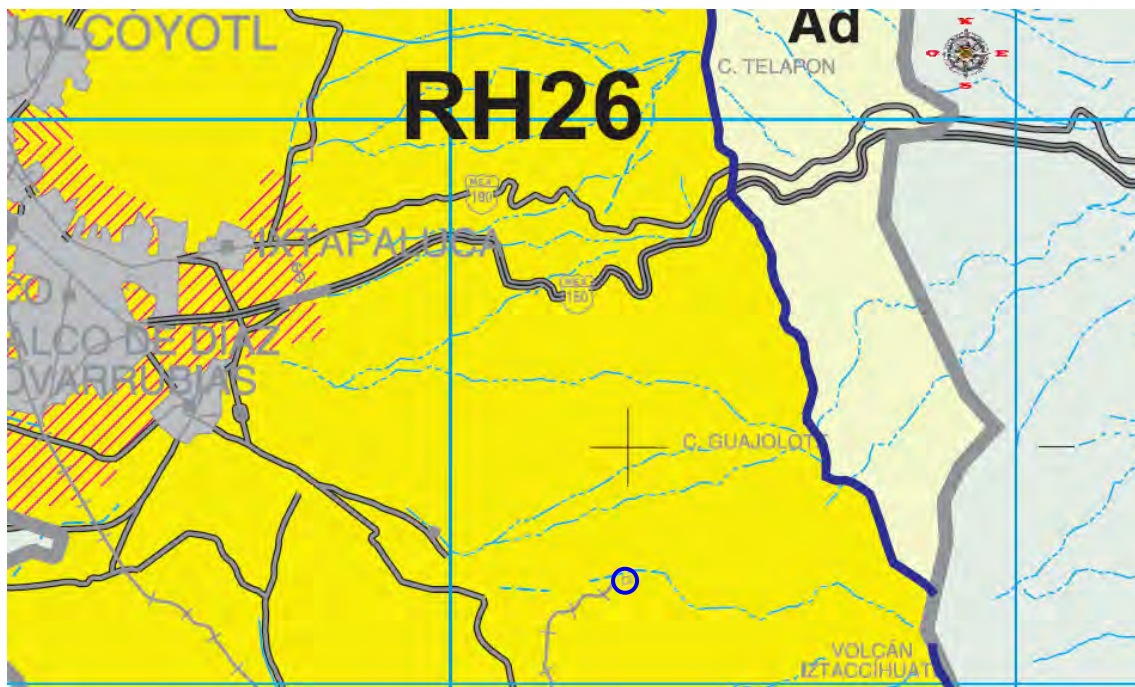
El agua de esta microcuenca filtra a un acuífero que se extiende desde Amecameca, Tlalmanalco, Ayapango y Juchitepec, hasta Tenango del Aire, donde son aprovechados por el sistema de pozos llamados "Tlachiques", que son parte del sistema sureste.

Con relación a las aguas subterráneas. Tlalmanalco se encuentra en el sistema acuífero de la formación Llano Grande en Tlalmanalco y Amecameca, contiene múltiples mantos freáticos con buena circulación; los pozos que constituyen esta formación poseen alta permeabilidad y tienen un rol principal para la recarga de los acuíferos del Valle Ozumba – Amecameca.

El sistema Tlalmanalco capta 125 L/s. de los canales Dos Aguas y El Negro, del Río Tlalmanalco con un caudal de 300 L/s. que es distribuida por gravedad a San Rafael, San Juan, Pueblo Nuevo, San Lorenzo, Tlalmanalco de Velásquez, Santo Tomás y San Antonio.

Las corrientes que bajan de la vertiente occidental de la Sierra Nevada se canalizan hacia el Lago de Texcoco que, junto con las aguas servidas de la Ciudad de México, son conducidas por el gran canal del desagüe.

Figura 5 Hidrología superficial área de estudio



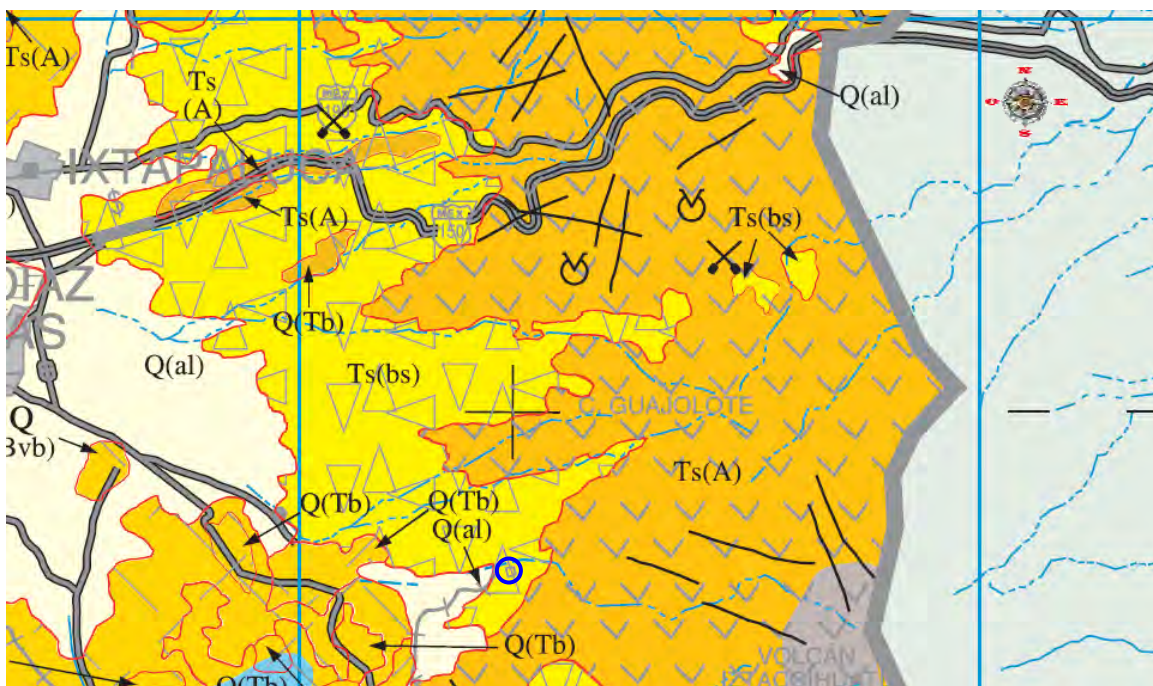
FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

Geología

Tlamanalco se localiza al oeste de las laderas del Iztaccíhuatl, está comprendido dentro del Eje Neovolcánico formado por material volcánico del terciario superior, el tipo de roca predominante es ígneo de color gris, sobresaliendo las andesitas en el sistema montañoso, presentando un intemperismo somero y una permeabilidad alta, localizada estas en dirección sureste del municipio, donde se presenta fracturamiento (Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, 2008).

Con base a la Síntesis de Información Geográfica del Estado de México; INEGI, 2003 el área del proyecto se ubica sobre una unidad Ts(bs) perteneciente al Terciario Superior, dominan Rocas Ígneas Extrusivas y se observa la presencia de una Brecha Sedimentaria (Figura 6).

Figura 6 Geología área de estudio

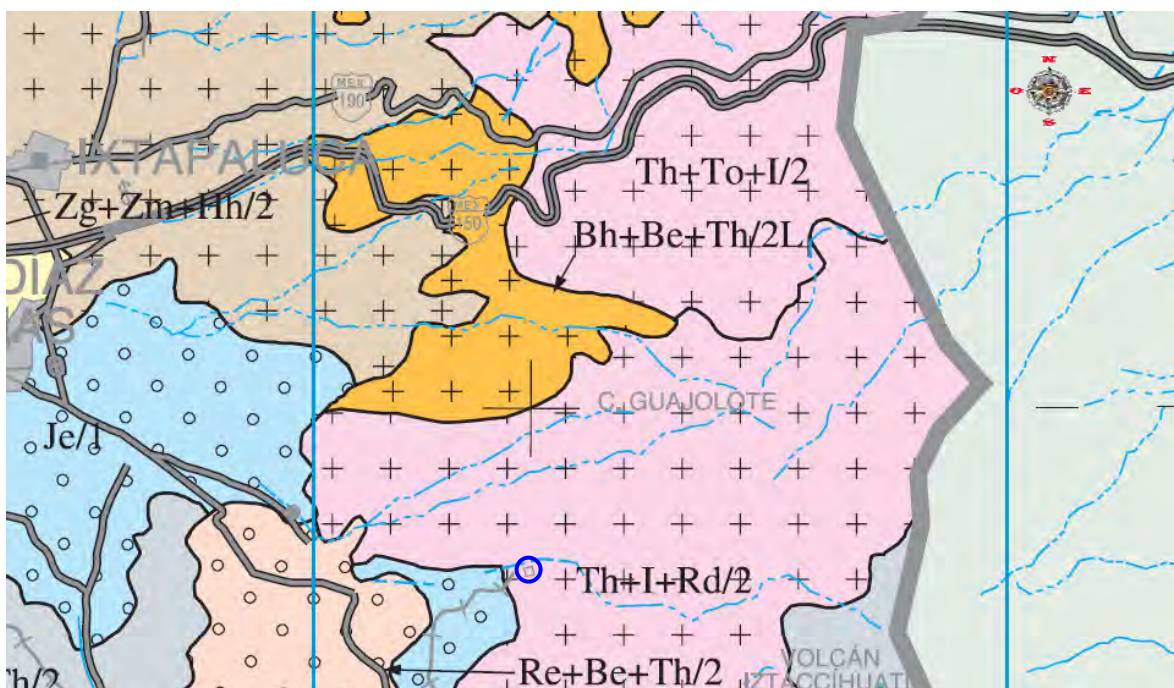


FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

Edafología

El área del proyecto (Figura 7) presenta una Unidad de Suelo del tipo Andosol (FAO/UNESCO/ISRIC), donde el suelo dominante es un Andosol Húmico con una Clase Textural Media ($Th+I+Rd/2$) (Síntesis de Información Geográfica del Estado de México; INEGI, 2003). Los Andosoles se localizan en el área que corresponde al Ejido Tlalmanalco. Son suelos que se originan a partir de cenizas volcánicas que se distinguen por su alta capacidad de retención de humedad, su única vocación es forestal, en la agricultura su rendimiento es muy bajo, presentan alta susceptibilidad a la erosión por lo que no es recomendable que sean desprovistos de su vegetación natural. Estos suelos no son aptos para el desarrollo urbano, por ser colapsables (Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlalmanalco, 2008). El Suelo dominante Andosol Húmico tiene un horizonte A úmbrico rico en materia orgánica, pero ácido y pobre en nutrientes. Encima de este horizonte generalmente se encuentra una capa orgánica, compuesta básicamente por hojarasca en descomposición de pinos y encinos. El contenido de materia orgánica es alta en casi todo el perfil, pero disminuye considerablemente en el horizonte B cámbico, el cual se distingue por su color más claro, y su contenido de materia orgánica apreciablemente menor que en el horizonte A. Presenta una textura de migajón arenoso y la alta porosidad es otra de sus características.

Figura 7 Edafología área de estudio



FUENTE: Síntesis de Información Geográfica Estado de México; INEGI, 2003.

5. HIPÓTESIS

Aplicando el método de extracción secuencial de materia orgánica. propuesto por Schnitzer y Schuppli, a muestras de suelos procedentes de un área forestal (Bosque de Pino y Bosque de Pino-Encino) y un área agrícola (San Juan Parcela) para obtener las fracciones húmicas y su posterior análisis por espectroscopia en el infrarrojo nos permitirá determinar si existe cambio en la estructura orgánica del suelo agrícola respecto al suelo forestal.

6. OBJETIVOS

Objetivo general

Adaptar la metodología de extracción secuencial de materia orgánica propuesta por Schnitzer y Schuppli en muestras de suelo provenientes de un área forestal y de un área agrícola a diferentes profundidades para obtener las diferentes fracciones de materia orgánica y realizar su estudio cualitativo por espectroscopia en el infrarrojo con transformadas de fourier (FTIR).

Objetivos particulares.

- Realizar el método de extracción secuencial para materia orgánica propuesto por Schnitzer y Schuppli para las muestras de suelo provenientes de un área forestal (Bosque de Pino y Bosque de Pino – Encino) y de un área agrícola (San Juan Parcela) a cuatro profundidades (0-10 cm, 10-20cm, 20-30 cm y 30-40 cm).
- Separar las fracciones húmicas.
- Obtener los espectros de las fracciones húmicas.
- Interpretar y asignar grupos funcionales en las fracciones húmicas de ambas zonas.
- Determinar los cambios en los grupos funcionales de la materia orgánica en ambas zonas generados por su uso de suelo.
- Realizar parámetros edáficos que aporten información de las condiciones del sitio: materia orgánica, pH, textura, carbón orgánico total.

7. METODOLOGÍA

Trabajo de campo

Selección del sitio de muestro

Se seleccionaron tres zonas de muestreo, dos forestales (Bosque de Pino y Bosque de Pino-Encino) y una zona agrícola (San Juan Parcela). La selección de las zonas de muestreo fue dirigido tomando en cuenta los atributos ambientales del sitio.

Obtención de Muestras

Para cada una de las zonas de muestreo se tomo tres muestras a las siguientes profundidades:

- 0-10 cm
- 10-20 cm
- 20-30 cm
- 30- 40 cm

Una vez obtenidas las muestras para cada sitio se procedió a formar una muestra compuesta.

Trabajo de laboratorio

Análisis de muestras

El trabajo de laboratorio se llevó a cabo en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, en el Laboratorio de Espectroscopia L-328 y L-315. Las muestras fueron secadas al aire por 2 semanas, y tamizadas a través de malla de 2 mm. Para la extracción y purificación de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos se utilizó el procedimiento descrito por Schnitzer y Schuppli *et al.*, (1989) (**Anexo A**), que se basa en la afinidad de la fracción húmica ante reacciones óxido-reducción, primeramente las sustancias húmicas son solubles en álcali, y posteriormente separadas aprovechando su solubilidad, los ácidos húmicos solubles se precipitan en un medio ácido y los ácidos fúlvicos solubles en un medio alcalino.

Para la determinación de la textura se utilizó el análisis de Bouyoucos (**Anexo B**), el pH se determinó con la técnica del potenciómetro (**Anexo C**), la materia orgánica se obtuvo mediante vía húmeda (**Anexo D**) y finalmente se evaluó el carbón orgánico total mediante oxidación húmeda con dicromato de potasio (**Anexo E**).

Obtención de espectros

Los espectros en el Infrarrojo de las muestras de materia orgánica se obtuvieron dispersando la muestra en bromuro de potasio (grado espectroscópico, E. Merk 64271 Darmstadt, Germany), la pastilla obtenida se analiza en un espectrofotómetro en el Infrarrojo FTIR, Perkin Elmer 1600, la posición de las señales se dan en número de onda (cm^{-1}).

Trabajo de gabinete

Análisis de resultados.

Para la interpretación de los espectros del IR se respaldó en cartas de correlación para grupos funcionales (Shriner y Fuson 1991 y Bellamy 1975), y se compararon los espectros de cada profundidad de las zonas.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

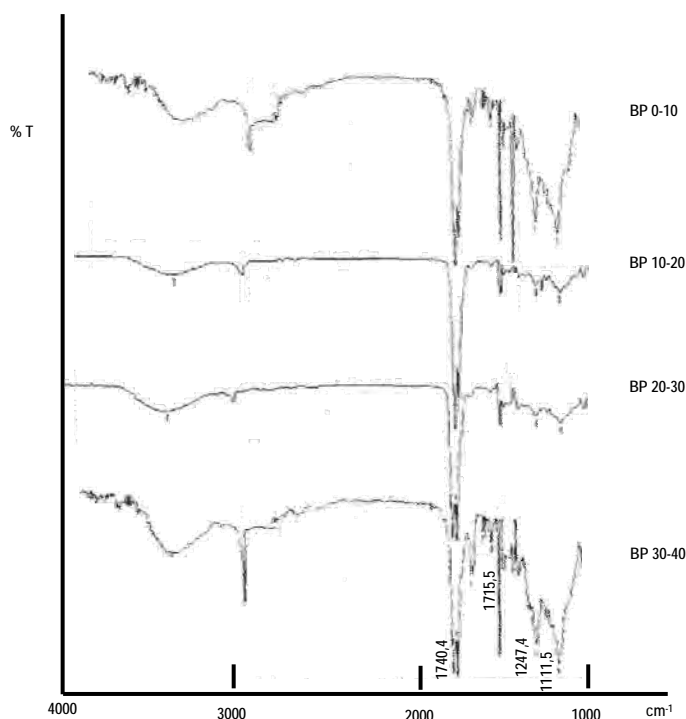
8.1 Espectros IR de la extracción con Hexano

8.1.1 Zona Bosque Pino (BP)

La Figura 8 muestra el espectro obtenido de la extracción con hexano para la muestra proveniente del Bosque de Pino a una profundidad de 0-10 cm. Se observa una señal pequeña a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, que se asigna a las presencia de $-\text{OH}$, en la región del carbonilo se observa una señal de $1740,4\text{ cm}^{-1}$ y $1715,5\text{ cm}^{-1}$, lo que nos indica la presencia de esterres tanto alifáticos como aromáticos ya que se complementa con las señales asignadas a la vibración carbón-oxígeno de $1247,4\text{ cm}^{-1}$ y $1111,5\text{ cm}^{-1}$. La extracción con hexano y de acuerdo a las señales observadas nos permiten concluir que la materia orgánica extraída con este disolvente esta formada por esterres alifáticos y aromáticos y posiblemente una pequeña proporción de alcoholes y fenoles libres.

Los espectros correspondientes a las siguientes profundidades nos indican la presencia de los mismos grupos funcionales con una disminución en la concentración al aumentar la profundidad

Figura 8 Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades:
Bosque de Pino (BP)

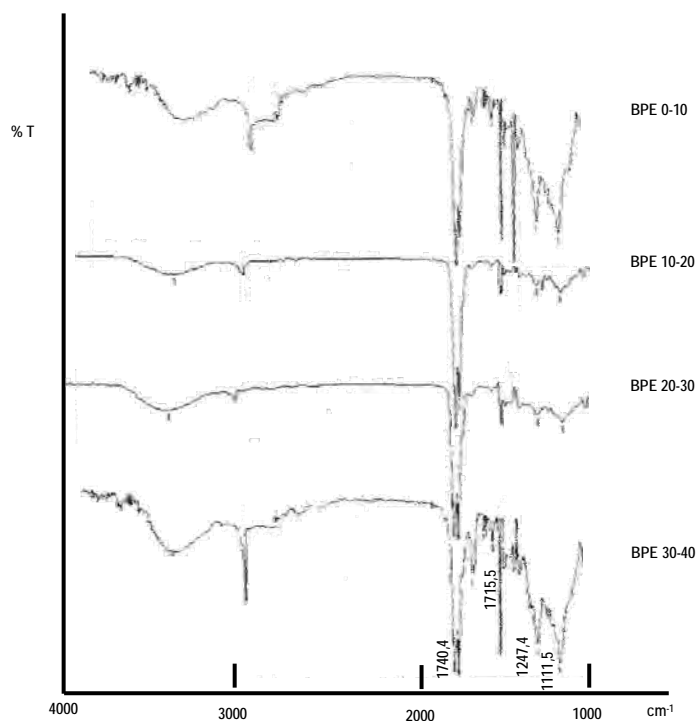


8.1.2 Zona Bosque Pino – Encino (BPE)

La Figura 9 muestra el espectro obtenido de la extracción con hexano para la muestra proveniente del Bosque de Pino a una profundidad de 0-10 cm. Se observa una señal pequeña a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, que se asigna a las presencia de -OH, en la región del carbonilo se observa una señal de $1740,4\text{ cm}^{-1}$ y $1715,5\text{ cm}^{-1}$, lo que nos indica la presencia de esteres tanto alifáticos como aromáticos ya que se complementa con las señales asignadas a la vibración carbón-oxígeno de $1247,4\text{ cm}^{-1}$ y $1111,5\text{ cm}^{-1}$. La extracción con hexano y de acuerdo a las señales observadas nos permiten concluir que la materia orgánica extraída con este disolvente esta formada por esteres alifáticos y aromáticos y posiblemente una pequeña proporción de alcoholes y fenoles libres.

Los espectros correspondientes a las siguientes profundidades nos indican la presencia de los mismos grupos funcionales con una disminución en la concentración al aumentar la profundidad

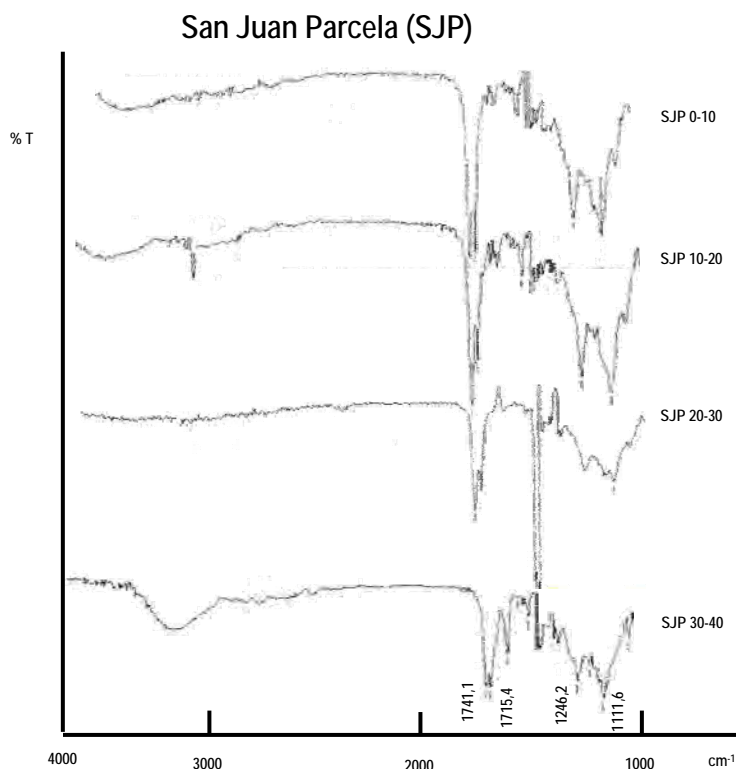
Figura 9 Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades:
Bosque de Pino - Encino (BPE)



8.1.3 Zona San Juan Parcela (SJP)

La Figura 10 muestra el espectro obtenido de la extracción con hexano para la muestra proveniente de San Juan Parcela a una profundidad de 0-10 cm. Se observa una señal pequeña a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, que se asigna a la presencia de -OH, al aumentar la profundidad esta señal tiene un aumento relativo respecto al resto de las señales, lo que nos indica un aumento en los grupos funcionales que contienen -O-H. En la región del carbonilo se observa una señal de $1741,1\text{ cm}^{-1}$ y $1715,4\text{ cm}^{-1}$, lo que nos indica la presencia de esterés tanto alifáticos como aromáticos ya que se complementa con las señales asignadas a la vibración carbón-oxígeno de $1246,2\text{ cm}^{-1}$ y $1111,6\text{ cm}^{-1}$. La extracción con hexano y de acuerdo a las señales observadas nos permiten concluir que la materia orgánica extraída con este disolvente esta formada por esterés alifáticos y aromáticos y posiblemente una pequeña proporción de alcoholes y fenoles libres.

Figura 10 Espectros de la extracción con hexano en muestras de suelo a diferentes profundidades:



8.1.4 Espectros hexano por zona a la profundidad 0-10 cm.

El hexano es un disolvente no polar por lo que se espera extraer compuestos de baja polaridad como son compuestos con grupos oxigenados como ácidos carboxílicos, fenoles y alcoholes formando entre ellos compuestos esterificados, lo que disminuye la polaridad de la materia orgánica haciéndola susceptible a extraer con hexano.

La Figura 11, nos muestra comparativamente los espectros de la extracción con cloroformo de la materia orgánica del suelo proveniente de las tres zonas de estudio a la profundidad inicial de 0-10 cm. Se observa presencia de la señal a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, en los espectros provenientes de las muestras de suelo del Bosque de Pino (BP) y del Bosque de Pino-Encino (BPE), a pesar de la baja intensidad es evidente la ausencia de esta señal en el espectro proveniente de la muestra de suelo de San Juan Parcela, mostrando una disminución en los grupos oxigenados de bajo peso molecular.

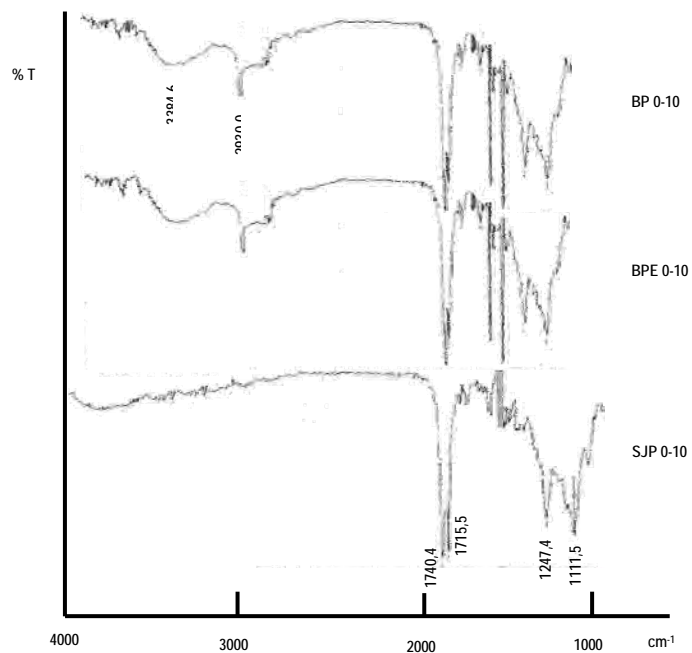
Al ser el hexano un disolvente no polar se extraen compuestos de baja polaridad que nos permite observar en la región del carbonilo dos señales ($1741,1\text{ cm}^{-1}$ y $1715,4\text{ cm}^{-1}$), que tienen su origen en la presencia de esterres tanto alifáticos ($1111,6\text{ cm}^{-1}$), como aromáticos ($1246,2\text{ cm}^{-1}$).

La extracción con hexano y de acuerdo a las señales observadas nos permiten concluir que la materia orgánica extraída con este disolvente esta formada por esterres alifáticos y aromáticos en las tres zonas de estudio.

En la zona de SJP se muestra nuevamente la ausencia de moléculas de bajo peso molecular conteniendo grupos funcionales alcohol y fenol.

La intensidad relativa de las señales asignadas a cadenas alifáticas ($3384,6\text{ cm}^{-1}$, $2930,0\text{ cm}^{-1}$) son de menor intensidad en la muestra proveniente de SJP, respecto a las de BP y BPE, lo que nos indica la presencia de polímeros de cadenas más cortas motivado por una mayor alteración de la estructura del suelo como consecuencia de las actividades agrícolas. El resto de las señales son similares en las tres zonas en estudio.

Figura 11 Espectros comparativos de la extracción con hexano en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona

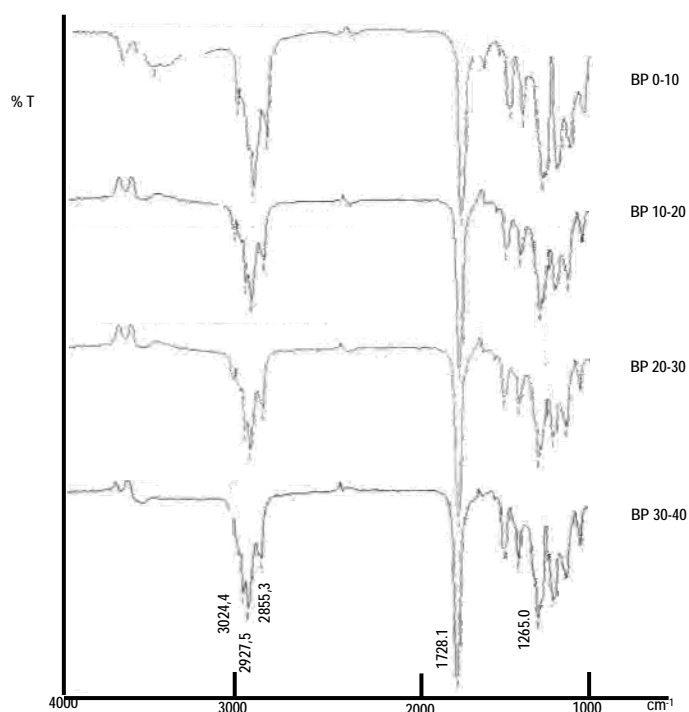


8.2 Espectros IR de la extracción con cloroformo.

8.2.1 Zona Bosque Pino (BP)

La Figura 12 muestra el espectro obtenido de la extracción con cloroformo para la muestra proveniente del Bosque de Pino a una profundidad de 0-10 cm. En este espectro se observa una señal a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, de baja intensidad relativa respecto al resto del espectro, lo que indica la presencia de grupos funcionales que contengan $-\text{OH}$ libres (alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos) es poco significativa, sin embargo en $1728,1\text{ cm}^{-1}$ se observa una señal que se asigna a carbonilo tipo éster, que se complementa con la señal a $1265,0\text{ cm}^{-1}$ que permite establecer que la materia orgánica que se extrae con cloroformo corresponde a ácidos alifáticos y aromáticos esterificados con moléculas de fenol o de alcoholes. En $3024,0\text{ cm}^{-1}$, se observa una señal indicativa de dobles enlaces del tipo aromático, en $2927,5\text{ cm}^{-1}$ y $2855,3\text{ cm}^{-1}$ se observan las señales características de cadenas alifáticas CH_3 , CH_2 . Los espectros correspondientes a las siguientes profundidades nos muestran la presencia de grupos funcionales similares.

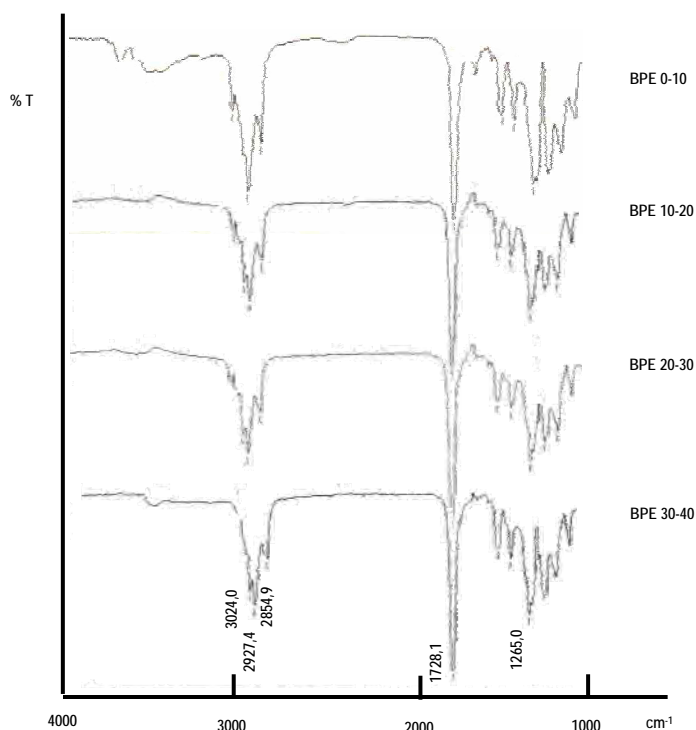
Figura 12 Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino (BP)



8.2.2 Zona Bosque Pino – Encino (BPE)

La Figura 13 muestra el espectro obtenido de la extracción con cloroformo para la muestra proveniente del Bosque de Pino a una profundidad de 0-10 cm. En este espectro se observa una señal a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, de baja intensidad relativa respecto al resto del espectro, lo que indica la presencia de grupos funcionales que contengan -OH libres (alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos) es poco significativa, sin embargo en $1728,1\text{ cm}^{-1}$ se observa una señal que se asigna a carbonilo tipo éster, que se complementa con la señal a $1265,0\text{ cm}^{-1}$ que permite establecer que la materia orgánica que se extrae con cloroformo corresponde a ácidos alifáticos y aromáticos esterificados con moléculas de fenol o de alcoholes. La esterificación de los ácidos carboxílicos permite obtener grupos funcionales menos polares y que de alguna manera equilibren las características ácidas en el suelo. En $3024,0\text{ cm}^{-1}$, se observa una señal indicativa de dobles enlaces del tipo aromático y de alqueno, en $2927,4\text{ cm}^{-1}$ y $2854,9\text{ cm}^{-1}$ se observan las señales características de cadenas alifáticas (CH_3 , CH_2). Los espectros correspondientes a las siguientes profundidades, presentan señales similares lo que nos indica la presencia de los mismos grupos funcionales.

Figura 13 Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque de Pino – Encino (BPE)

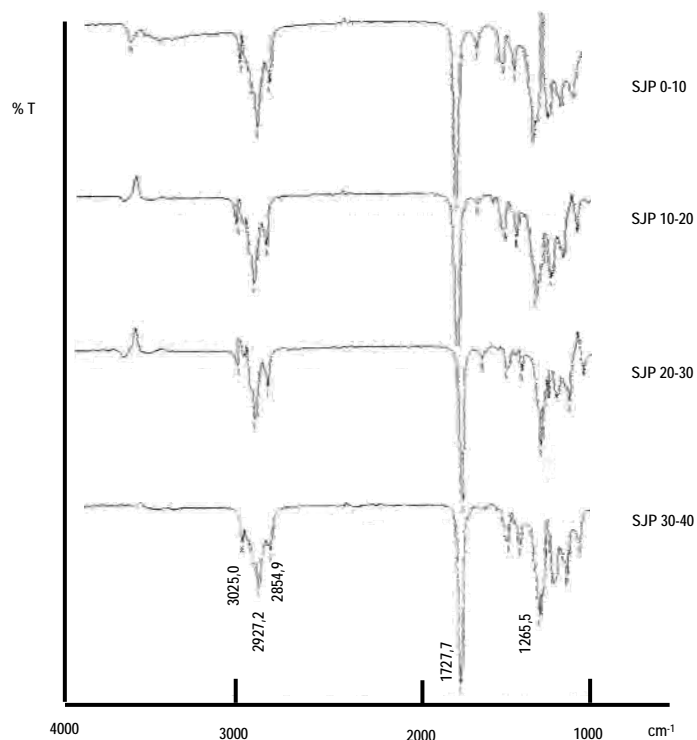


8.2.3 Zona San Juan Parcela (SJP)

La Figura 14 muestra el espectro obtenido de la extracción con cloroformo para la muestra proveniente de San Juan Parcela a una profundidad de 0-10 cm. En este espectro se observa ausencia de señales a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, lo que indica que en la muestra extraída no están presentes moléculas que contengan -OH libres que sería indicativo de la presencia de alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos.

En $3025,0\text{ cm}^{-1}$, se observa una señal indicativa de dobles enlaces del tipo aromático, en $2927,2\text{ cm}^{-1}$ y $2854,9\text{ cm}^{-1}$ se observan las señales características de cadenas alifáticas (CH_3 , CH_2), en $1727,7\text{ cm}^{-1}$ se observa una señal que se asigna a carbonilo tipo éster, que se complementa con la señal a $1265,5\text{ cm}^{-1}$ lo que nos permite asignar que la materia orgánica que se extrae con cloroformo corresponde a ácidos alifáticos eterificados con moléculas derivadas de fenol y alcoholes. Los espectros correspondientes a las siguientes profundidades nos indican la presencia de grupos similares.

Figura 14 Espectros de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a diferentes profundidades: San Juan Parcela (SJP)



8.2.4 Espectros de la extracción con cloroformo por zona a la profundidad 0-10 cm.

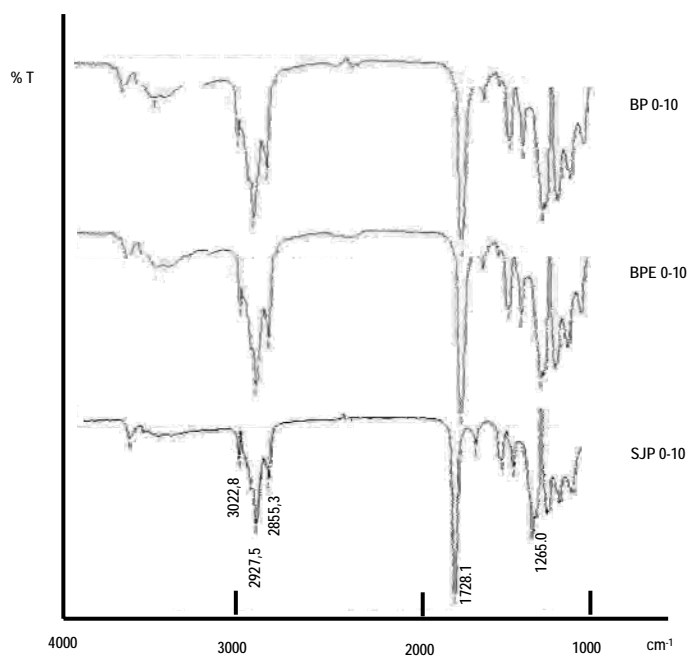
La extracción con un disolvente polar, no prótico como lo es el cloroformo nos permite extraer compuestos polares de bajo peso molecular.

La Figura 15, nos muestra comparativamente los espectros de la extracción con cloroformo de la materia orgánica del suelo proveniente de las tres zonas de estudio a la profundidad inicial de 0-10 cm.

Se observa presencia de la señal a $3300,0\text{ cm}^{-1}$, en los espectros provenientes de las muestras de suelo del Bosque de Pino (BP) y del Bosque de Pino-Encino (BPE), a pesar de la baja intensidad es evidente la ausencia de esta señal en el espectro proveniente de la muestra de suelo de San Juan Parcela, mostrando una disminución en los grupos oxigenados de bajo peso molecular. Las señales que se asignan a los grupos éster ($1728,1\text{ cm}^{-1}$, $1265,0\text{ cm}^{-1}$), son de mayor intensidad relativa en las muestras de la zona BP y BPE respecto a la zona SJP, siendo en estas dos primeras zonas más eficientes los procesos de oxidación y estabilización de estructuras orgánicas oxidadas de bajo peso molecular.

La intensidad relativa de las señales asignadas a cadenas alifáticas ($2927,5\text{ cm}^{-1}$, $2855,3\text{ cm}^{-1}$) son de menor intensidad en la muestra proveniente de SJP, respecto a las de BP y BPE, lo que nos indica la presencia de polímeros de cadenas más cortas motivado por una mayor alteración de la estructura del suelo como consecuencia de las actividades agrícolas. El resto de las señales son similares en las tres zonas en estudio.

Figura 15 Espectros comparativos de la extracción con cloroformo en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona



8.3 Espectros de ácidos húmicos.

8.3.1 Zona Bosque de Pino (BP)

La Figura 16 muestra el espectro de los ácidos húmicos obtenidos de la extracción del suelo proveniente del Bosque de Pino. La señal a $2942,9\text{ cm}^{-1}$ se asigna a estructuras de cadenas alifáticas (enlace C-H), la posición e intensidad relativa respecto a la profundidad fue similar, lo que nos indica que la estructura alifática se mantiene constante en el perfil.

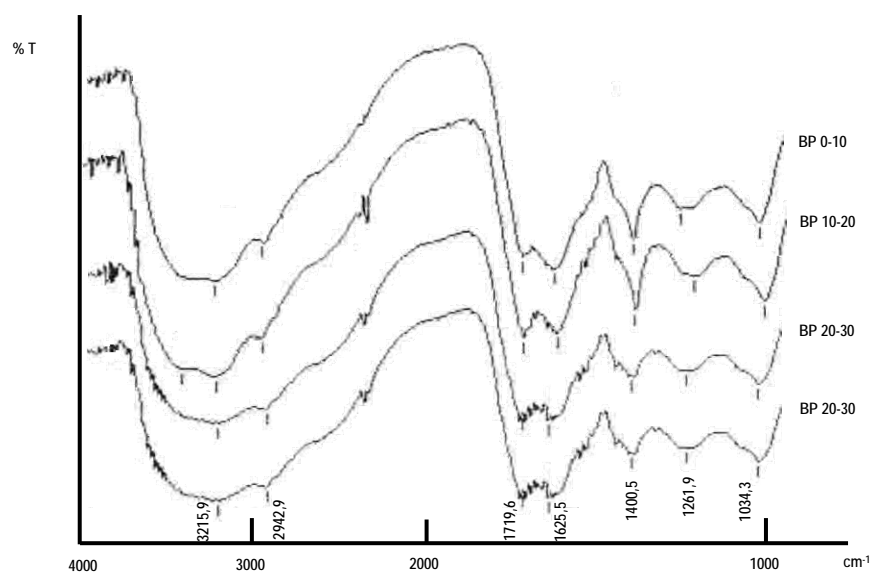
La presencia de ácidos carboxílicos se confirma por la presencia de las señales a $3215,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), $1719,6\text{ cm}^{-1}$ (C=O) y $1400,5\text{ cm}^{-1}$ (C-O), la señal asignada al carbonilo presentó un aumento relativo en los primeros 10 cm de profundidad, a mayor profundidad se observa constante la señal, lo que es indicativo de una estabilización en la estructura de los ácidos carboxílicos en cadenas alifáticas así como asociados a estructuras aromáticas.

Las señales que se presentan a $3215,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), en combinación con la señal a $1261,9\text{ cm}^{-1}$ (C-O); permiten establecer la presencia de fenoles. Respecto a la profundidad de la muestra colectada, estas señales presentan el mismo patrón que las señales asignadas a los ácidos carboxílicos: aumento relativo en los primeros 10 cm de profundidad, manteniéndose constante la señal a mayor profundidad.

Las señales a $3215,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H asociado) y $1034,3\text{ cm}^{-1}$ (C-O-H), corresponden a grupos alcohol, la intensidad relativa de esta señal se mantiene constante al aumentar la profundidad de la muestra. La señal a $1625,5\text{ cm}^{-1}$ confirma la presencia de quinonas, grupos funcionales importantes en los procesos de oxidación-reducción en suelo, la intensidad de esta señal se mantiene constante respecto a la profundidad de la muestra.

El análisis de estas señales permite establecer que a una mayor profundidad, se presenta una estructura más "madura", el contenido de ácidos carboxílicos disminuye, aumentando las estructuras esterificadas que favorecen la estabilización de las estructuras polares, además de obtener una estructura más aromática que oxidada (Kononova 1982).

Figura 16 Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino (BP)



8.3.2 Zona Bosque de Pino-Encino (BPE)

Los espectros IR de los ácidos húmicos provenientes de muestras de suelo del Bosque de Pino-Encino a diferentes profundidades se presentan en la Figura 17. La señal a $2921,2\text{ cm}^{-1}$ se asigna a estructuras de cadenas alifáticas (enlace C-H), la posición e intensidad respecto a la profundidad fue similar, lo que nos indica que la estructura alifática se mantiene constante en el perfil.

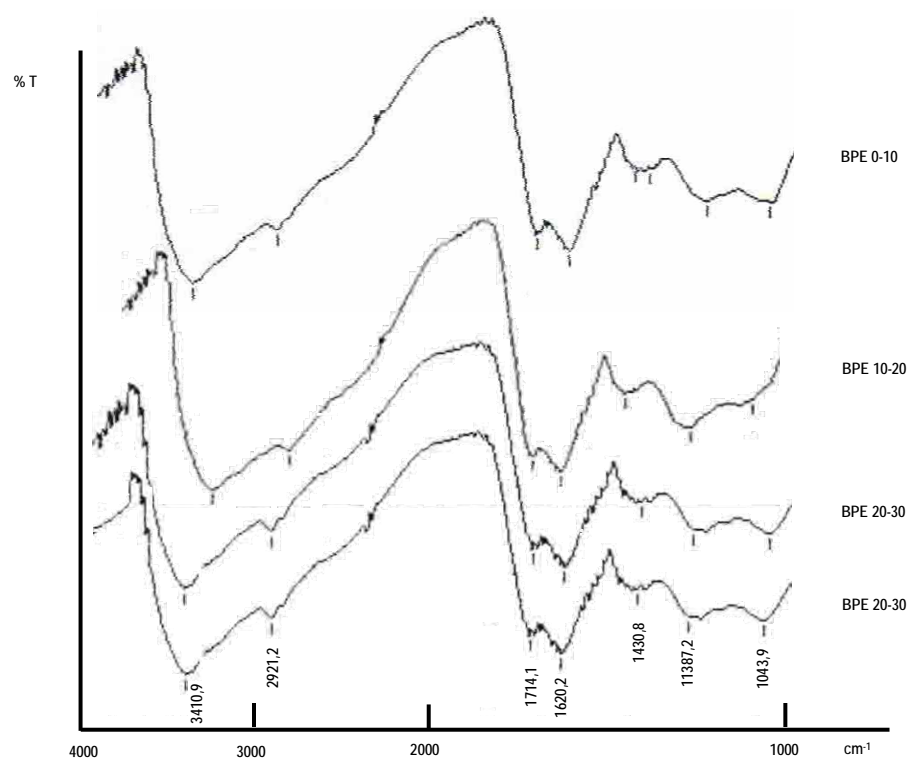
Las señales a $3410,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), $1714,1\text{ cm}^{-1}$ (C=O) y $1430,8\text{ cm}^{-1}$ (C-O), hace evidente la presencia de ácidos carboxílicos. La señal a $1714,1$ asignada al carbonilo presentó un discreto aumento relativo en los primeros 10 cm de profundidad, al aumentar la profundidad se observa constante la señal, lo que es indicativo de una estabilización en la estructura de los ácidos carboxílicos en cadenas alifáticas así como asociados a estructuras aromáticas.

Las señales que se presentan a $3410,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), en combinación con la señal a $1223,7\text{ cm}^{-1}$ (C-O); permiten establecer la presencia de fenoles. Respecto a la profundidad de la muestra colectada, estas señales presentan el mismo patrón que las señales asignadas a los ácidos carboxílicos.

Las señales a $3410,9\text{ cm}^{-1}$ (O-H asociado) y $1043,9\text{ cm}^{-1}$ (C-O-H), corresponden a grupos alcohol, resulta evidente que la señal se mantiene constante al aumentar la profundidad de la muestra.

La señal a $1620,2\text{ cm}^{-1}$ confirma la presencia de quinonas, grupos funcionales importantes en los procesos de oxido-reducción en suelo, la señal se mantiene constante respecto a la profundidad.

Figura 17 Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades:
Bosque Pino – Encino (BPE)



8.3.3 Zona San Juan Parcela (SJP)

La Figura 18 muestra el espectro de los ácidos húmicos obtenidos de la extracción del suelo proveniente de San Juan Parcela. La presencia de ácidos carboxílicos se confirma por la presencia de las señales a $3445,5\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), $1714,1\text{ cm}^{-1}$ (C=O) y $1436,2\text{ cm}^{-1}$ (C-O), la señal asignada al carbonilo $1714,1\text{ cm}^{-1}$ en la muestra proveniente de suelo a una profundidad de 0-10 cm resulta muy pequeña respecto al resto de las profundidades, lo que nos evidencia que en la parcela de cultivo a menor profundidad menor evolución oxidativa en la materia orgánica que la conforma. Esta señal presentó un aumento relativo en profundidades subsecuentes, lo que es indicativo de una mayor oxidación y como consecuencia mayor estabilización en la estructura de los ácidos carboxílicos en cadenas alifáticas y aromáticas.

Las señales que se presentan a $3445,5\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), en combinación con la señal a $1033,0\text{ cm}^{-1}$ (C-O); permiten establecer la presencia de alcoholes primarios. Respecto a la profundidad de la muestra colectada, estas señales presentan el mismo patrón que las señales asignadas a los ácidos carboxílicos.

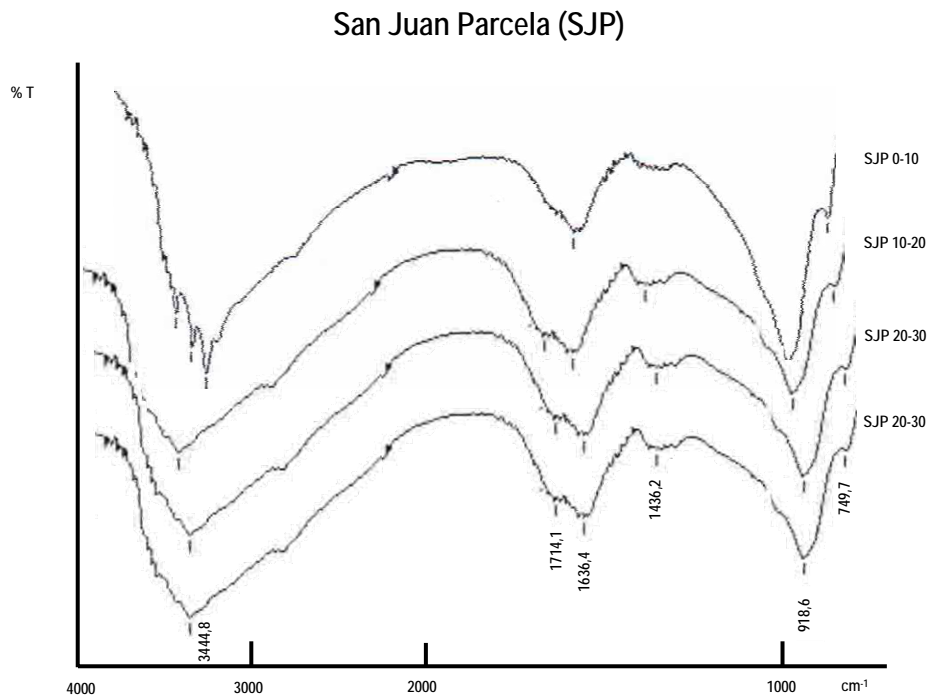
Las señales a $3445,5\text{ cm}^{-1}$ (O-H asociado) y $1033,0\text{ cm}^{-1}$ (C-O-H), corresponden a grupos alcohol, resulta evidente que la señal se mantiene constante al aumentar la profundidad de la muestra.

Con la señal a $1654,0\text{ cm}^{-1}$ que se asigna a enlaces tipo nitrato $-O-NO_2$, y con ausencia de la señal a $1620,2\text{ cm}^{-1}$ para grupos funcionales tipo quinona, se concluye que los procesos de óxido-reducción a través de este tipo de compuestos se encuentra diferente respecto a los procesos que se llevan a cabo de manera natural en el bosque de pino y el bosque de pino-encino.

A pesar de lo impactado del suelo, se observa nuevamente que al aumentar la profundidad la presencia de las señales debido a los ácidos carboxílicos aumentan en intensidad, lo que nos permite establecer que a una mayor profundidad, se presenta una estructura más "madura" u oxidada de la materia orgánica (Kononova, 1982).

En los espectros IR en este tipo de suelo a una profundidad entre 0-10 cm, se presentan tres señales definidas entre 3300 y 3500 cm^{-1} , las cuales no es usual observar en sistemas tan complejos como la materia orgánica del suelo, y es posible asignarlas a grupos amino, $-\text{NH}_2$, $-\text{NRH}$ ó NR_2 , favorecida su presencia tal vez por procesos de fertilización a base de sales de amonio.

Figura 18 Espectros ácidos húmicos en muestras de suelo a diferentes profundidades:



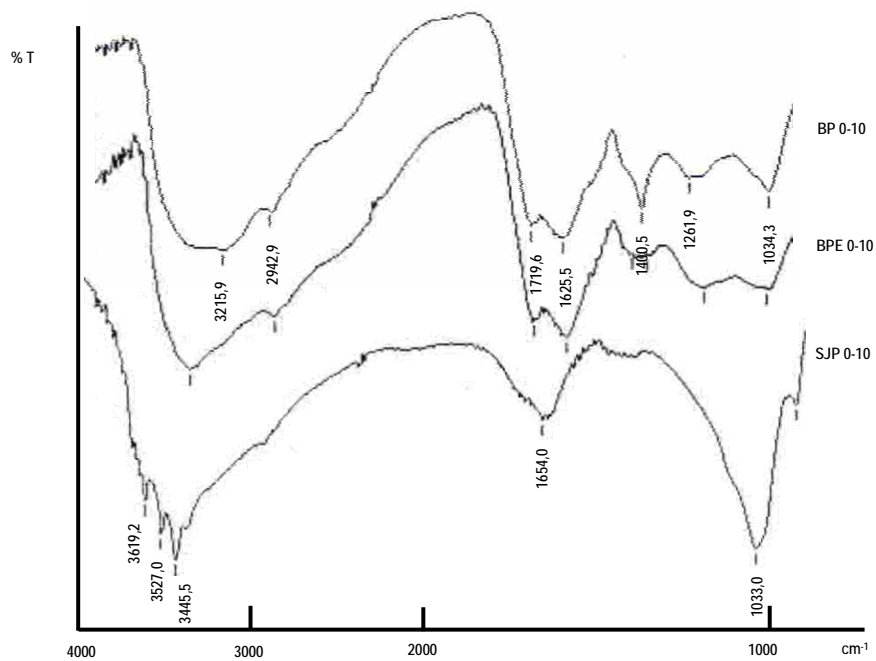
8.3.4 Espectros de ácidos húmicos por zona a la profundidad 0-10 cm.

La materia orgánica del suelo se caracteriza por la presencia de grupos funcionales oxidados, como son los ácidos carboxílicos, los ésteres los cuales son productos de síntesis entre los ácidos carboxílicos, los fenoles y los alcoholes (provenientes de oxidación de cadenas alifáticas o de polisacáridos), todos ellos soportados en una estructura de átomos de carbono tanto aromáticos como alifáticos, siendo los ácidos húmicos sustancias representativas de la transformación de la materia orgánica.

La Figura 19, nos muestra comparativamente los espectros IR de los ácidos húmicos provenientes de las muestras de suelo de las tres zonas de estudio a la profundidad inicial de 0-10 cm.

Resulta evidente desde el análisis de los espectros IR, que en el caso de los ácidos húmicos provenientes de las dos zonas de bosque (BP, BPE), se observan las señales características de los ácidos carboxílicos ($1719,6\text{ cm}^{-1}$, para el C=O), esta misma señal no se observa en la misma intensidad relativa que las anteriores en el caso de la muestra proveniente de San Juan Parcela, se observa además que la señal a $1033,0\text{ cm}^{-1}$ que se asigna al enlace C-O-H para polisacáridos muestra una intensidad mayor en el caso de la muestra San Juan Parcela respecto a las dos anteriores lo que nos indica que la transformación (oxidación), de la materia orgánica en San Juan Parcela es mucho menor que en las muestras de suelo proveniente de los bosques. Sin embargo en la muestra de SJP se observan señales definidas entre 3300 cm^{-1} y 3500 cm^{-1} , las cuales no es usual observar en sistemas tan complejos como la materia orgánica del suelo, y es posible asignarlas a grupos amino, $-\text{NH}_2$, $-\text{NRH}$ ó NR_2 , favorecida su presencia tal vez por procesos de fertilización a base de sales de amonio.

Figura 19 Espectros comparativos ácidos húmicos en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm



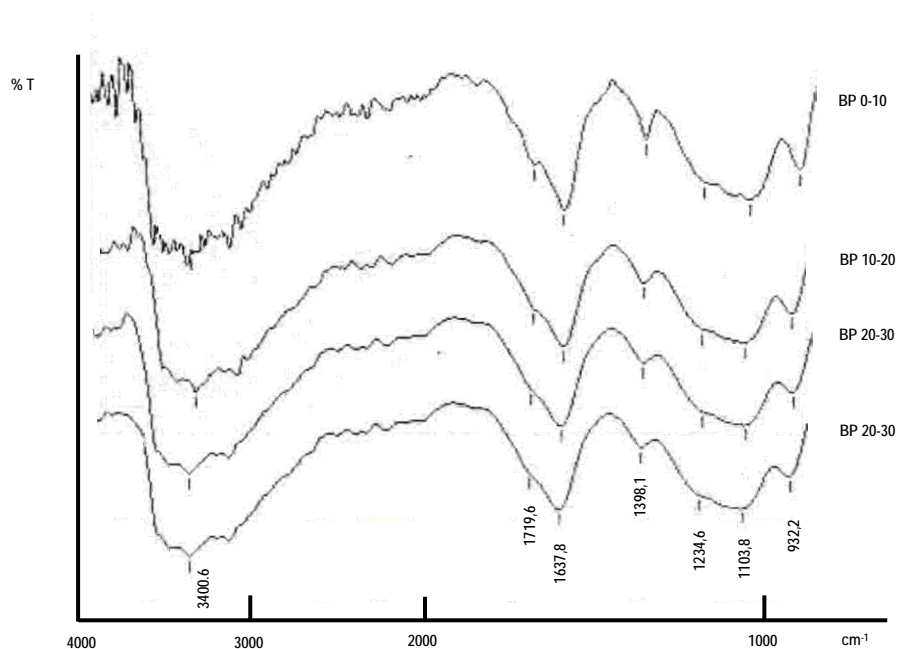
8.4 Espectros de ácidos fúlvicos

8.4.1 Zona Bosque de Pino (BP)

La Figura 20 muestra el espectro para ácidos fúlvicos proveniente de la muestra de suelo del Bosque de Pino. Las señales asignadas a los ácidos carboxílicos a $1719,6\text{ cm}^{-1}$ (C=O), $3400,6\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado) y $1398,1\text{ cm}^{-1}$ (C-O), muestran una disminución en la intensidad de la señal a $1716,6$ asignada al carbonilo, así mismo muestra una intensidad menor respecto a la señal a $1637,8\text{ cm}^{-1}$ que se asigna al grupo funcional tipo quinona, esto es congruente con una estructura para ácidos fúlvicos en donde los grupos oxidados predominantemente son aromáticos. Las estructuras aromáticas y fenólicas se pueden establecer por la presencia de las señales a $3400,6\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), $1234,6\text{ cm}^{-1}$ (C-O-H), $962,2\text{ cm}^{-1}$ (C=C aromático). La señal asignada al grupo funcional quinona en $1637,8\text{ cm}^{-1}$, se presenta constante al aumentar la profundidad del suelo.

En la región de $1103,8\text{ cm}^{-1}$ están situadas las señales que caracterizan el enlace (C-O) de ésteres y alcoholes la cuál es constante al aumentar la profundidad.

Figura 20 Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades:
Bosque Pino (BP):

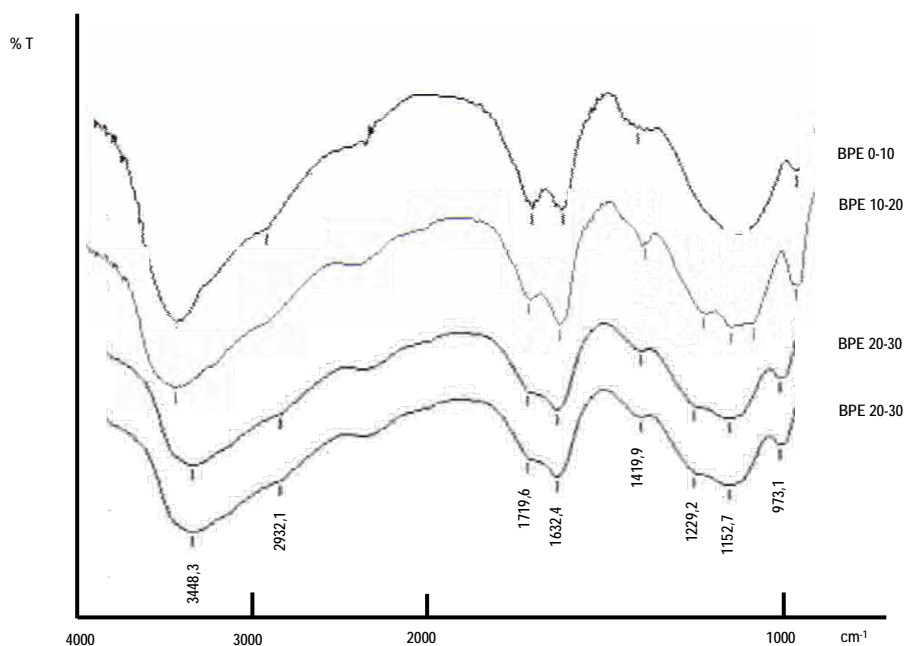


8.4.2 Bosque de Pino – Encino (BPE)

La Figura 21 muestra el espectro de los ácidos fúlvicos para la muestra de suelo proveniente del Bosque de Pino-Encino donde las señales asignadas a los ácidos carboxílicos a $1719,6\text{ cm}^{-1}$ (C=O), $3448,3\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado) y $1419,9\text{ cm}^{-1}$ (C-O), disminuyen en cuanto a la intensidad relativa respecto a la profundidad.

Las estructuras aromáticas y fenólicas se pueden establecer por la presencia de las señales a $3448,3\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), $1229,2\text{ cm}^{-1}$ (C-O-H), $973,1\text{ cm}^{-1}$ (C=C aromático). Las señales intensas a $3448,3\text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado) y $1152,7\text{ cm}^{-1}$ se deben a la presencia importante de grupos -O-H, provenientes de polisacáridos principalmente. La señal asignada al grupo funcional quinona en $1632,4\text{ cm}^{-1}$, presenta una ligera disminución en su definición al aumentar la profundidad del suelo. En la región de $1152,7\text{ cm}^{-1}$ están situadas las señales que caracterizan el enlace (C-O) de ésteres y alcoholes.

Figura 21 Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades: Bosque Pino – Encino (BPE)



8.4.3 San Juan Parcela (SJP)

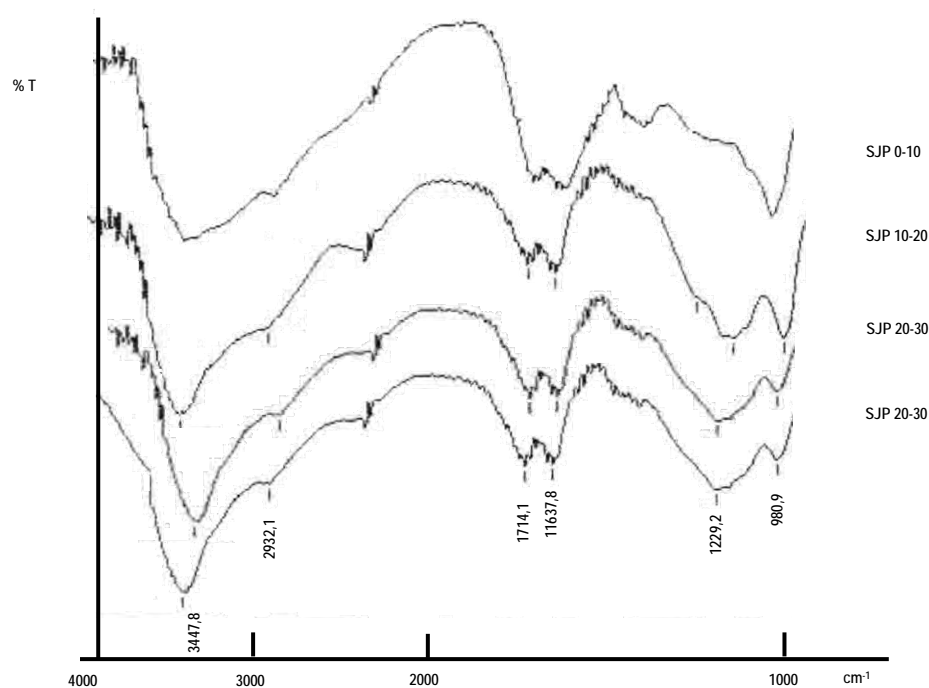
La Figura 22 muestra el espectro para ácidos fúlvicos de la muestra de suelo proveniente de la Zona de San Juan Parcela donde la señal asignada al grupo carbonilo de ácido carboxílico a $1714,1 \text{ cm}^{-1}$ a (C=O), se mantiene constante, sin embargo la señal a $3447,8 \text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado), presenta un cambio significativo al aumentar la profundidad ya que al observarse una señal mas fina nos indica que los ácidos carboxílicos al aumentar la profundidad se esterifican formando compuestos menos polares y la señal ancha remanente en esta posiciones ($3447,8 \text{ cm}^{-1}$), se debe a los grupos -O-H provenientes de polisacáridos, alcoholes y fenoles.

Las estructuras aromáticas y fenólicas se pueden establecer por la presencia de las señales a $3447,8 \text{ cm}^{-1}$ (O-H, asociado) y $980,9 \text{ cm}^{-1}$ (C=C aromático).

La señal asignada al grupo funcional quinona en $1637,8 \text{ cm}^{-1}$, presenta una ligera disminución en su definición al aumentar la profundidad del suelo. En la región de $1125,5 \text{ cm}^{-1}$ están situadas las señales que caracterizan el enlace (C-O) de ésteres y alcoholes.

Figura 22 Espectros ácidos fúlvicos en muestras de suelo a diferentes profundidades:

San Juan Parcela (SJP)

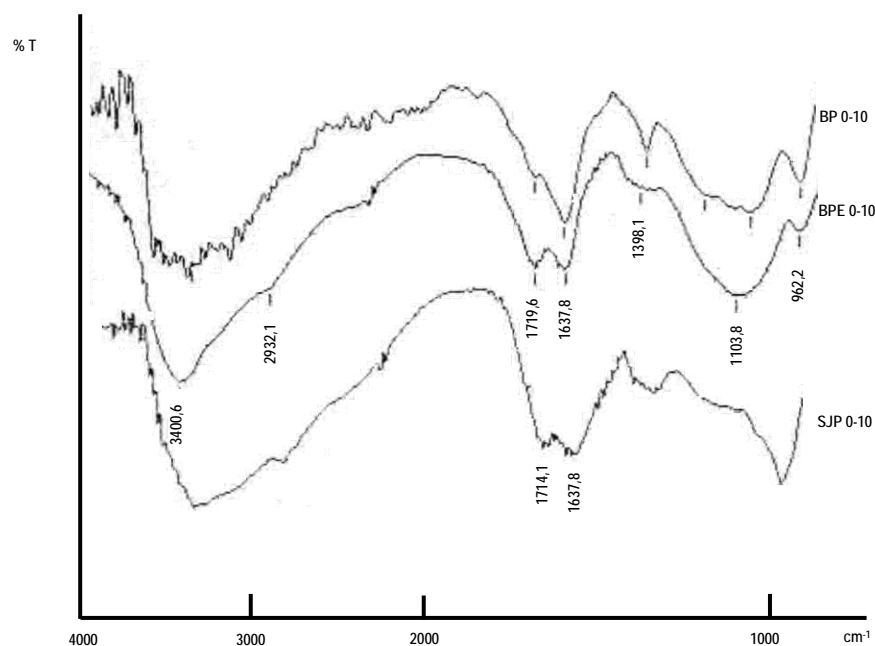


8.4.4 Espectros ácidos fulvicos por zona a la profundidad 0-10 cm.

La Figura 23, nos muestra comparativamente los espectros IR de los ácidos fúlvicos provenientes de las muestras de suelo de las tres zonas de estudio a la profundidad inicial de 0-10 cm.

Las señales a $1714,1 \text{ cm}^{-1}$ y a $1719,6 \text{ cm}^{-1}$ disminuye en el BP debido a que principalmente tenemos grupos fenol, al aumentar esta señal en la muestra de SJP nos indica una mayor esterificación de los alcoholes y fenoles de bajo peso molecular, la señal a $962,2 \text{ cm}^{-1}$ se muestra con mayor intensidad relativa respecto a las muestras BP y BPE, lo que es indicativo de una mayor estructura aromática en la materia orgánica. La señal asignada al grupo funcional quinona se mantiene constante en los tres sitios.

Figura 23 Espectros comparativos ácidos fúlvicos en muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm por zona



8.5 Parámetros edáficos

En la Cuadro 7 se incluyen los resultados para pH, carbón orgánico total (COT), materia orgánica (MO) y textura para las zonas de Bosque de Pino, Pino – Encino y San Juan Parcela.

Cuadro 7 Resultados de parámetros edáficos evaluados

Zona	Profundidad	pH (U pH)	T (°C)	COT (%)	MO (%)G	Textura	Símbolo
Bosque Pino	0-10	5,29	25,00	3,16	5,45	Arena Migajosa	Am
	10-20	5,35	25,00	2,19	3,79	Arena Migajosa	Am
	20-30	5,35	25,00	1,79	3,10	Arena Migajosa	Am
	30-40	5,37	25,00	1,71	2,96	Arena Migajosa	Am
Bosque Encino	0-10	5,82	25,00	3,39	5,86	Areana Migajosa	Am
	10-20	5,80	25,00	2,51	4,34	Arena Migajosa	Am
	20-30	5,93	25,00	2,32	4,00	Arena Migajosa	Am
	30-40	5,97	25,00	2,27	3,93	Areana Migajosa	Am
San Juan Parcela	0-10	5,88	25,00	1,16	2,00	Arena Migajosa	Am
	10-20	5,49	25,00	0,67	1,17	Arena	A
	20-30	5,28	25,00	0,95	1,65	Arena	A
	30-40	5,67	25,00	0,83	1,44	Arena Migajosa	Am

Bosque de Pino

El Bosque de Pino es una comunidad siempre verde constituida por pinos, los cuales se encuentran asociados con encinares y otras especies. Se trata de poblaciones arboladas que tienen un crecimiento relativamente rápido, muchos de ellos son resistentes a los incendios, a las sequías y soportan el pastoreo, además, los bosques de pino tienen una estructura muy homogénea pues generalmente las poblaciones se componen de unas cuantas especies, lo que facilita las tareas de explotación, por esto es sometido a una intensa explotación forestal comercial.

La vegetación está dominada por diferentes especies de pino que alcanzan una altura promedio de 15 a 30 metros, los pinares tienen un estrato inferior relativamente pobre en arbustos, pero con abundancia de gramíneas, esta condición se relaciona con los frecuentes incendios y la tala inmoderada.

Gran parte de estos bosques se asientan en las partes altas de las sierras volcánicas del estado, en las laderas de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl a altitudes entre 2 500 msnm y 4 000 msnm; crecen sobre suelos profundos tipo Andosol.

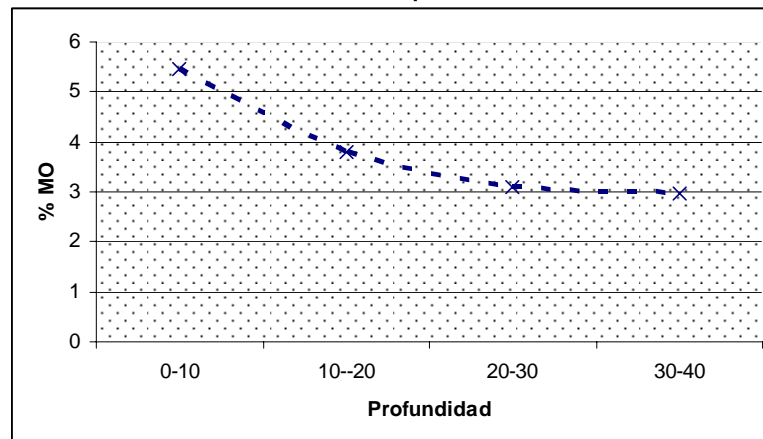
El pH promedio obtenido para esta zona fue de 5,34 lo que denota una acidez moderada característica para bosques y suelos de tipo Andosol Húmico; esta ligera acidez puede deberse a la cantidad de materia orgánica presente ya que ésta contiene grupos reactivos carboxilo y fenólicos que son capaces de liberar iones H^+ ya que estos grupos funcionales se comportan como ácidos débiles (Villanueva, 1990).

Respecto a la textura se determinó una clase textural de Arena Migajosa (Am).

Para la materia orgánica se observó que ésta disminuye conforme aumenta la profundidad, para la muestra de 0-10 cm el valor fue de 5,45 %, mientras que para la muestra de 30-40 cm el valor fue de 2,96 %. Como es de esperarse el contenido de materia orgánica en el subsuelo es generalmente mucho más bajo que en los horizontes superficiales. Esto se explica al considerar que la mayoría de los residuos orgánicos se incorporan o depositan sobre la superficie (Villanueva, 1990). En la Figura 24 se muestra comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad.

Respecto al valor reportado para suelos de tipo Andosol Húmico la Síntesis de Información Geográfica del Estado de México reporta valores de 5,42 % de materia orgánica para suelos a una profundidad de 4-11 cm; mientras que para suelo a una profundidad de 30-46 cm se tiene un valor de 4,10 %.

Figura 24 Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de Bosque de Pino



Finalmente para el carbón orgánico total el valor obtenido para la muestra de 0-10 cm fue de 3,16 %, mientras que para la muestra de 30-40 cm fue de 1,71 %; al igual que los resultados para materia orgánica el porcentaje de carbón orgánico total disminuye respecto a la profundidad.

Bosque de Pino - Encino

Es una comunidad de bosque ampliamente distribuida en la entidad y está compartida por diferentes especies de pinos y encinos; dependiendo del dominio de unos u otros se denominan como bosque de pino-encino cuando predominan las coníferas.

Los bosques de Pino-Encino en el territorio mexiquense se distribuyen a una altitud que varía de 2 000 msnm a 3 000 msnm, se desarrollan sobre suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario en su mayoría del tipo Andosol, Cambisol, Regosol y Luvisol; generalmente son de color negro, en ocasiones rojo o gris con una profundidad variable y poco contenido de materia orgánica, son susceptibles a la erosión, la precipitación promedio en estos lugares fluctúa de 1 000 mm a 1 500 mm anuales, la temperatura media anual va de 10 °C a 20 °C, la mayor parte de esta vegetación se encuentra en los climas templados subhúmedos con lluvias en verano, en algunos casos en climas semicálidos subhúmedos con lluvias en verano. La condición secundaria que presentan estas asociaciones es consecuencia de la tala inmoderada y de los incendios provocados por el hombre, por ello, existe una gran variación en su composición florística; la mayor parte de estos bosques han sido explotados con fines maderables, para la extracción de trozas para aserrío, leña, carbón y para la obtención de resina para la industria, la cual se obtiene principalmente del *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*, el manejo inadecuado provoca que tengan un uso agrícola o bien para inducir pastizales los cuales soportan la actividad del ganado bovino y ovino.

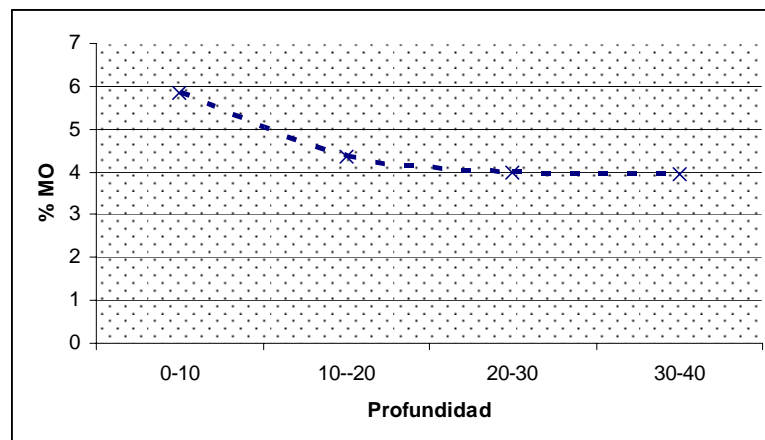
El pH promedio obtenido para esta zona fue de 5,88 lo que denota una acidez moderada característica para bosques y suelos de tipo Andosol Húmico; esta ligera acidez puede deberse a la cantidad de materia orgánica presente ya que ésta contiene grupos reactivos de carboxilo ó fenólicos que son capaces de ligar iones H⁺; tales grupos saturados de H⁺ se comportan como ácidos débiles (Villanueva, 1990).

Respecto a la textura se determinó una clase textural de Arena Migajosa (Am).

Para la materia orgánica se observó que ésta disminuye conforme aumenta la profundidad, para la muestra de 0-10 cm el valor fue de 5,86 %, mientras que para la muestra de 30-40 cm el valor fue de 3,93 %. Como es de esperarse el contenido de materia orgánica en el subsuelo es generalmente mucho más bajo que en los horizontes superficiales. Esto se explica al considerar que la mayoría de los residuos orgánicos se incorporan o depositan sobre la superficie (Villanueva, 1990). En la Figura 25 se muestra comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad.

Respecto al valor reportado para suelos de tipo Andosol Húmico la Síntesis de Información Geográfica del Estado de México reporta valores de 5,42 % de materia orgánica para suelos a una profundidad de 4-11 cm; mientras que para suelo a una profundidad de 30-46 cm se tiene un valor de 4,10 %.

Figura 25 Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de Pino-Encino



Finalmente para el carbón orgánico total el valor obtenido para la muestra de 0-10 cm es de 3,39 %, mientras que para la muestra de 30-40 cm fue de 2,27 %; al igual que los resultados para materia orgánica el porcentaje de carbón orgánico total disminuye respecto a la profundidad.

San Juan Parcela

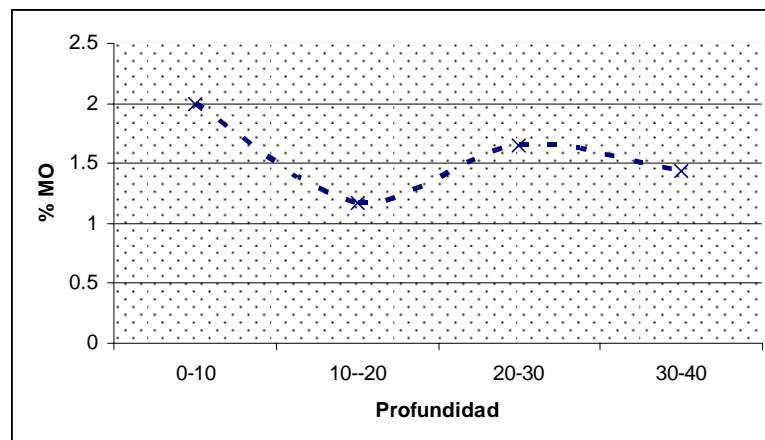
Esta zona es destinada al cultivo de temporal.

El pH promedio obtenido para esta zona fue de 5,58 lo que denota una acidez moderada, ésta acidez se puede deber a que anteriormente la zona era una zona boscosa.

Se determinó una clase textural de Arena Migajosa (Am) para las muestras de 0-10 y 30-40 cm, mientras que para las muestras de 10-20 y 20-30 se determinó como Arena (A).

Para la materia orgánica se observó que ésta presenta variaciones a sus diferentes profundidades; estas variaciones se deben a distribuciones irregulares en la columna producto del acarreo del suelo por las actividades de labranza (Villanueva, 1990). En la Figura 26 se muestra comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad.

Figura 26 Comportamiento de la materia orgánica respecto a la profundidad en muestras de suelo de San Juan Parcela



Finalmente para el carbón orgánico total el valor obtenido para la muestra de 0-10 cm es de 1,16 %, mientras que para la muestra de 30-40 cm fue de 0,83 %.

Para la zona denominada San Juan Parcela el incremento poblacional y sus requerimientos de alimento y espacio han propiciado una mayor demanda del suelo y, con ello, presiones más intensas para cambiar su vocación natural hacia otros usos. La eliminación de la cubierta vegetal para habilitar terrenos dedicados a las actividades agropecuarias quizá sea el ejemplo más evidente de lo anterior, aunque también ocurren cambios a usos urbanos, incluso de sitios que anteriormente estaban dedicados a las actividades agrícolas o pecuarias. La eliminación de la cubierta vegetal natural, acompañada por el mal uso de las superficies recién abiertas, promueve la degradación del suelo, afectando su uso actual y futuro.

De acuerdo a los Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México, Editado por SEMARNAT en el 2005 entre los efectos más importantes de la degradación del suelo se encuentra la pérdida de la materia orgánica del suelo, lo que impide el desarrollo de las estructuras de los horizontes superficiales del mismo y los hace más susceptibles a la erosión y degradación. Cuando este proceso se mantiene, las plantas, los animales y los procesos ecológicos que producen los servicios ambientales (e.g., la recarga de los mantos acuíferos y la captura de carbono) también resultan afectados y enfrentan problemas para su permanencia y funcionamiento futuros.

9. CONCLUSIONES

El espectro IR refleja el predominio del contenido de oxígeno en grupos funcionales como, ácidos carboxílicos (R-CO₂H), hidroxilo (R-OH, Ar-OH) y carbonilo (R₂-C=O) en materiales húmicos.

Entre los productos de oxidación se han extraído fenoles, quinonas y ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales, al parecer, son productos derivados de la desintegración de los anillos bencénicos.

La extracción con hexano y de acuerdo a las señales observadas nos permiten concluir que la materia orgánica extraída con este disolvente esta formada por esteres alifáticos y aromáticos en las tres zonas de estudio.

Para los espectros extraídos con cloroformo las señales que se asignan a los grupos ester (1728,1 cm⁻¹ 1265,0 cm⁻¹), son de mayor intensidad relativa en las muestras de la zona BP y BPE respecto a la zona SJP, siendo en estas dos primeras zonas mas eficientes los procesos de oxidación y estabilización de estructuras orgánicas oxidadas de bajo peso molecular. El resto de las señales son similares en las tres zonas en estudio.

En el caso de los ácidos húmicos provenientes de las dos zonas de bosque (BP, BPE), se observan las señales características de los ácidos carboxílicos (1719,6 cm⁻¹, para el C=O), esta misma señal no se observa en la misma intensidad relativa que las anteriores en el caso de la muestra proveniente de San Juan Parcela, se observa además que la señal a 1033,0 cm⁻¹ que se asigna al enlace C-O-H para polisacáridos muestra una intensidad mayor en el caso de la muestra San Juan Parcela respecto a las dos anteriores lo que nos indica que la transformación (oxidación), de la materia orgánica en San Juan Parcela es mucho menor que en las muestras de suelo proveniente de los bosques.

El análisis de los espectros IR de los ácidos húmicos provenientes de la zona SJP, muestra una presencia de grupos poco oxidados (-OH de polisacáridos), respecto a los ácidos húmicos provenientes de las zonas PB y BPE.

Finalmente los ácidos fúlvicos muestran que las señales a $1714,1\text{ cm}^{-1}$ y a $1719,6\text{ cm}^{-1}$ disminuye en el BP debido a la presencia de grupos fenol, al aumentar esta señal en la muestra de SJP nos indica una mayor esterificación de los alcoholes y fenoles de bajo peso molecular.

Respecto al COT y la MO se observó que para ambas zonas agrícolas (Bosque de Pino y Bosque de Pino-Encino) la disminución en el porcentaje de COT y MO respecto a la profundidad, se debe principalmente a que el aporte de MO en esta zona ocurre principalmente en los horizontes superficiales; como consecuencia de la disposición de hojas, corteza, animales muertos, etc. y por lo tanto su descomposición origina un mayor contenido de MO en esta zona.

Para la zona agrícola el comportamiento de la MO y del COT presenta variaciones a sus diferentes profundidades; estas variaciones se deben a distribuciones irregulares en la columna producto del acarreo del suelo por las actividades de labranza.

Se observó que el contenido de MO y de COT es más alto para las muestras provenientes del Bosque de Pino y Pino-Encino y que el contenido en la muestra proveniente de San Juan Parcela es menor debido a que esta zona al estar desprovista de vegetación y en una constante labor de cultivo los procesos de huminificación son mínimos.

El pH encontrado para los tres sitios de muestreo corresponde a una acidez moderada, la cual puede deberse a la cantidad de materia orgánica presente ya que ésta contiene grupos reactivos de carboxilo ó fenólicos que son capaces de ligar iones H^+ ; tales grupos saturados de H^+ se comportan como ácidos débiles.

10. LITERATURA CITADA

- Bellamy L. J. 1975. The Infrared Spectra of Complex Molecules. Chapman and Hall. 3a ed. London.
- Bohn Hinrich L., Brian L. McNeal, y George A. O'Connor, y Mario Sánchez Orozco, 1993; Química del Suelo; México [DF]: Limusa, Grupo Noriega Editores.
- Buckman H. y Nyle C. Brady, 1982, Naturaleza y propiedades de los suelos, Editorial UTEHA, Estados Unidos.
- Cano J., Zavala D., Introducción a la Espectroscopia de Infrarrojo, México, Perkin Elmer de México, 1985.
- Castillo G.L., Arteaga M.M., Notas para el Curso de Espectroscopia Infrarroja, FES-Zaragoza, UNAM, 1992.
- Cepeda J., 1991, Química de suelos, Segunda Edición, Editorial Trillas, México.
- Cotler H. Estela Sotelo, Judith Domínguez, María Zorrilla, Sofía Cortina y Leticia Quiñónez, 2007. Gaceta Ecológica INE-SEMARNAT, No. 83: 1-73.
- Duchaufour D., 1984, Edafología, Ediciones Masson, Barcelona.
- Fassbender, 1987, Química de suelo con énfasis en suelos de América Latina, Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura, San José Costa Rica.
- Foth H., 1980, Fundamentos de la ciencia del suelo, Editorial Continental, México.
- Gaucher G., 1971, Tratado de Podología agrícola, El suelo y sus características agronómicas, Ediciones Omega, España.
- SEMARNAT, 2005; Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México.
- Invar Y., Y. Chen, y Y. Hadar. 1989. Solid-State Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance and Infrared Spectroscopy of Composted Organic Matter. Soil Science Society of American Journal. 53:1695-1701.
- Kononova, 1982, Materia Orgánica del Suelo, su naturaleza, propiedades y métodos de investigación, Editorial Oikos-tau, Barcelona.

-
- Lehtovaara, J., M. Herranen, y T. Nyrönen. 1988. IR-spectroscopy as an analytical method for identification of horticultural peat. *Acta Hortic.* 221:153-160.
 - López T.J., "Desarrollo y Validación de un método analítico para la cuantificación de Naproxen en tabletas por Espectroscopia en el Infrarrojo", Tesis: FES-Zaragoza, UNAM, 1996.
 - MacCarthy, P. 2001. The principles of Humic Substances. *Soil Science.* 166(11):738 – 751.
 - Mortvedt, J. J., P. M. Giordano, W. L. Lindsay. 1983 *Micronutrientes en Agricultura.* Ed. AGT Editor S.A. México.
 - Muscolo, A., M. Sidari, and E. Attima. Biological Activity of Humic Substances Is Related to Their Chemical Structure. *Soil Science Society of America* 71: 75 – 85 (2007).
 - Nardo, S., M. Tosoni and D.Pizzeghello, Chemical Characteristics and Biological Activity of Organic Substances Extracted from Soils by Root Exudates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:2012-2019 (2005).
 - Niemeyer, J., Y. Chen, and J. M. Bollag. 1992. Characterization of Humic Acids, Composts, and Peat by Diffuse Reflectance Fourier – Transform Infrared Spectroscopy. *Soil Science Society of America* 56: 135 – 140.
 - NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis publicada el 31 de Diciembre del 2002 en el Diario Oficial de la Federación.
 - NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación publicada el 29 de marzo de 2005 en el Diario Oficial de la Federación.
 - NOM-008-SCFI-2002 Sistema General de Unidades de Medida publicada el 27 de noviembre del 2002 en el Diario Oficial de la Federación.
 - PerKin Elmer de México, Notas para el Curso Básico de Espectroscopia Infrarroja, México, 1995.
 - Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlamanalco, Estado de México publicado en la Gaceta de Gobierno el 4 de Marzo del 2008.
 - Porta, C. J., R. M. López - Acevedo y L. C. Roquero. 1994. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente.* Ed. Mundi – Prensa. Madrid.

- Rusell E., 1968, Las condiciones del suelo, Editorial Aguilar, Madrid.
- Sánchez Mora A, 2008, Pequeño Manual de Apoyo para Redactar Textos Ambientales; SEMARNAT-INE-CONABIO. México.
- Sastriques O., 1982, La MOS y el humus de los suelos de Cuba, Editorial Academia, La Habana Cuba.
- Síntesis de Información Geográfica del Estado de México, 2003; INEGI.
- Schnitzer, M. and S. U. Khan. 1978. Soil Organic Matter. Ed. Elsevier Scientific. Publishing Company. Amsterdam, Netherlands.
- Schnitzer, M. and P. Schuppli. 1989. Method for the Sequential Extraction of Organic Matter from Soils and Soil Fractions; Soil Sci. Soc. Am. J. 53:1418-1424.
- Shriner, R. L., R. C. Fuson y D. Y. Curtin. 1991. Identificación Sistemática de Compuestos Orgánicos. Ed. Noriega. México.
- Schulten H. R. y M. Schnitzer. 1997. Chemical Model Structures for Soil Organic Matter and Soil. Soil Science 162 (2): 115 – 130.
- Skoog, D. A. y J. J. Leary. 1994. Análisis Instrumental. 4ª ed. Ed. Mc Graw Hill. España.
- Stevenson F. J., 1994, Humus Chemistry, Génesis, Composición, Reacciones, Segunda edición, Editorial John Wiley y Sons, New York.
- Thompson L. 1978, El suelo y su fertilidad, Editorial Reverté, México.
- Villanueva, 1990, Edafología, Universidad Autónoma Chapingo, México.

ANEXOS

ANEXO A

MÉTODO DE EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE MATERIA ORGÁNICA Y FRACCIONES DE SUELO.

(M. SCHNITZER AND P. SCHUPPLI 1989)

Reactivos.

Hexano.

Cloroformo.

Pirofosfato de sodio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$).

Hidróxido de sodio (NaOH)

Procedimiento.

Extracción secuencial de materia orgánica.

Soluciones extractantes:

Hexano

Cloroformo

Solución de pirofosfato de sodio 0,1 M bajo atmósfera de N_2

Solución de hidróxido de sodio 0,5 M bajo atmósfera de N_2 y agua destilada.

Procedimiento de la extracción:

- 10 g de la muestra de suelo es extraído en el extractor Soxhlet con 200 mL de hexano durante 12 horas. El extracto es filtrado y evaporado a presión reducida a un volumen de 1,0 mL aproximadamente en un rotavapor, posteriormente es transferido a tubos vial de 4 mL, evaporando a sequedad con una corriente de N_2 .
- El suelo residual es extraído en el extractor Soxhlet con 200 mL de cloroformo por 12 horas. El extracto es filtrado y evaporado a presión reducida a un volumen de 1,0 mL aproximadamente en un rotavapor, posteriormente es transferido a tubos vial de 4 mL, evaporando a sequedad con una corriente de N_2 .
- El suelo residual se coloca en un tubo de centrifuga de 200 mL, se le adiciona 100 mL de solución de pirofosfato de sodio, bajo atmósfera de N_2 se agita durante 24 horas. El extracto es filtrado y reducido a su más pequeño volumen en el rotavapor, posteriormente es transferido a tubos vial de 4 mL.
- El suelo residual se coloca en un tubo de centrifuga de 200 mL, se le adiciona 100 mL de solución de hidróxido de sodio, bajo atmósfera de N_2 se agita durante 24 horas. El extracto es filtrado y reducido a su más pequeño volumen en el rotavapor, posteriormente es transferido a tubos vial de 4 mL.
- El suelo residual se coloca en un tubo de centrifuga de 200 mL, se le adiciona 100 mL de agua destilada, bajo atmósfera de N_2 se agita durante 24 horas. El extracto es filtrado y reducido a su más pequeño volumen en el rotavapor, posteriormente es transferido a tubos vial de 4 mL.

Separación de sustancias húmicas.

Los extractos de pirofosfato de sodio y de hidróxido de sodio se resuspenden en 100 mL de agua destilada, se centrifuga para eliminar las partículas insolubles. El sobrenadante claro se acidifica a pH 1 con solución de HCl 6M, se deja a temperatura ambiente por 24 horas. Los ácidos fúlvicos quedan en solución y se separan del precipitado por centrifugar a 10 400 G durante 10 min. La solución que contiene los ácidos fúlvicos se secan a 30°C. Los ácidos húmicos precipitados se disuelven en el mínimo de solución 0,1 M de KOH/KCl, se deja la solución a temperatura ambiente por 4 horas, los sólidos que no se disuelven se eliminan por centrifugación. La solución clara que contiene los ácidos húmicos se acidifica a pH 1 con solución 6M de HCl y deja a temperatura ambiente 24 horas, se filtran los ácidos húmicos, se lavan con agua destilada.

Caracterización por espectroscopia IR.

Instrumento. Espectrofotómetro en el Infrarrojo con transformadas de Fourier Perkin Elmer 1600. La posición de las señales se da en número de onda (cm^{-1}).

Preparación de la muestra para análisis IR. Pulverizar en un mortero de ágata 5 mg de la muestra con 100 mg de bromuro de potasio y triturar hasta obtener un polvo fino, colocar la mezcla en una matriz de acero inoxidable y comprimir en una prensa hidráulica. Para obtener una pastilla de KBr, la cual se analiza en el espectrofotómetro IR.

Anexo B

Determinación de la Textura del Suelo, Análisis del Boyoucos.

Reactivos

H₂O₂ al 30 %.
Agua destilada.

Procedimiento

- Se pesan 60 g de suelo previamente tamizado en malla de 2 mm.
- Colocar el suelo en un vaso Berzelius de 400 mL.
- Añadir 20 mL de H₂O₂ al 30 % de 5 mL en 5 mL.
- Calentar a baño maría.
- Agitar hasta desaparecer el burbujeo.
- Continuar calentando y agitando hasta secar totalmente el suelo.
- Pesar 50 g y colocarlos en un vaso de agitador mecánico.
- Añadir 5 mL de cada dispersante y agua destilada a 2/3 del vaso.
- Agitar 15 minutos con agitador mecánico.
- Transferir completamente a una Probeta de 1 L y aferrarla.
- Tapar y agitar hasta lograr su homogenización.
- Al dejar de agitar, colocar el hidrómetro en la Probeta (T=0).
- Registrar la lectura del Hidrómetro a los 40 segundos y 120 minutos.
- Realizar los cálculos para conocer el % de arcilla, limo y arena.
- Determinar Clase Textural con apoyo del Triangulo de Texturas.

Cálculos.

$$\% \text{ Limo} + \% \text{ Arcilla} = \frac{\delta_1 + (T_1 - T_0) 0.36 \times 100}{\text{gramos de muestra}} = X$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{\delta_2 + (T_2 - T_0) 0.36 \times 100}{\text{gramos de muestra}} = A$$

$$\% \text{ Limo} = X - A$$

$$\% \text{ Arena} = 100\% - X = C.$$

δ_1 = Lectura del hidrómetro a los 40 segundos

δ_2 = Lectura del hidrómetro a los 120 minutos

Anexo C

pH.

(Potenciómetro)

Reactivos

Agua Destilada.

Procedimiento

- Pesar 10 g de muestra de suelo tamizado en 2 mm (malla 10).
- Colocar el suelo en u vaso de precipitado de 50 mL.
- Añadir 25 mL de agua destilada.
- Leer pH con ayuda del potenciómetro.
- Registrar el valor del pH.

Anexo D

Materia Orgánica, Método de Walkley y Black. (Jackson 1964)

Reactivos

Dicromato de potasio 1,0 N.
Sulfato ferroso 0,5 N.
Indicador de difenilamina.
Ácido sulfúrico concentrado.
Ácido fosfórico concentrado.
Fluoruro de sodio.

Procedimiento

- Se pesan 0,5 g de suelo tamizado en una malla de 2 mm, se colocan en un matraz erlenmeyer de 250 mL, se añaden 5 mL de dicromato de potasio 1,0 N y se agita.
- Se añaden 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y se agita durante 1 minuto, se deja reposar 30 minutos o hasta que se haya enfriado.
- Se añaden 100 mL de agua destilada, se agita y se deja enfriar.
- Agregar 5 mL de ácido fosfórico, 0,05 g de fluoruro de sodio y 10 a 15 gotas de indicador de difenilamina.
- Se titula con sulfato ferroso

Cálculos.

$$\%M.O. = 10 \left(1 - \frac{M}{B} \right) \times 1.34$$

M= mL de sulfato ferroso gastados en la muestra problema

B= mL de sulfato ferroso gastados en el blanco

El factor 1,34 se deduce de la siguiente forma

$$(1.0N) \times \frac{12}{4000} \times \frac{1.72}{0.77} \times \frac{100}{0.5} = 1.34$$

1,0 = normalidad del dicromato de potasio

12/4000 = peso miliequivalente del carbono

1,72= factor de transformación del carbono en materia orgánica (MO)

0,77= factor de recuperación de 77 % determinado por Walkey

0,50 peso de la muestra

Si el peso de la muestra analizada es diferente a 0,5 g se sustituye el peso del suelo analizados en la ecuación anterior para encontrar el factor correspondiente para calcular el porcentaje de MO.

Anexo E

Carbón Orgánico Total (Dicromato de Potasio).

Reactivos

Ácido Sulfúrico concentrado.
Solución de dicromato de potasio 2N.
Solución patrón glucosa.
Agua destilada.

Procedimiento

- Se pesa de 0,1 a 1 g de suelo seco al aire previamente tamizado en malla menor a 2 mm.
- Colocar muestras en matraz erlenmeyer de 250 mL.
- Agregar 10 mL de solución de dicromato de potasio 2N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado.
- Colocar matraces en estufa a 120 °C durante 90 minutos.
- Colocar la solución obtenida en matraces aforados de 100 mL, lavar con agua destilada y aforar.
- Vaciar alícuota en tubos de centrifuga y centrifugar durante 10 minutos a 2500 rpm.
- Vaciar sobrante en las celdas del fotómetro y determinar la extinción de la solución a 578 nm.
- Preparar curva patrón.
- Registrar resultados.