



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CALIDAD DE LA MATERIA ORGANICA DE SUELO BAJO
DIFERENTES USOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

BRAYAN CONTRERAS SALDIVAR

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ROCIO VACA PAULIN**

**COORDIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE ALBERTO LUGO DE
LA FUENTE**



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

MAYO de 2024

Índice

1. Resumen.....	9
2. Introducción.....	11
3. Antecedentes	13
3.1 Suelo	13
3.1.1. Propiedades del suelo.....	14
3.1.1.1. Propiedades físicas	14
3.1.1.1.1. Densidad aparente.....	15
3.1.1.1.2 Textura.....	16
3.1.1.2. Propiedades químicas	18
3.1.1.2.1 pH	18
3.2 Materia orgánica (MO).....	20
3.2.1. Calidad de la MO	24
3.3. Materia orgánica soluble (MOS)	25
3.4 Sustancias húmicas (SH)	27
3.5. Ácidos húmicos (AH)	30
3.5.1. Características	30
3.5.2. Propiedades.....	33
3.5.3. Importancia	36
3.6. Uso de suelo.....	37
3.7. Espectrofotometría de infrarrojo	38

4. Justificación.....	41
5. Objetivos	42
5.1. Objetivo general	42
5.2. Objetivos específicos.....	42
6. Materiales y métodos	43
6.1. Área de muestreo	43
6.2. Muestreo.....	43
6.3. Análisis de laboratorio	44
6.3.1. Pruebas fisicoquímicas	44
6.3.2. Extracción de materia orgánica soluble (MOS).....	44
6.3.3. Extracción de ácidos húmicos (AH)	45
6.3.4. Espectrofotometría de infrarrojo.....	45
7. Resultados y discusión	46
7.1. Evaluación de las pruebas fisicoquímicas	46
7.2. Densidades Ópticas	49
7.2.1. Caracterización de materia orgánica soluble	49
7.2.3. Espectrofotometría infrarrojo de los ácidos húmicos (AH)	56
7.3. Densidades ópticas relativas.....	61
7.3.1. Densidades ópticas relativas de MOS	61
7.3.2 Densidades ópticas relativas de AH.....	63

8. Conclusiones.....	65
9. Referencias.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Triángulo de texturas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [FAO], s.f.).....	17
Figura 2. Clasificación de la materia orgánica (Strosser, 2010).....	23
Figura 3. Modelo de estructura de AH (Gomes <i>et al.</i> , 2016).....	32
Figura 4. Reacciones redox de las quinonas (Gomes <i>et al.</i> , 2016)	33
Figura 5. Efectos del pH en la molécula de ácidos húmicos. (A) pH alcalino: repulsión de cargas. (B) Disminución del pH: agregación intramolecular. (C) Disminución del pH: agregación intermolecular. (D) pH ácido: precipitación (Gomes <i>et al.</i> , 2016).....	35
Figura 6. Esquema del espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (Gutiérrez, 1997).....	40
Figura 7. Espectro infrarrojo de la materia orgánica soluble. B, bosque; Br, bosque reforestado; M, cultivo de maíz; P, pastizal.	51
Figura 8. Espectros IR de la materia orgánica soluble; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.	52

Figura 9. Segunda derivada de MO; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.....	55
Figura 10. Espectro infrarrojo de los ácidos húmicos. B, bosque; Br, bosque reforestado; M, cultivo de maíz; P, pastizal.....	58
Figura 11. Espectros IR de los ácidos húmicos; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.....	59
Figura 12. Segunda derivada de AH; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.....	60

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados de los análisis fisicoquímicos.	47
Tabla 2. Densidades ópticas relativas de las principales bandas de los espectros infrarrojos de la materia orgánica soluble de los distintos usos de suelo (Bosque, cultivo de maíz, pastizal y bosque reforestado) respecto a C-H aromático (1650 cm^{-1}) y C-H alifático (1125 cm^{-1})	62
Tabla 3. Densidades ópticas relativas de las principales bandas de los espectros infrarrojos de ácidos húmicos de los distintos usos de suelo (Bosque, cultivo de maíz, pastizal y bosque reforestado) respecto a C-H aromático (1510 cm^{-1}).....	64

1. Resumen

México se encuentra entre los países con un mayor índice de deforestación a nivel mundial, donde la mayor parte de esta deforestación se concentra en el centro del país (Bocco *et al.*, 2001) estos cambios de uso de suelo afectan su calidad y salud debido a diversos factores tales como la degradación forestal, cambios en el microclima, pérdida de especies, capacidad productiva de los ecosistemas, degradación y pérdida del propio suelo, la cual está asociada a fuertes impactos ambientales (Bocco *et al.*, 2001; López-Vázquez *et al.*, 2015).

Una de las propiedades importantes que presenta el suelo es la materia orgánica por lo cual un estudio con más precisión consiste en analizar sus grupos funcionales en las sustancias húmicas, para de esta forma conocer si han sido impactados por los procesos de cambio de uso de suelo, por lo que el objetivo del presente trabajo fue determinar los grupos funcionales de la materia orgánica de suelos a través de espectrofotometría de infrarrojo, para evaluar la calidad de esta bajo diferentes usos de suelo. Se colectaron muestras compuestas de 4 diferentes usos de suelo siendo estos: bosque natural (B), bosque reforestado (Br), pastizal (P) y cultivo de maíz (M), a los cuales se les determinaron pruebas fisicoquímicas como textura, densidad aparente (DA), pH y materia orgánica (MO) con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000; además se llevó a cabo la caracterización de los grupos funcionales de la materia orgánica soluble (MOS) y ácidos húmicos (AH) mediante espectrofotometría de infrarrojo. Los resultados indican que el suelo de bosque y maíz tienen un pH apto para la asimilación de nutrientes, la DA es menor a 1 g/cm^3 siendo este un valor

normal para suelos volcánicos, la textura para B y Br es franco arcillo-arenosa, para M franco arenosa y para P arenosa, mientras que, de acuerdo a la NOM-021.SEMARNAT-2000 el porcentaje de MO fue muy alto en B, alto en P, medio en Br y muy bajo en M.

Los espectros de infrarrojo (IR) tanto de materia orgánica soluble (MOS) y de ácidos húmicos (AH) son cualitativamente similares sin embargo presentan diferencias semicuantitativas, para la MOS, Br presento las absorbancias más altas, mientras que para los AH, B presento las absorbancias más altas.

Las densidades ópticas relativas (DORs) muestran que MOS posee mayores componentes alifáticos; mientras que AH posee mayores componentes aromáticos, lo que representa un signo indicativo del proceso de humificación.

2. Introducción

El uso de suelo se caracteriza por el arreglo, actividad y producción que hacen las personas en un cierto tipo de cubierta para producir, cambiar o mantener la cobertura del suelo (Reyes *et al.*, 2006), en México se observan una gran cantidad de cambios de uso de suelo, que en general sobrepasa la media mundial, en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo, expansión urbana (Mas *et al.*, 2009).

Al cambiar el uso del suelo también lo hace su calidad y salud, ya que estos cambios modifican factores como la cobertura vegetal, la pérdida y degradación del propio suelo, cambios en el microclima y en la diversidad de especies (Bocco *et al.*, 2001).

Una de las formas para conocer si el cambio en el uso del suelo afecta negativa o positivamente a la calidad y salud es mediante el análisis de la calidad de la materia orgánica (MO), siendo esta las sustancias orgánicas variadas de color pardo y negruzco que resultan de la descomposición de materias orgánicas (Hernandez-Hernandez *et al.*, 2008). La calidad de la MO se evalúa a través de los grupos funcionales contenidos en la materia orgánica soluble (MOS) y ácidos húmicos (AH); la importancia de mantener la MO se debe a que ayuda a la agregación del suelo (Julca-Otiniano *et al.*, 2006; Hernandez-Hernandez *et al.*, 2008), y aumenta la porosidad intra-agregados (porosidad textural) para construir el complejo arcillo-húmico, lo cual a su vez modifica el comportamiento global de los suelos, frente a la compactación y a las propiedades de retención del agua (Campitelli *et al.*, 2010).

En el presente trabajo se emplea el método de espectrofotometría de infrarrojo (IR) para evaluar los grupos funcionales así como las densidades ópticas relativas presentes en MOS y ácidos húmicos de suelos con usos diferentes de: bosque natural, bosque reforestado, pastizal y cultivo de maíz y de esta forma compararlos y conocer cómo el cambio de uso de suelo afecta la calidad de la materia orgánica presente en ellos.

3. Antecedentes

3.1 Suelo

El suelo es un sistema, abierto dinámico, estructurado, heterogéneo, discontinuo, fundamental e irremplazable, constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa), desarrollado a partir de mezclas de materia orgánica y minerales capaz de sostener el crecimiento de los organismos y microorganismos (Porta *et al.*, 2003; García *et al.*, 2012), funciona a través de un equilibrio único y de la interacción de sus componentes biológicos, químicos y físicos (Moreno *et al.*, 2015), es vulnerable, de difícil recuperación y de extensión limitada por lo que es considerado un recurso natural no renovable (Silva y Correa, 2009), siendo la reserva más grande de carbono (C) y nitrógeno (N) orgánicos en ciclo activo (Castellano *et al.*, 2015).

La fase sólida está formada por componentes orgánicos e inorgánicos, dejando huecos, el volumen de estos huecos está parcialmente lleno de agua, siendo este el componente principal de la fase líquida, mientras que el resto del volumen de estos huecos lo constituye el aire formando la fase gaseosa (Porta *et al.*, 2003).

Sus características y propiedades son desarrolladas a través de la acción de agentes climáticos y bióticos que actúan sobre los materiales geológicos acondicionados por el relieve y el drenaje durante un periodo de tiempo (Loaiza, 2011).

3.1.1. Propiedades del suelo

El suelo posee propiedades que interactúan entre sí para mantenerlo en equilibrio y con ello tener un adecuado desarrollo del entorno y de los organismos que lo habitan, estas propiedades se clasifican en físicas, químicas y biológicas (López y Estrada, 2015).

Las propiedades físico-químicas presentan variabilidad espacial, esta variabilidad es causada por las interacciones entre procesos físicos, químicos y biológicos que actúan simultáneamente con diferente intensidad (Alonso y Aguirre, 2011).

3.1.1.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo son aquellas que se pueden observar y medir sin alterar su composición química y están relacionadas con el movimiento del aire, calor, agua, raíces y nutrientes que contiene (López y Estrada, 2015), están condicionadas por la masa total del suelo y reflejan su comportamiento físico, de igual forma están organizadas junto con la organización estructural de un suelo (Rubio, 2010). Estas propiedades determinan la capacidad de muchos de los usos que el hombre le da, pues la condición física de un suelo determina la rigidez y fuerza de sostenimiento, facilidad para la penetración de las raíces, aireación, capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, plasticidad, y retención de nutrientes (Rucks *et al.*, 2004).

Estas propiedades se catalogan en propiedades fundamentales, siendo estas las que no se derivan de otras tales como textura, densidad aparente, color entre otras y las propiedades derivadas, siendo estas las que nacen de las interacciones de las propiedades fundamentales (Ramirez, 1997).

Entre las más relevantes para este estudio están; la densidad aparente y la textura.

3.1.1.1.1. Densidad aparente

Se define como la masa de suelo seco en una determinada unidad de volumen edáfico y su valor se relaciona con la proporción de poros existentes en dicho volumen (Agostini *et al.*, 2014; Al-Shammary *et al.*, 2018), está relacionada directamente con la composición mecánica, el contenido de materia orgánica, el contenido de fragmentos de roca, la estructura y compactación del suelo (Gabriels y Lobo, 2011; Al-Shammary *et al.*, 2018).

Se puede alterar este parámetro a través del tiempo por laboreo, tránsito de implementos, pisoteo animal, crecimiento de raíces y el movimiento de la fauna en el interior del suelo (Agostini *et al.*, 2014) y su valor cambia en función del tipo de minerales de la materia madre y de la cantidad de materia orgánica que posea el suelo, ya que esta pesa menos que un volumen igual de sólidos minerales, la cantidad de ese constituyente afecta la densidad de las partículas, ya que a medida que aumenta la materia orgánica y la porosidad del suelo disminuye la densidad aparente y viceversa (Salamanca y Sadeghian, 2006; Rubio, 2010); por lo que,

medir este parámetro permite obtener información sobre las propiedades termales del suelo, porosidad, humedad, estrés de compactación, resistencia a la penetración del suelo, estimar su productividad, el almacenamiento de C, y por ende la calidad del mismo (Al-Shammary *et al.*, 2018).

3.1.1.1.2 Textura

Se define como la constitución del suelo por partículas de diferente tamaño, estas partículas están clasificadas en arena, limo y arcilla, es utilizada para medir la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde a una determinada composición cuantitativa, definiendo a la arcilla como la fracción de tamaño de partícula de $<2 \mu\text{m}$, limo como la fracción de tamaño de partícula entre 2 y $50 \mu\text{m}$ y la arena como la fracción de tamaño de partícula entre 50 y $200 \mu\text{m}$ (Nemes y Rawls 2004; Canales y Ochoa, 2010).

Se expresa comúnmente revisando el triángulo de texturas, donde los límites de las clases texturales se localizan de acuerdo a las coordenadas que representan los porcentajes de arena, limo y arcilla (Figura 1); definiendo regiones que agrupan combinaciones de estas tres partículas (Shirazi y Boersma, 1984; Canales y Ochoa, 2010).

Esta propiedad influye en una serie de procesos que ocurren en el suelo, tales como el desarrollo de la estructura del suelo, secuestro de C, retención de nutrientes, infiltración y almacenamiento de agua, además de influir en la diversidad y

composición de la comunidad microbiana del suelo, ya que esta propiedad está asociada a la distribución de poros de diferentes morfologías y en la ubicación de productos químicos debido a la adsorción de partículas minerales en la superficie, distribución del agua y transporte de recursos (Xia *et al.*, 2020).

Participa en la determinación de la cantidad de materia orgánica que pueda estabilizarse en el suelo, ya que los suelos con contenidos altos de arcillas tienden a estabilizarse y a retener mayor cantidad de materia orgánica que aquellos con bajos contenidos de arcilla (Gregorich *et al.*, 1994).

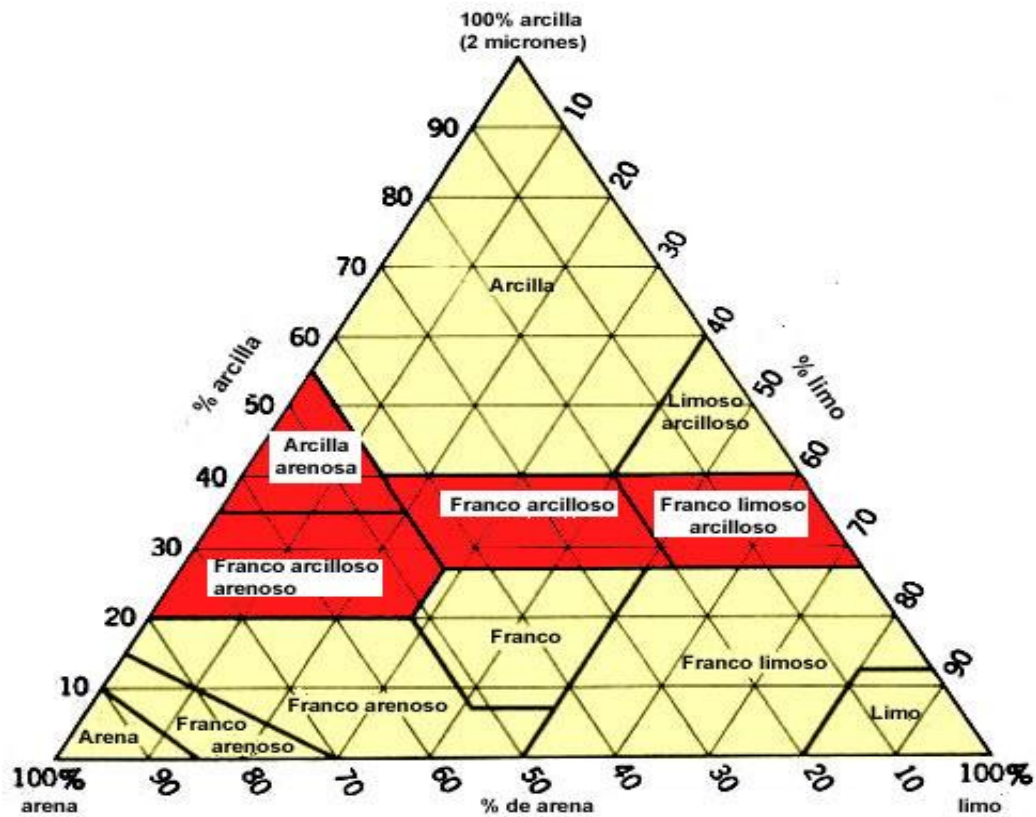


Figura 1. Triángulo de texturas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [FAO], s.f.)

3.1.1.2. Propiedades químicas

Son las propiedades que se pueden observar y medir a partir de cambios químicos en el suelo, describen el comportamiento de los elementos, componentes y sustancias que lo integran, además de las interacciones entre las fases del suelo (Stengel y Gelin, 2003; López y Estrada, 2015).

Inciden directamente en la relación suelo-planta, tales como la calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo y disponibilidad de nutrientes, propiedades tales como la capacidad de intercambio catiónico reducen la presencia de cambios drásticos en el pH, otras propiedades como la materia orgánica y pH son utilizados como indicadores que reflejan estándares de fertilidad (Segueda *et al.*, 2011).

Entre las más relevantes para este estudio están; el pH y el porcentaje de materia orgánica (MO)

3.1.1.2.1 pH

Se define como la propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de la solución del suelo, siendo esta donde los microorganismos y raíces toman sus nutrientes, el pH en el suelo fluctúa entre 4 a 8, se considera que suelos con un pH <7 son ácidos siendo comunes en regiones húmedas, mientras que suelos con pH >7 son alcalinos, siendo comunes en regiones secas (Osorio, 2012)

Es un indicador de niveles tóxicos de Al y Mn, si es bajo el contenido de elementos básicos como Ca y Mg, conociendo el valor del pH en suelo es posible diagnosticar problemas de nutrientes para el buen desarrollo de las plantas (Rivera *et al.*, 2018).

Esta propiedad está sujeta a cambios, ya sea por actividades humanas como la labranza y el uso de fertilizantes o por causas naturales como la lluvia ácida, producción de CO₂ generando H₂CO₃, presencia de ácidos orgánicos por el residuo de las plantas, presencia de ácidos fuertes desprendidos por la actividad microbiana, humus con grupos funcionales de tipo fenólicos, carboxílicos y enólicos, abundancia de óxidos de Fe y Al (Rivera *et al.*, 2018).

La acidificación del suelo se debe principalmente a la meteorización de minerales aluminosilicatos y la consecuente liberación de aluminio (Al³⁺) a la solución del suelo, debido al proceso de intercambio catiónico, dando como consecuencia una relación inversa entre el valor del pH y la cantidad de Al en el suelo (Osorio, 2012).

Esta acidificación reduce el crecimiento de las plantas debido a la disminución de nutrientes como Ca, Mg, K y P, favorece la solubilidad de elementos tóxicos como el Al (Rivera *et al.*, 2018).

3.2 Materia orgánica (MO)

Se define como todas las formas de C orgánico que constituyen al suelo, se conforma por necromasa de origen vegetal, animal y microbiano además de sustancias húmicas (Tinoco, 2000); es decir, es el producto de la descomposición química de las excreciones de los animales y los microorganismos, residuos de plantas o de la degradación de cualquiera de ellos tras su muerte (Brady, 1984). Compuesta principalmente por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en cantidades variables (Quiroga *et al.*, 2017), de igual forma, contiene cantidades pequeñas de materiales solubles en lípidos y fragmentos reconocibles de proteínas y carbohidratos (Pignatello, 1998); la presencia que tiene en suelos es escasa llegando en contadas ocasiones a superar el 2% (Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

A pesar de ser la fracción de menor composición en el suelo es el componente principal de la calidad y productividad del mismo, ya que está involucrada en factores como disponibilidad de agua, compactación, susceptibilidad a la erosión e incluso la resistencia de las plantas a insectos y enfermedades (Docampo, 2010); es un atributo clave para la calidad del suelo y la calidad ambiental, tiene una función insustituible en el mantenimiento de las propiedades del suelo (Carter 2002; Ribo, 2004), ya que en la mayoría de los suelos es el principal agente de formación y estabilización de agregados (Zagal y Córdoba, 2005); por consecuencia, incrementa los flujos de agua aire y calor (Méndez *et al.*, 2017), y aumenta la captación de humedad (Equiarte, 2007), disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso

(Almendros *et al.*, 1984). Aumenta la capacidad de cambio del suelo, reserva de nutrientes para la vida vegetal (Julca-Otiniano *et al.*, 2006), ya que almacena los nutrientes necesarios para ellas, reduce los efectos ambientales negativos de agroquímicos, metales pesados y otros contaminantes (Docampo, 2010).

Se sabe que la capacidad del suelo para adsorber compuestos químicos como clorofenoles o cloroanilinas aumenta con el contenido en materia orgánica, la aplicación de enmiendas orgánicas también incrementa la degradación de fumigantes como el 1,3-D, bromuro de metilo y el isotiocianato metilo, disminuye la volatilización de estos tres pesticidas, aumenta la capacidad tampón del suelo, facilita la absorción de minerales a través de las raicillas de las plantas, favorece la mineralización, ayuda al desarrollo de la cubierta vegetal, y sirve de alimento para los microorganismos que habitan el suelo (Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

El contenido de MO en suelos cambia lentamente a través del tiempo, producto del clima, uso y manejo del suelo, sin embargo la tasa de recambio de los componentes de esta varía continuamente (Zagal y Córdoba, 2005).

Se puede clasificar en virtud de su tamaño y por la fracción bioquímica (Rodríguez *et al.*, 2012), aunque generalmente contiene dos fracciones principales, siendo estas las sustancias húmicas y la materia orgánica soluble (Figura 2), esta forma de clasificación está basada en el análisis de sus propiedades así como del origen del suelo, sin embargo de acuerdo a la función que posea en el suelo se puede clasificar en (Strosser, 2010):

1. Materia orgánica soluble: reacciona rápidamente, proporciona energía y nutrientes para los microorganismos del suelo y libera parte de los nutrientes para el uso de las plantas, posee una rotación de materia orgánica a corto plazo durante el año, su vida media es entre días y pocos años.
2. Materia orgánica estable: un reservorio de materia orgánica menos descomponible, alta capacidad de intercambio de cationes, a menudo está limitado por agregados orgánicos minerales, su vida media es entre años y décadas.
3. Materia orgánica inerte: casi no es reactiva, afecta las propiedades físicas del suelo, tiene una capacidad de sorción potencialmente baja, protegida fisicoquímicamente contra la descomposición, su vida media es entre décadas y siglos.

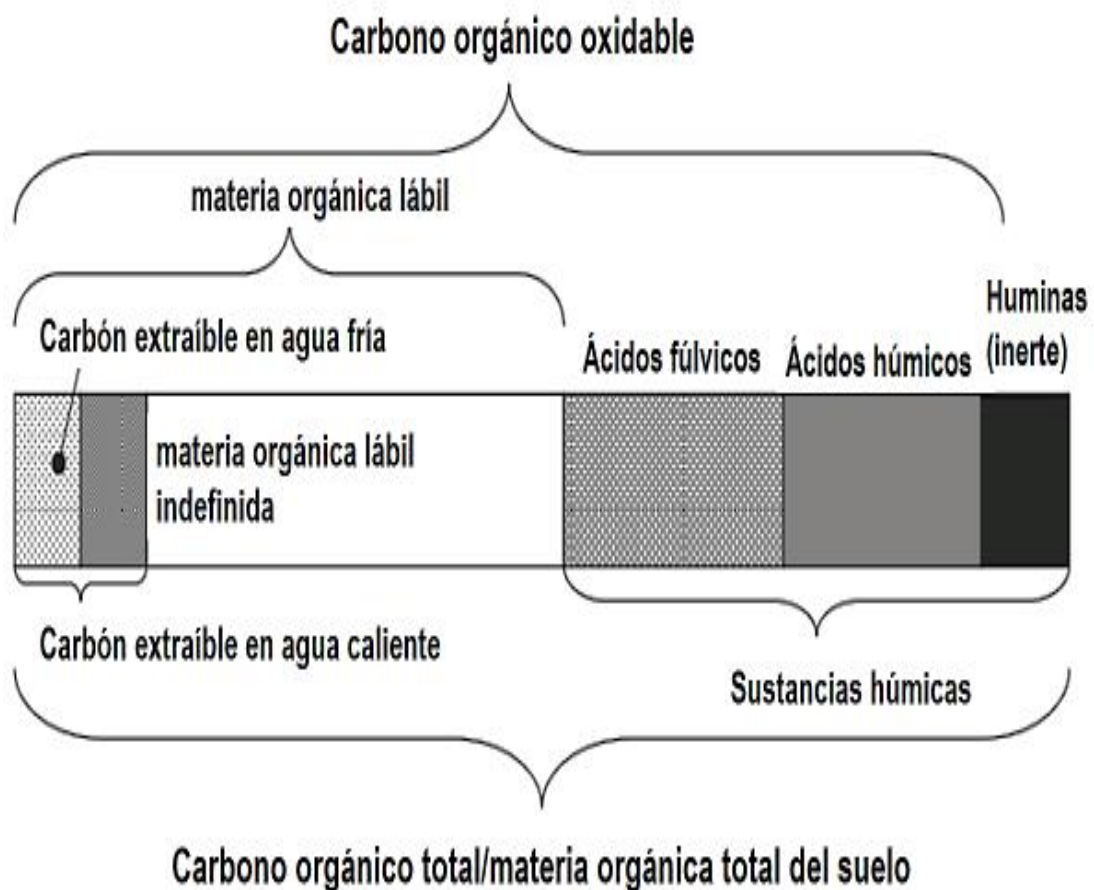


Figura 2. Clasificación de la materia orgánica (Strosser, 2010).

3.2.1. Calidad de la MO

Es definida como los componentes reactivos que posee, siendo importantes para el almacenamiento y suministro de nutrientes y sus cualidades físicas críticas para la retención de agua y la mejora de sus propiedades físicas (Rivero *et al.*, 2004).

Evaluar la calidad de la MO es más complejo que cuantificarla, existen varias formas de evaluarla, tales como:

1. Relación C-AH/C-AF, es la relación de carbono entre ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) presente en la materia orgánica, se utiliza como índice que describe la intensidad en el proceso de humificación además de ser un índice de estabilidad de la materia orgánica (Rivero *et al.*, 2004; Baldotto y Baldotto, 2014).
2. Relación E₄/E₆, esta es utilizada para caracterizar AH y AF, el valor de esta relación es indicativo del tamaño molecular o grado de complejidad química tanto de AH como de AF, donde los valores de 1-5 se correlacionan con una mayor condensación aromática (Rivero *et al.*, 2004).
3. Clasificación de AH según su reactividad, la cual permite obtener información sobre las características de las moléculas de AH, grupos funcionales, composición elemental y grado de humificación (Rivero *et al.*, 2004), una forma de evaluar estos grupos funcionales es mediante la espectroscopia de infrarrojo, este es un método físico no destructivo y de alta precisión utilizado para la caracterización bioquímica de la materia orgánica (Joffre *et al.*, 2001).

Otros indicadores de la calidad de la MO del suelo son: la fracción ligera del suelo, el carbono y nitrógeno mineralizable, la biomasa microbiana, las actividades enzimáticas del suelo, los carbohidratos y el carbono orgánico y nitrógeno total, ya que estos proporcionan información importante acerca de atributos y procesos ocurridos en el suelo, tales como la estructura del suelo, actividad biológica y almacenamiento de nutrientes (Gregorich *et al.*, 1994); sin embargo estos indicadores tienen ciertas limitaciones, tales como presentar casi la misma información, no tener en cuenta compuestos secundarios tales como los grupos fenólicos o solo presentar una pequeña fracción del material total analizado (Joffre *et al.*, 2001).

De igual forma para llevar a cabo una buena evaluación de la calidad de la MO del suelo es necesario contemplar las propiedades físicas y químicas del mismo, ya que estos cambian dependiendo del uso de suelo que se le dé y de las fluctuaciones de la materia orgánica (Gregorich *et al.*, 1994; Haynes, 2000); por lo que mantener la calidad de la materia orgánica es importante para el uso de la tierra a largo plazo debido a los efectos positivos que tiene esta sobre el suelo (Von *et al.*, 2002).

3.3. Materia orgánica soluble (MOS)

Es definida a menudo como toda la MO que pueda pasar a través de un filtro de 0.45 μm (Razavy, 2010); comprende una porción muy pequeña de la MO total del suelo, es un elemento clave para algunos procesos ecológicos y biogeoquímicos

del suelo (Melina, 2019); el tamaño de las reservas de esta MO y su disponibilidad como sustrato son fundamentales para los flujos de nutrientes en los sistemas agrícolas (Gregorich *et al*, 2003), contiene grandes cantidades de compuestos lábiles sirviendo como fuente de energía y nutrientes para los microorganismos del suelo, contribuye a las entradas anuales de C en el subsuelo por consecuencia a su acumulación, ayuda a la formación del suelo, contribuye a la estabilización y distribución del C (Razavy, 2010).

Es heterogénea en cuanto a tamaño y composición, está conformada por la mezcla de materiales húmicos, polisacáridos, polifenoles, proteínas, lípidos y diversas moléculas; de carga negativa y con pH entre 6 y 7, lo que les da la cualidad de ser muy móviles a través de los suelos (Riveros, 2007).

Aunque la reserva de carbono soluble en agua es pequeña tiene una alta rotación y está en equilibrio con el humus del suelo, por lo tanto el humus es la fuente principal de carbono soluble en esta debido a la cantidad relativamente grande de humus presente en el suelo en relación con la aportada por la biomasa microbiana o residuos vegetales (Gregorich *et al*, 2003).

El uso del suelo y la profundidad de este tienen efectos significativos en la proporción de carbono orgánico soluble, siendo este carbono fácilmente biodegradable (Gregorich *et al.*, 2003).

3.4 Sustancias húmicas (SH)

El humus es complejo y variable en la materia orgánica del suelo, pueden identificarse miles de compuestos orgánicos, que apenas constituyen entre el 10% y 15% de su peso total, la mayoría de los compuestos identificables se descomponen con demasiada facilidad para que puedan considerarse humus. Los componentes que perduran lo suficiente para ser incluidos en el verdadero humus, suelen denominarse materiales húmicos (Thompson, 1988); es la fracción más dominante dentro de la MO (Arteaga *et al.*, 2014), de igual forma es la fracción más representativa y estable de C, llegando a poseer hasta 90% del C total en suelos (Valero y Torres, 1999); forman distintas moléculas de acuerdo al sustrato de origen, tales como aquellos sustratos ricos en lignina que generan una mayor cantidad de sustancias húmicas, en suelos donde hubo residuos de frutas, rastrojo de maíz, paja de trigo o estiércol de bovino se presentaron diferencias significativas entre la cantidad de grupos carboxílicos, OH fenólicos y grupos carbonilos (Sanmiguel *et al.*, 2014).

Se originan por la degradación química y biológica de residuos de plantas, animales y por las actividades enzimáticas de los microorganismos del suelo, estos cambios provocan que los compuestos orgánicos sean más estables (Porta *et al.*, 2003).

Existen varias teorías para explicar la formación de estas sustancias húmicas, una de ellas es la teoría de la lignina, la cual explica que la lignina es una de las principales fuentes de unidades estructurales, lo que implica importantes transformaciones de la MO original, ocurriendo por medio de la descomposición de

esta a compuestos orgánicos más sencillos, el metabolismo microbiano de estos compuestos, el reciclado de C, H, O y N y la polimerización microbiana de compuestos orgánicos reciclados, estas modificaciones darían lugar a grupos carboxilos lo que daría paso a formar en primer lugar ácidos húmicos y posteriormente ácidos fúlvicos. De igual forma, la complejidad de la estructura molecular de la lignina provoca un retraso en su degradación ya que requiere múltiples actividades enzimáticas y mecanismos de despolimerización, además de los enlaces covalentes lignina-celulosa aumentan su tiempo de vida media lo que incrementa la probabilidad de que sea incorporada a las sustancias húmicas (Porta *et al.*, 2003).

Otra teoría es la de los polifenoles, la cual explica que por medio de ataques enzimáticos a la lignina darían lugar a grupos aldehídos fenólicos y ácidos libres que al alterarse formarían quinonas, de las cuales se formarían macromoléculas húmicas, sin embargo, es posible que estas dos vías de formación estén ocurriendo al mismo tiempo (Porta *et al.*, 2003).

Son complejas macromoléculas de unidades aromáticas con uniones de aminoácidos, péptidos, amino-azúcares, ácidos alifáticos, ácidos carboxílicos, grupos fenólicos, hidroxílicos, enólicos, alcohólicos, carbonilos entre otros grupos funcionales, presentan una organización estructural supramolecular con estructuras hidrofóbicas grandes conformadas por fracciones húmicas de cadenas lineales alifáticas, anillos aromáticos condensados y estructuras hidrofílicas pequeñas compuestas por fracciones húmicas irregulares, este ordenamiento supramolecular es el resultado de moléculas húmicas heterogéneas de relación no uniforme que

interactúan en función de su talla, afinidad química e hidrofobicidad (Tortosa, 2007; Sanmiguel *et al.*, 2014; Veobides-Amador *et al.*, 2018).

Son importantes para el suelo ya que estas influyen en la calidad de la MO, en la nutrición mineral de organismos vegetales, en la actividad microbiana del suelo, en la textura, actúan como buffer ante pequeñas modificaciones del pH, promueven la formación de agregados estables, es un promotor del crecimiento radicular lateral de las plantas, ayuda a la conservación del suelo, son absorbentes de metales pesados a partir del efecto quelante de la carga negativa presentes en los ácidos carboxílicos, fenólicos e hidroxilos que forman parte de su estructura química, influyen en la movilidad de compuestos orgánicos no iónicos como pesticidas y contaminantes removiéndolos de las soluciones acuosas, reserva y fuente de S, P y N, amortiguan la salinidad, incrementa la temperatura por optimizar los regímenes hidrólicos, eólicos y térmicos (Ruiz *et al.*, 1997; Rodriguez *et al.*, 2010; Arteaga *et al.*, 2014; Sanmiguel *et al.*, 2014), de igual forma son utilizadas en medios distintos al suelo, tales como en la medicina, tratamiento de aguas y alimento para animales de crianza (Sanmiguel *et al.*, 2014).

Estos compuestos en base a su solubilidad pueden clasificarse en 3 grupos universales: huminas, ácidos fúlvicos (AF) y ácidos húmicos (AH) (Tortosa, 2007).

Las huminas son insolubles en agua a cualquier pH y no se pueden extraer en medios alcalinos, esto debido a su insolubilidad y a su naturaleza macromolecular, son parecidos a los AH tanto por su composición elemental como por su contenido en grupos funcionales, diferenciándose por la menor aromaticidad y mayor contenido de polisacáridos alifáticos en las huminas (Tortosa, 2007).

Los AF son solubles a cualquier pH, extraíbles en medios alcalinos y sus componentes permanecen en disolución después de acidificar el estrato, poseen una estructura relativamente similar a los AH, sin embargo estos son de menor peso molecular, están menos polimerizados, contienen más cadenas alifáticas y son más ricos en grupos fenólicos, carboxílicos, hidroxilicos y cetónicos (Tortosa, 2007; Veobides-Amador *et al.*, 2018).

3.5. Ácidos húmicos (AH)

Son uno de los tres grupos universales de las sustancias húmicas, se forman a partir de la materia orgánica distribuida en suelos terrestres, aguas naturales, turbas, ligninas, lignitos y sedimentos resultantes de la descomposición de residuos vegetales y animales, entre otros depósitos naturales (Lubal *et al.*, 1998; Tortosa, 2007; Gomes *et al.*, 2016)

3.5.1. Características

Son macromoléculas complejas, solubles a pH básico, parcialmente solubles en agua e insolubles en medios ácidos (Gomes *et al.*, 2016; Veobides-Amador *et al.*, 2018); su composición puede variar dependiendo el origen geográfico, edad, clima y condiciones biológicas a las que estuvieron expuestos (Gomes *et al.*, 2016); Poseen un peso molecular en promedio de 8 kilodaltones (KDa) aunque pueden

pesar entre 2 y 1300 KDa (Gomes *et al.*, 2016; Chianese *et al.*, 2020) , en promedio tienen una estructura hipotética compuesta por grupos funcionales fenólicos libres y enlazados, ácidos carboxílicos, anillos aromáticos del tipo di y trihidroxibenceno, estructuras de quinonas, éter, grupos enólicos, aminoácidos, aminoazúcares, péptidos y compuestos alifáticos involucrados en las uniones entre los grupos aromáticos, nitrógeno y oxígeno como puentes, además el nitrógeno funciona como componente estructural lo que indica la presencia de residuos de carbohidratos y proteínas (Figura 3); donde los grupos fenólicos y carboxílicos son los más frecuentes en su estructura (Mosquera *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2016).

Los ácidos húmicos poseen una composición elemental de C (52-62%), O (30-33%), H (3–5.5%, N (3.5–5%) mientras que el S se encuentra distribuido en el resto del porcentaje (Gomes *et al.*, 2016; Boguta *et al.*, 2019).

Son heterogéneos, por lo que en la misma macromolécula contiene porciones hidrofílicas que consisten en grupos OH y porciones hidrofóbicas que consisten en cadenas de grupos alifáticos y anillos aromáticos (Fahramand *et al.*, 2014; Gomes *et al.*, 2016)

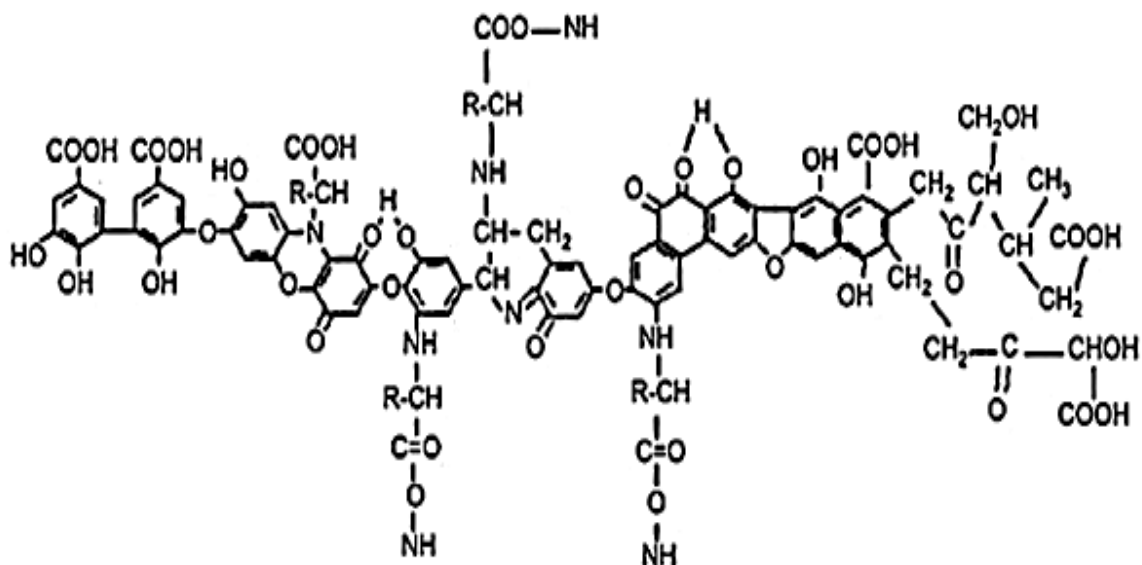


Figura 3. Modelo de estructura de AH (Gomes *et al.*, 2016)

Las quinonas en su estructura fungen como grupos aceptores de electrones siendo las principales responsables de las actividades redox en sistemas naturales, estas se reducen a semiquinonas estabilizándose por sus anillos aromáticos y luego se reducen en hidroquinonas siendo estas últimas moléculas más estables (Figura 4), están directamente afectadas por los grupos fenólicos ya que estos son donantes de electrones, por consiguiente estos grupos retardan la acción oxidativa de las quinonas lo que a su vez aumenta la permanencia de estas en ambientes óxicos (Baldotto y Baldotto, 2014; Gomes *et al.*, 2016).

Los radicales libres de semiquinona igualmente se pueden formar mediante la oxidación de grupos fenólicos (Baldotto y Baldotto, 2014)

El aumento de la concentración de los grupos quinónicos incrementa con el avance de la estabilización química de los AH, esto por la policondensación y por

conjugación de estructuras insaturadas, esta estabilización se observa mediante el aumento de la concentración de radicales libres de semiquinona (Baldotto y Baldotto, 2014).

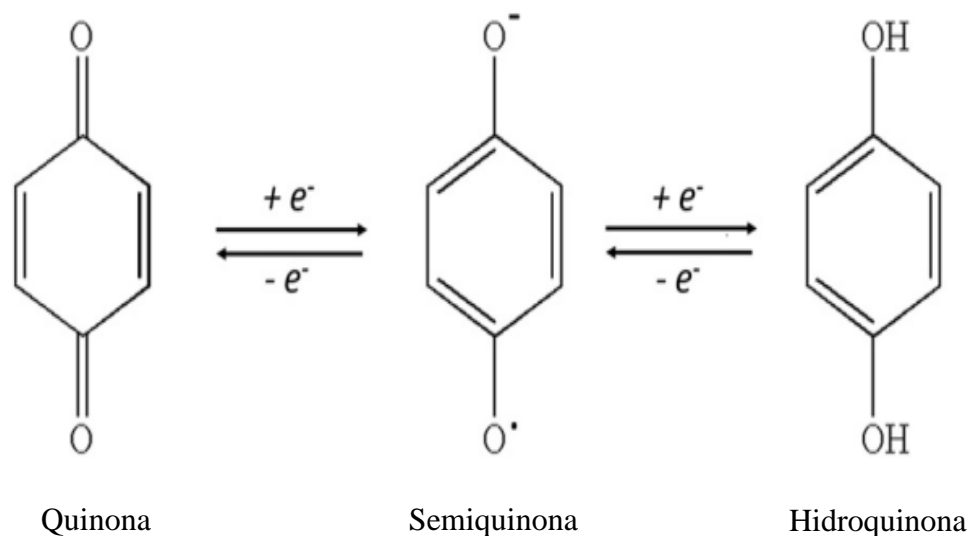


Figura 4. Reacciones redox de las quinonas (Gomes *et al.*, 2016)

3.5.2. Propiedades

Sus propiedades principales están relacionados con la estructura que poseen, pues varían dependiendo de la anfifilicidad y los grupos funcionales que contenga (Gomes *et al.*, 2016)

pH y solubilidad; los AH se consideran solubles en condiciones básicas o neutras, sin embargo esta propiedad varía con la composición de estas sustancias, ya que

en medios alcalinos los grupos fenólicos y carboxílicos se desprotonan y la repulsión de estos grupos de carga negativa hace que las moléculas adopten una forma estirada, al disminuir el pH los grupos funcionales se protonan y los efectos de repulsión se minimizan lo que ocasiona que la molécula adopte una forma enrollada y compacta, lo que a su vez provoca que las porciones hidrofóbicas de la molécula de AH se encuentre en el interior y las porciones hidrofílicas se encuentren en contacto con el medio acuoso; forman distintos tipos de agregados dependiendo de los cambios de pH como se muestra en la figura 5 (Gomes *et al.*, 2016), esta conformación de la molécula forma regiones análogas de micelas llamadas pseudomicelas (Sutton y Sposito, 2005).

La fracción soluble actúa como un polielectrolito débil existiendo en el agua de forma disuelta y dissociada; mientras que, la fracción insoluble actúa como un intercambiador de iones, ya que libera iones H^+ en la solución, donde los aniones permanecen insolubles (Gomes *et al.*, 2016).

Carácter anfifílico; las pseudomicelas permiten la solubilización de compuestos no polares, esto ocurre ya que las interacciones que hay entre las moléculas de AH y estos compuestos son de tipo no covalentes, lo que ocasiona su disolución en el núcleo hidrófobo de las pseudomicelas. De igual forma los AH se adsorben en partículas de hidrocarburos aromáticos policíclicos, compitiendo con el mecanismo de disolución, lo que conduce a que si la sorción es baja aumentará la solubilidad de los AH hacia las partículas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Gomes *et al.*, 2016)

Los AH tienen la capacidad de unir metales catiónicos, neutralizan las cargas en solución y participan en la formación de las pseudomicelas, los cationes multivalentes actúan con los grupos fenólicos y carboxílicos en cadenas adyacentes potenciando las pseudomicelas, y el efecto detergente, la interacción al inicio es enteramente electrostática donde los cationes se mueven a sus lugares termodinámicamente preferidos, este proceso forma complejos AH-metal esféricos, estos complejos varían dependiendo del metal, la concentración de este, el origen, peso molecular y concentración de ácidos húmicos, ya que AH con menor peso molecular tienen un mayor número de grupos fenólicos y carboxílicos por lo que pueden unir mayor número de metales y de manera más eficiente (Gomes *et al.*, 2016).

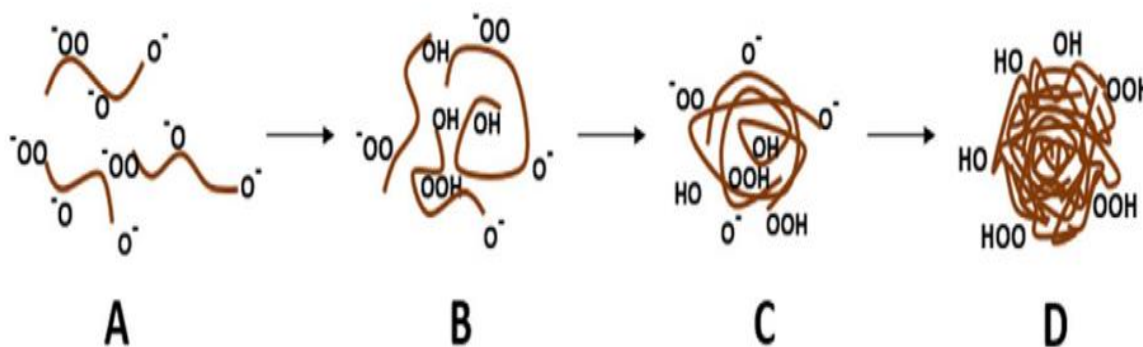


Figura 5. Efectos del pH en la molécula de ácidos húmicos. (A) pH alcalino: repulsión de cargas. (B) Disminución del pH: agregación intramolecular. (C) Disminución del pH: agregación intermolecular. (D) pH ácido: precipitación (Gomes *et al.*, 2016)

3.5.3. Importancia

Son parte fundamental en el mantenimiento y mejoramiento de las propiedades del suelo, transporta y retiene contaminantes orgánicos e inorgánicos (Mosquera *et al.*, 2007).

Diversas funciones de los ácidos húmicos son dadas por los grupos fenólicos y los ácidos carboxílicos ya que estos permiten la desprotonación de OH/OOH, esto ayuda al mejoramiento del crecimiento y nutrición de las plantas, complejacion con metales pesados, además junto con las quinonas proporcionan efectos fungicidas, bactericidas y antimutagénicas (Gomes *et al.*, 2016).

Mientras que los grupos hidrofílicos que contiene atraen las moléculas de agua, lo que aumenta la capacidad de retención de esta (Fahramand *et al.*, 2014)

Debido a su carácter anfifílico y a su capacidad para solubilizar compuestos no polares como los hidrocarburos aromáticos policíclicos poseen un efecto en la reducción de contaminantes del suelo, por lo tanto se pueden utilizar como remediadores del suelo (Gomes *et al.*, 2016).

Son utilizados para la remediación de suelos y agua contaminados con metales pesados, esto debido a la capacidad de los ácidos húmicos de formar complejos AH-metal, sin embargo estos ambientes en esas condiciones tienen un pH ácido, reduciendo la solubilidad de los AH y su capacidad de formar estos complejos (Gomes *et al.*, 2016).

3.6. Uso de suelo

El uso de suelo se refiere a la capacidad que se tiene para mantener una determinada masa forestal, rotación de cultivos, usos paisajistas, de jardinería, construcción u otras posibles funciones que tenga el suelo (Porta *et al.*, 2003), tanto para el mantenimiento de los ecosistemas terrestres como para el beneficio antropogénico, convirtiéndolo en un indicador de como la sociedad maneja los ecosistemas, contribuyendo a una degradación o conservación del suelo (Gonzales *et al.*, 2021); debido a esto se realizan planeaciones de uso de suelo mediante la obtención de información básica, como la tasa de expansión, la distribución espacial, controles ambientales aplicados, dimensiones tecnológicas, socioeconómicas y políticas del cambio de uso (Paruelo *et al.*, 2005)

Los mayores cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres se deben a la conversión, uso y degradación del terreno (Bocco *et al.*, 2001), estos pueden ocurrir debido a fenómenos naturales, sin embargo las actividades humanas se han convertido en la principal causa de la modificación de los ecosistemas terrestres (Velázquez *et al.*, 2002).

Estas modificaciones de los ecosistemas terrestres traen como consecuencia cambios en la calidad de la materia orgánica, disminución de la MO, pérdida de C secuestrado y de N en la MO de suelos, altera la cubierta vegetal en cortos periodos de tiempo, lo que provoca alteraciones en las propiedades del suelo (Von *et al.*, 2002; Cruz-Ruiz *et al.*, 2012; Cantú y Yañes, 2018).

3.7. Espectrofotometría de infrarrojo

Es una técnica analítica espectroscópica basada en la interacción de la radiación electromagnética con la energía; la cual tiene una naturaleza ondulatoria lo que permite su caracterización mediante parámetros como longitud de onda, frecuencia y energía asociada a la onda (Gutiérrez, 1997).

De acuerdo a la química cuántica a los valores de la energía se denominan niveles de energía, cuando se transicional de un nivel de energía a otro da lugar a los fenómenos de emisión-absorción de la radiación; la absorción se da cuando a un nivel de energía (E_1) recibe energía, produciendo un tránsito desde el nivel E_1 al nivel E_2 ; mientras que la emisión se da cuando el nivel E_2 pase a nivel E_1 ; esto debido a que el nivel E_2 es un estado de mayor energía, por lo que las moléculas tienden a pasar a su nivel e_1 emitiendo el exceso de energía (Gutiérrez, 1997). De esta forma la incidencia de algún tipo de radiación sobre una muestra mediante una técnica provocaría estos fenómenos, en consecuencia el análisis de la muestra.

La luz es un tipo de radiación electromagnética, donde su espectro puede dividirse en diferentes regiones dependiendo la longitud de onda, incluida la luz infrarroja, esta región se divide en tres: i. infrarrojo lejano ($10 - 200 \text{ cm}^{-1}$), ii. infrarrojo medio ($200 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) y iii. infrarrojo cercano ($4000 - 12800 \text{ cm}^{-1}$) (Katon, 1996; Gutiérrez, 1997).

Este tipo de luz posee una energía asociada pequeña, por lo que solo es capaz de afectar a las moléculas a niveles vibracionales y rotacionales; por lo que cuando

incide sobre una muestra se produce una absorción de radiación infrarroja que se manifiesta en la excitación de las moléculas de la muestra, provocando vibraciones moleculares características a determinadas longitudes de onda, permitiendo la identificación de grupos funcionales (Gutiérrez, 1997)

Para realizar el análisis de muestras por medio de este método es necesario un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier, el cual contiene una fuente de radiación infrarroja que emite un haz infrarrojo el cual incide en el interferómetro de Michelson (divisor del haz de rayos o beam splitter, espejo móvil y espejo fijo), en el interferómetro la radiación incide sobre el divisor de haz de rayos de modo que una parte de esta se dirige hacia el espejo móvil y el resto es reflejada en el espejo fijo, esta diferencia de caminos ópticos dadas en los dos espejos producirán interferencias constructivas y destructivas, una vez que ha incidido sobre ambos espejos la radiación se recombina y llega de nuevo al divisor de haz, donde una parte de la radiación obtenida se refleja y la otra se transmite atravesando el compartimento de la muestra llegando al detector, donde las interferencias constructivas serán captadas por el detector como una señal dando como resultado un interferograma, el cual por medio de la computación y de un algoritmo matemático llamado transformada de Fourier se convierte en un espectro (Figura 6), siendo este la representación gráfica de la intensidad de absorción de radiación frente a la frecuencia (Katon, 1996; Gutiérrez, 1997).

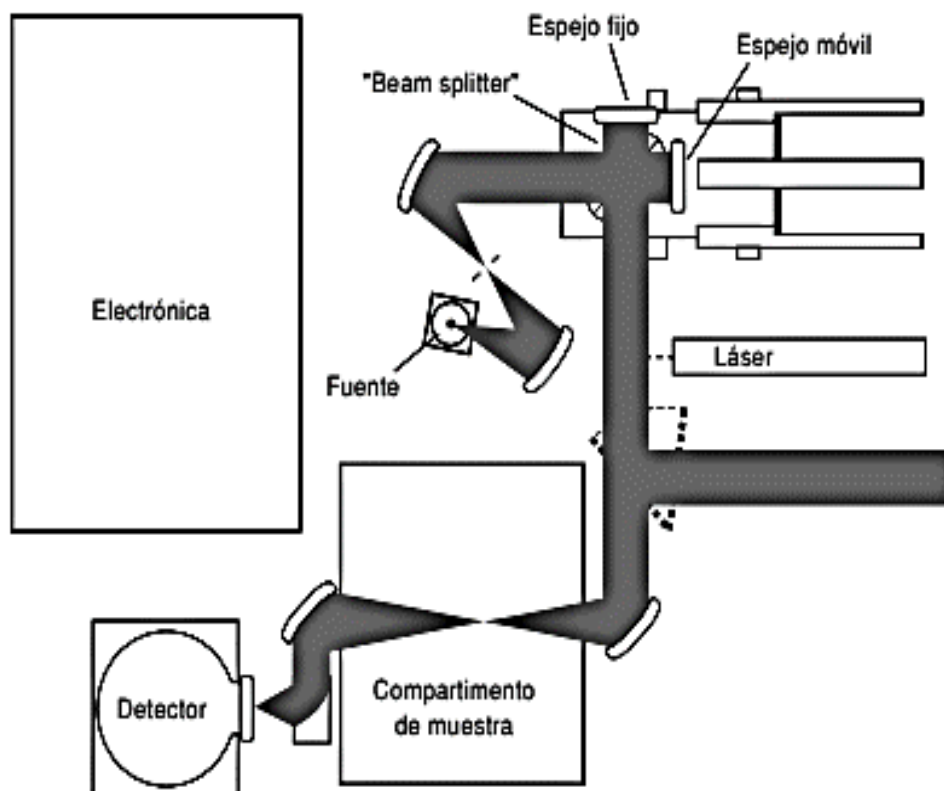


Figura 6. Esquema del espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier
(Gutiérrez, 1997)

Es una técnica rápida y accesible la cual proporciona información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición de las mezclas, se caracteriza por su simplicidad en comparación con otros métodos de espectrofotometría (Galignani *et al.*, 2008; Arteaga *et al.*, 2014).

Son técnicas muy utilizadas ya que son de bajo costo y de tiempos cortos, brindan información sobre las propiedades de la materia orgánica, además de brindar una vasta información acerca de la estructura química de los AH, ya que cuantifican la

composición química que forman las capas de estos, tales como los grupos funcionales y la disposición específica en los mismos (Arteaga *et al.*, 2014; López-Salazar *et al.*, 2014).

Proporciona información cualitativa acerca de los grupos funcionales como carboxilos, grupos fenólicos, enólicos, alcoholes, compuestos aromáticos y alifáticos. La comparación entre los espectros obtenidos proporciona información sobre los procesos obtenidos de las muestras a analizar, verifica diferencias naturales provocadas por el tipo de manejo que se le dé al suelo (Arteaga *et al.*, 2014).

4. Justificación

El parque ecológico el Ocotil es un área natural protegida enfocada en el turismo por lo cual, el desarrollo de actividades de esta índole ha generado un cambio del paisaje en torno al uso del suelo en varias áreas del parque, tales como pastizales, zonas agrícolas, zonas urbanas; sin embargo debido a su condición de área natural protegida también contiene proyectos de reforestación, propiciando a que se pueda observar distintos usos de suelo en una corta extensión de terreno del parque.

El cambio de uso de suelo trae como consecuencia la alteración de sus propiedades, dentro de las cuales se encuentra la materia orgánica (MO); la MO es uno de los componentes principales y más importantes del suelo, debido a que aporta nutrientes para las plantas y mantiene la actividad de los microorganismos

que intervienen en los ciclos biogeoquímicos; es por ello, que es importante evaluar la calidad de esta en suelos que han sido modificados en su uso, dicha calidad se evalúa a través de los grupos funcionales en la materia orgánica y en los ácidos húmicos.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Determinar los grupos funcionales de la materia orgánica de suelos mediante espectrofotometría de infrarrojo, con el fin de evaluar su calidad en relación con distintos usos de suelo.

5.2. Objetivos específicos

Determinar la calidad de la materia orgánica soluble en suelos bajo distintos usos a través de la identificación de sus grupos funcionales.

Determinar la calidad de los ácidos húmicos en suelos bajo distintos usos a través de la identificación de sus grupos funcionales y las densidades ópticas relativas.

6. Materiales y métodos

6.1. Área de muestreo

El sitio de muestreo está localizado en el parque Estatal El Ocotil en la localidad de Santiaguillo Maxdá, municipio de Timilpan, Estado de México, en las coordenadas 19°48'46'' - 19°47'52'' latitud N, 99°45'17'' - 99°45'11'' longitud W a una altitud de 2750 m. Posee las unidades de suelo Feozem, Vertisol, Andosol, Planosol y Luvisol; agrupadas en subunidades háplico, crómico lúvico, ócrico, mólico y pélico (Aguilar, 2009); presenta un clima templado, subhúmedo con régimen de lluvias en verano, con poca oscilación térmica y con marcha anual de temperatura tipo Ganges, Cb(w₂)(w)(i)g (García, 2004).

6.2. Muestreo

Se colectaron muestras compuestas de suelo bajo diferente uso: cultivo de maíz (M), pastizal (P), bosque natural (B) y bosque reforestado (Br). El muestreo se llevó a cabo de manera sistemática utilizando una pala, recolectando muestras de los primeros 30 cm del suelo.

Las muestras se guardaron en bolsas de polietileno para ser transportadas al laboratorio, se secaron a la sombra a temperatura ambiente para posteriormente ser homogeneizadas y tamizadas con malla de 2 mm.

6.3. Análisis de laboratorio

6.3.1. Pruebas fisicoquímicas

Se determinó el pH en agua con una solución 2:1 agua-suelo bajo el método AS-02, densidad aparente bajo el método de la probeta (AS-03), porcentaje de materia orgánica bajo el método de Walkey y Black (AS-07) y textura bajo el método de Boyoucos (AS-09). Todas las pruebas se realizarán de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

6.3.2. Extracción de materia orgánica soluble (MOS)

La MOS se extrajo de todas las muestras en una relación 1:4 con agua destilada, se agitó a 400 rpm durante 3 horas, se centrifugaron a 3,000 rpm durante 10 minutos y después a 7500 rpm durante 45 minutos. El sobrenadante se filtró con papel Wathman No. 40. Los filtrados fueron dializados con agua destilada hasta eliminar las sales (prueba realizada con AgNO_3). Las soluciones dializadas fueron colocadas en cajas Petri y secadas en incubadora a 30 °C (Vaca *et al.*, 2006).

6.3.3. Extracción de ácidos húmicos (AH)

Se realizó la extracción primero con $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0.1 M y NaOH 0.1 M hasta el agotamiento, el sobrenadante se acidificó a pH 1 con HCl y se dejó reposar durante 24 horas para permitir la precipitación de los ácidos húmicos. Los AH se separaron de los ácidos fúlvicos decantando el sobrenadante, obteniendo los ácidos húmicos y se purificaron agregando NaOH y centrifugando a 7,500 rpm durante una hora eliminando de esta forma las arcillas. Los ácidos AH se re-precipitaron con HCl-HF 1N, se dializaron contra agua destilada para eliminar sales y se almacenaron en cajas de Petri de vidrio para su posterior secado en la incubadora a 45°C (Vaca *et al.*, 2006).

6.3.4. Espectrofotometría de infrarrojo

Se obtuvieron espectros de infrarrojo de las MOS y los AH por medio de espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier (Bruker, Tensor 27, Billerica, MA, EUA) en un intervalo de 4000–400 cm^{-1} , elaborando pastillas con 2 mg de la muestra y 200 mg de KBr (Vaca *et al.*, 2006).

7. Resultados y discusión

7.1. Evaluación de las pruebas fisicoquímicas

En la **tabla 1** se indican los valores obtenidos de las pruebas fisicoquímicas (pH, densidad aparente, textura y MO) realizadas en cada uno de los tratamientos.

Se puede observar que los valores obtenidos de pH del suelo en M y B corresponden a un suelo ligeramente ácido siendo este el óptimo para la disponibilidad de nutrientes de las plantas; mientras que en Br y P se encontró un pH neutro, por lo que las plantas pueden llegar a tener deficiencias de micronutrientes además de altos niveles de calcio y magnesio, de acuerdo a la escala de interpretación del pH de Osorio (2012) y (SEMARNAT, 2000).

El parque Estatal el Ocotil se encuentra dentro del sistema neovolcánico transversal (Aguilar, 2009), lo que da origen a suelos de tipo volcánico, estos suelos promueven una buena estabilidad estructural y una baja densidad aparente (Romerio-Barrios *et al.*, 2015), concordado con los resultados obtenidos, ya que en todas las muestras se registran densidades aparentes menores a 1 g/cm^3 , estos valores son aceptados para suelos de origen volcánico de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Tabla 1. Resultados de los análisis fisicoquímicos.

Muestra	pH	Densidad aparente (g/cm ³)	Textura	MO (%)
Maíz	6.48	0.96	Franco arenosa	3.49 (Mb)
Pastizal	6.56	0.98	Franco	11.51 (A)
Bosque reforestado	7.36	0.89	Franco arcillo arenosa	6.98 (M)
Bosque natural	6.26	0.75	Franco arcillo arenosa	18.15 (Ma)

Mb: Muy bajo; A: alto; M: Medio; Ma: Muy alto

Para la textura se sabe que las clases texturales de tipo franco arenoso obtenidas en M y franco arcillo arenoso obtenidos en Br y B son consecuencia de los años de uso de suelo a falta de planes de conservación para estos usos de suelo (Martinez-Aguilar *et al.*, 2020); mientras que la textura franca obtenida en P concuerda con lo obtenido por Jaurixje *et al.* (2013), quienes reportaron que el manejo de suelo pasto obtuvo esta misma clase textural, esto se puede deber a efectos del pasto sobre las propiedades físicas del suelo.

En cuanto a los valores obtenidos en el porcentaje de MO, estos distintos en cada uso, obteniendo en B el porcentaje más alto clasificado como Muy alto, seguido de P con un porcentaje alto, Br con un valor medio y M con un valor muy bajo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Los datos obtenidos en cultivo de maíz concuerdan con lo reportado por López *et al.* (2018) y López *et al.* (2019), quienes encontraron que el porcentaje de MO es bajo en suelos volcánicos cultivados con maíz debido al laboreo y la compactación del suelo, generando una excesiva mineralización, endureciendo el suelo y provocando una menor actividad biológica, además de un sellado superficial del suelo (Lopez *et al.*, 2018), por lo que el cambio de uso de suelo de un bosque natural a cultivos tiene como consecuencia la pérdida de MO (Gol, 2019).

Agasghi *et al.* (2010), concluyeron que el porcentaje de MO es mayor en sistemas de suelos naturales, debido a la alta cobertura vegetal y el regreso al suelo de los residuos vegetales.

Las diferencias en la clasificación del contenido de MO entre B, Br y P pueden deberse a cambios en el uso de suelo capaces de disminuir la calidad del sustrato edáfico incrementando su degradación y la reducción del retorno de la MO (Cantú *et al.*, 2018).

7.2. Densidades Ópticas

7.2.1. Caracterización de materia orgánica soluble

Los espectros de IR sobre MOS de los cuatro usos de suelo son cualitativamente similares, donde se observó que Br presentó valores más altos de absorbancias en todas las longitudes de onda respecto a P, M y B, siendo este último el que obtuvo los valores de absorbancia más bajos (Figura 7).

Las muestras presentaron diferencias semicuantitativas considerables, tal es el caso de Br, que tuvo la intensidad más alta respecto a los otros usos de suelo en 3400 cm^{-1} (vibraciones de tensión O-H de grupos carboxilo, hidroxilo), 2920 cm^{-1} (C-H alifático), 1650 cm^{-1} [tensión C=O de amidas secundarias (banda de amidas I), vibración C=C aromático, tensión COO- asimétrica], 1380 cm^{-1} (tensión simétrica de COO-), 1125 cm^{-1} (alcoholes alifáticos), 1030 cm^{-1} (tensión C-O de polisacáridos), 580 cm^{-1} (deformación fuera del anillo de piridina), 456 cm^{-1} (anillos de piridinas) como se observa en la Figura 7.

El bosque natural y pastizal presentaron un pico en la banda 3600 cm^{-1} (grupos OH), mientras que B y Br presentaron un pico en 3300 cm^{-1} (principal banda H en grupos OH y tensión NH). A diferencia de los otros usos de suelo, en B se observó presencia de grupos sulfidrilos SH ($2480\text{-}2600\text{ cm}^{-1}$), vibración de C aromático, banda de amidas II (1550 cm^{-1}), así como deformación O-H fenólico y tensión C-O (1420 cm^{-1}). Por otro lado M presentó picos en las bandas 1720 cm^{-1} (tensión C=O

carboxilos y carbonilos de diferente naturaleza, estiramiento C=O alifático/aromático no saturados o cetonas alifáticas, aldehídos) y 678 cm^{-1} (deformación dentro del anillo de piridina) presente de igual forma en el espectro P como se observa en la Figura 8.

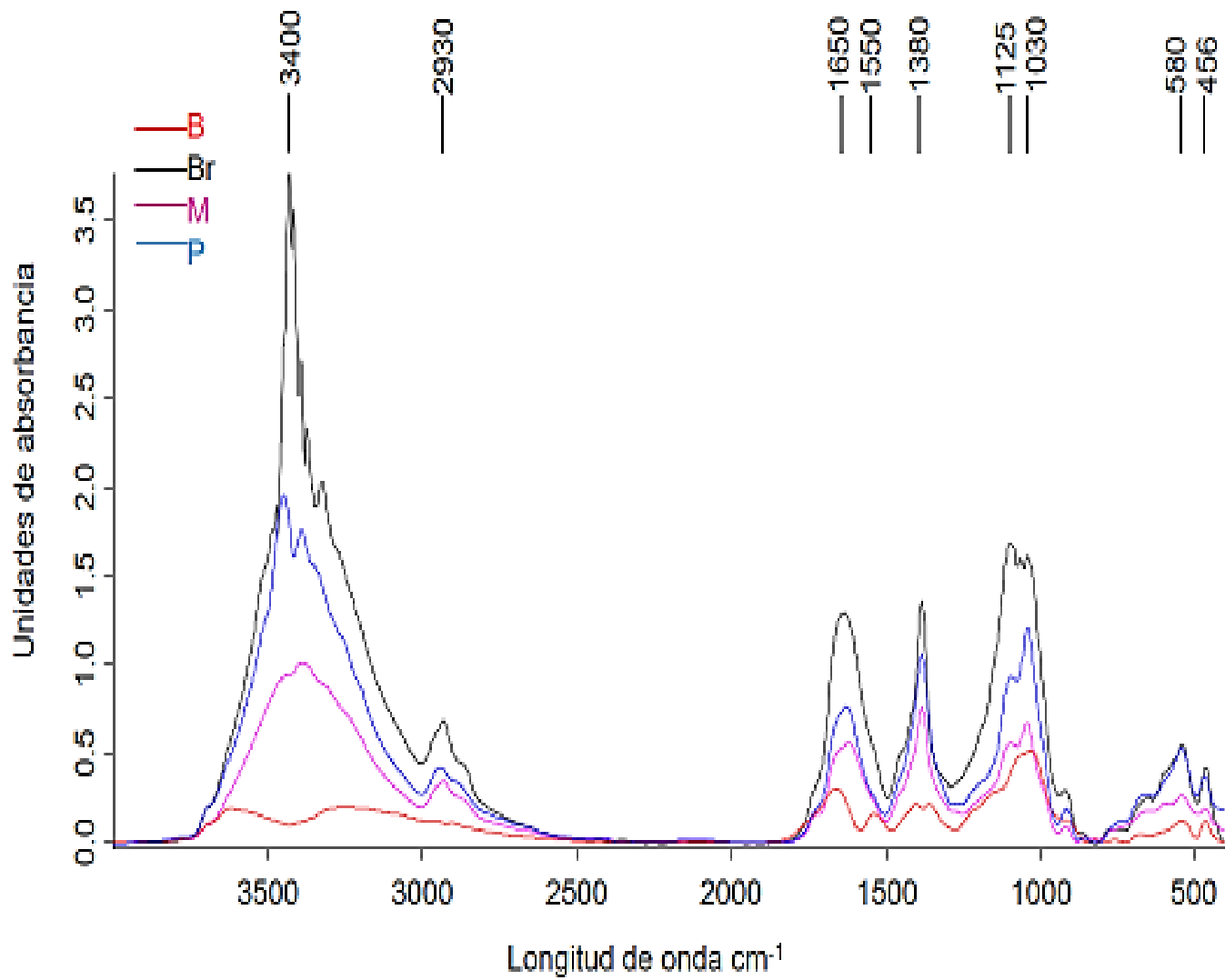


Figura 7. Espectro infrarrojo de la materia orgánica soluble. B, bosque; Br, bosque reforestado; M, cultivo de maíz; P, pastizal.

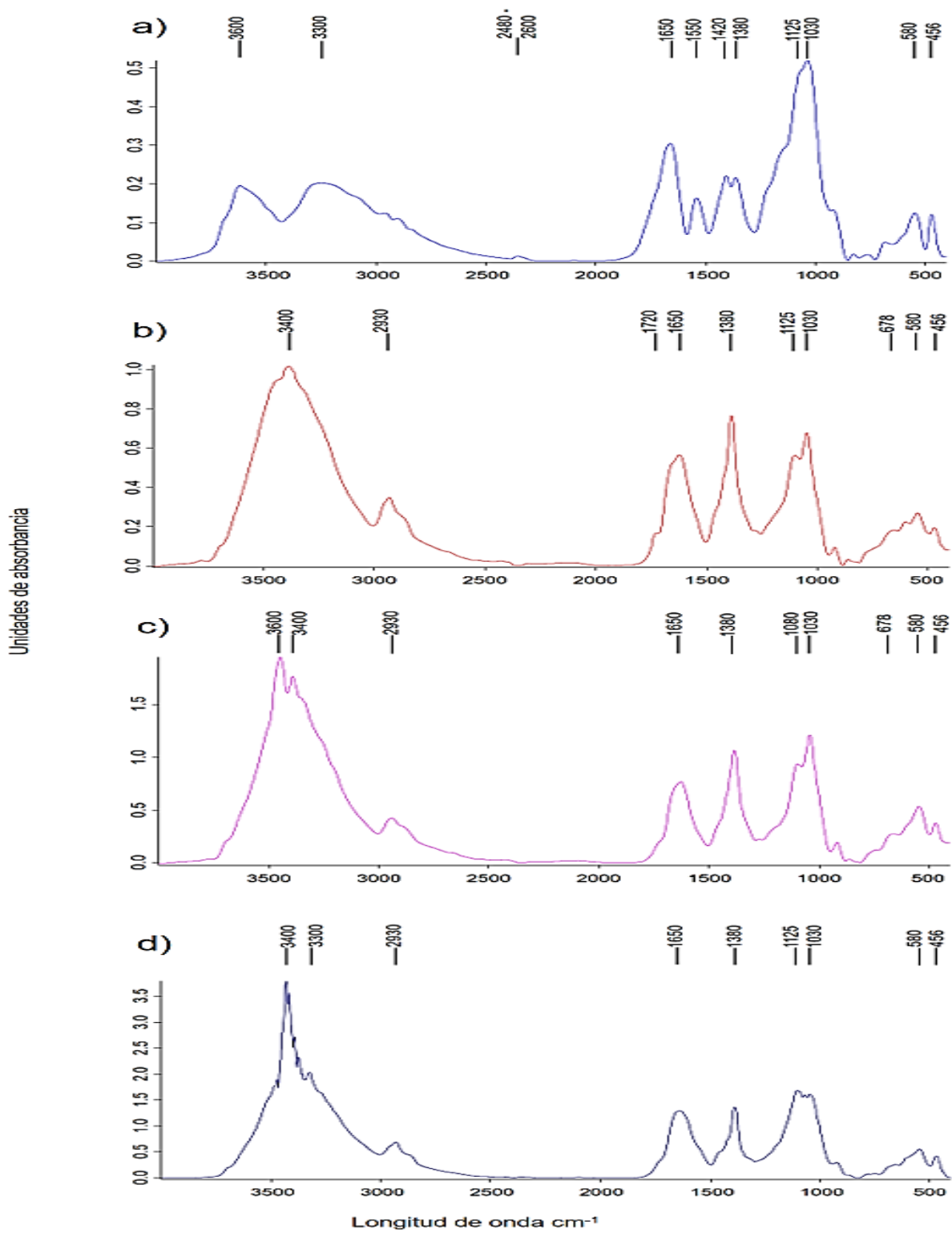





Figura 8. Espectros IR de la materia orgánica soluble; a) bosque, b) cultivo de maíz, c) pastizal, d) bosque reforestado.

Al realizar la segunda derivada de los IR en un intervalo de 2000 a 400 cm^{-1} se pudieron encontrar picos que no eran observables en los espectros originales, permitiendo obtener una mayor información sobre las diferencias presentes en la MO de cada uso de suelo; tal es el caso de 1720 cm^{-1} , 1550 cm^{-1} , 1080 cm^{-1} (ésteres, ácidos aromáticos) y 678 cm^{-1} los cuales fueron localizados en los espectros faltantes (señalados con ) , de igual forma se encontraron picos que no aparecían en ningún espectro original tales como 1510 cm^{-1} (tensión aromática C-H) localizados en B y M, 1420 cm^{-1} (deformación OH fenólico y tensión C-O) localizado en P y Br, 1230 cm^{-1} - 1260 cm^{-1} (tensión C-O y deformación OH de carboxilos, fenoles y esterres y éteres aromáticos (amidas banda III) localizados en M y P (señalados con ). Finalmente se observó un pico en 1460 cm^{-1} (deformación metilo, metileno y alquílicos) localizado en B, M y P (señalado con ) (Figura 9).

La mayor intensidad de las bandas de Br respecto a los demás usos de suelo, sugiere que presenta mayor número de estructuras de polisacáridos, amidas, esterres, éteres, grupos carboxilos, alcoholes, amidas y piridinas, lo cual le permite tener una mayor capacidad para ligar metales a través de la formación de sales humato-metal (Vaca *et al.*, 2006); mientras que la menor absorbancia en 1030 cm^{-1} en los demás tratamientos sugiere pérdida de materiales alifáticos y carbohidratos además de un enriquecimiento de los grupos carbonilo y OH fenólicos (Li *et al.*, 2013).

La banda 1460 o 1420 cm^{-1} en los tratamientos se sugiere presencia de derivados de lignina (Melina, 2019).

La banda 1720 cm^{-1} en el espectro original de M y segunda derivada de B, Br y P corresponde a ácidos carboxílicos tales como, ácido cítrico, oxalacético, alfa-cetoglutarico, málico, fumárico y succínico (Alvarez, 2003) los cuales son de gran importancia para las plantas, ya que participan en distintos procesos fisiológicos, tales como respiración, fotosíntesis, adsorción de nutrientes, ayudan a la raíz a asimilar agua y nutrientes aumentando la presión osmótica (Alvarez, 2003).

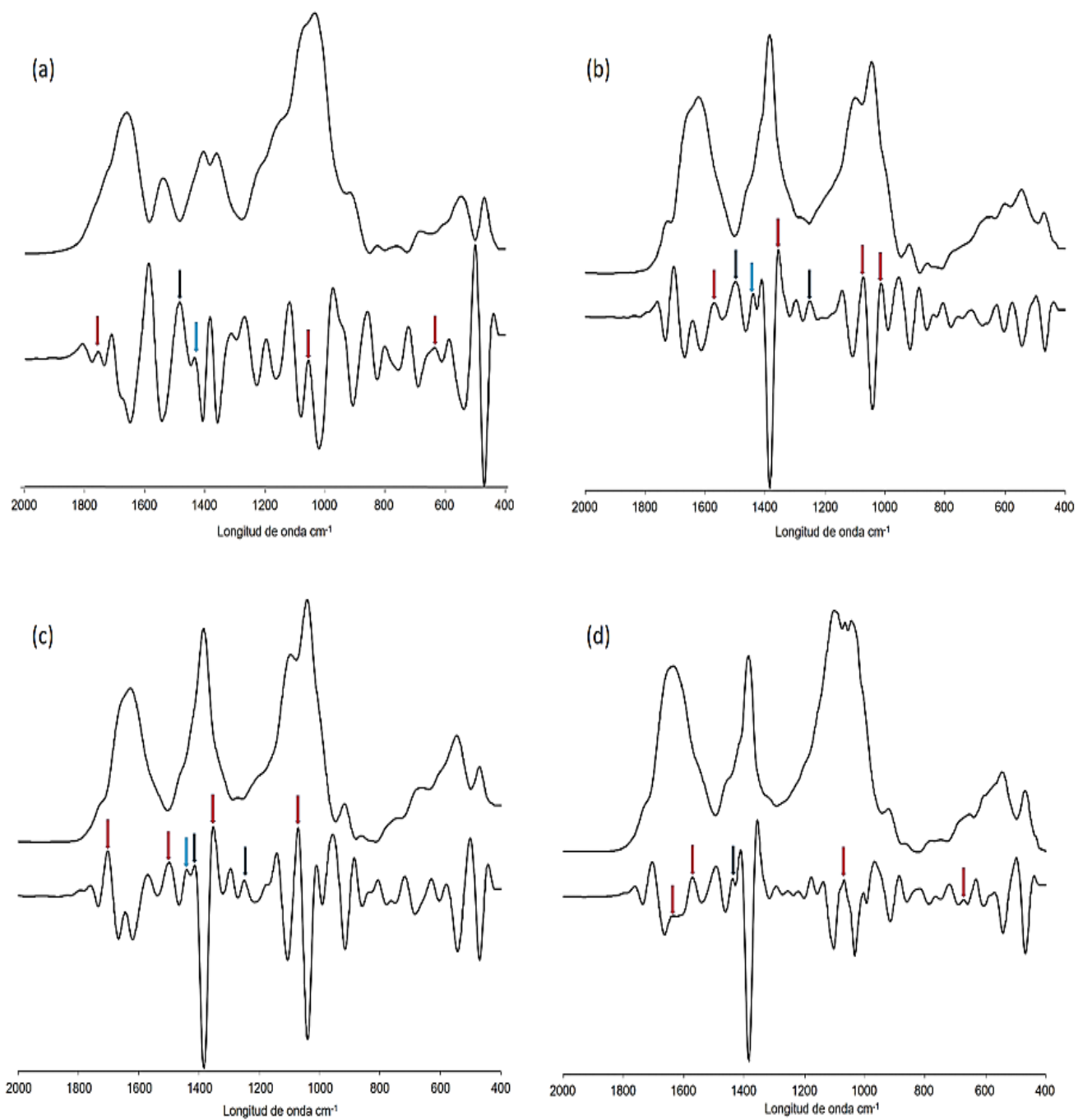





Figura 9. Segunda derivada de MO; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.

7.2.3. Espectrofotometría infrarrojo de los ácidos húmicos (AH)

Al igual que los espectros de IR de MO los espectros de IR de AH son cualitativamente similares, donde se observó que B obtuvo los valores de absorbancias más altos (Figura 10).

Los picos 3600 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} se presentaron en todas las muestras; 3100 cm^{-1} (tensión CH aromática) en P y Br, 1380 cm^{-1} en M; 1125 cm^{-1} en B; mientras que, 2920 cm^{-1} (tensión C-H alifático) y 1230 cm^{-1} no se localizaron en B; 1080 cm^{-1} todas excepto P; 1030 cm^{-1} en M y Br, 3400 cm^{-1} (vibraciones de tensión O-H de grupos carboxilo, hidroxilo) y 456 cm^{-1} en todas excepto en Br (Figura 11).

De igual forma se realizó una segunda derivada de los espectros de AH, en la cual se observó que los picos en 1550 cm^{-1} , 1460 cm^{-1} , 1380 cm^{-1} , 456 cm^{-1} se localizaron en los espectros restantes (señalando con ) , de igual forma el pico en 1420 cm^{-1} fue únicamente localizado en B (señalado con ) , finalmente los picos en 1650 cm^{-1} y 1125 cm^{-1} no se localizaron en B y M respectivamente (señalado con ) (Figura 12).

Los espectros P y Br presentaron mayor absorbancia de alcoholes correspondientes a la longitud de onda 3600 cm^{-1} (Figura 11), esta banda denota impurezas debido a minerales, agua o a una complejidad en las cadenas de ácidos húmicos, lo cual está directamente relacionado con el uso de suelo de acuerdo con Machado y colaboradores (2020).

La banda 2920 cm^{-1} característica de los AH no fue localizada en B, esto debido a que este tipo de uso de suelo recibe aportes permanentes y variados de materia orgánica fresca proveniente de la diversidad biológica presente (Quintero *et al.*, 2012); sin embargo una baja intensidad de esta banda y una alta intensidad en los picos 1380 cm^{-1} y 1460 cm^{-1} indican un débil carácter alifático (Paim *et al.*, 1990).

La presencia de la banda en 1650 localizada en Br y M puede atribuirse al proceso de reciclaje del N, debido a su carácter de nutriente esencial es reincorporado en las plantas antes de ser incorporado en el material húmico (López *et al.*, 2003).

Mientras que para las bandas 1550 y 1510 son regiones aromáticas que indican estructuras menos lábiles, lo que ayuda a la retención de carbono incluso bajo el efecto de la descomposición de residuos en sistemas de manejo intensos y la presencia de actividad biológica y la de aniones carboxilatos unidos a metales (Dick *et al.*, 2003; Machado *et al.*, 2020).

Generalmente los espectros de los AH analizados presentan una variabilidad en sus grupos funcionales, lo cual puede interpretarse como un menor grado de evolución de la MO, con un posible predominio de la fracción fúlvica (Quintero *et al.*, 2012).

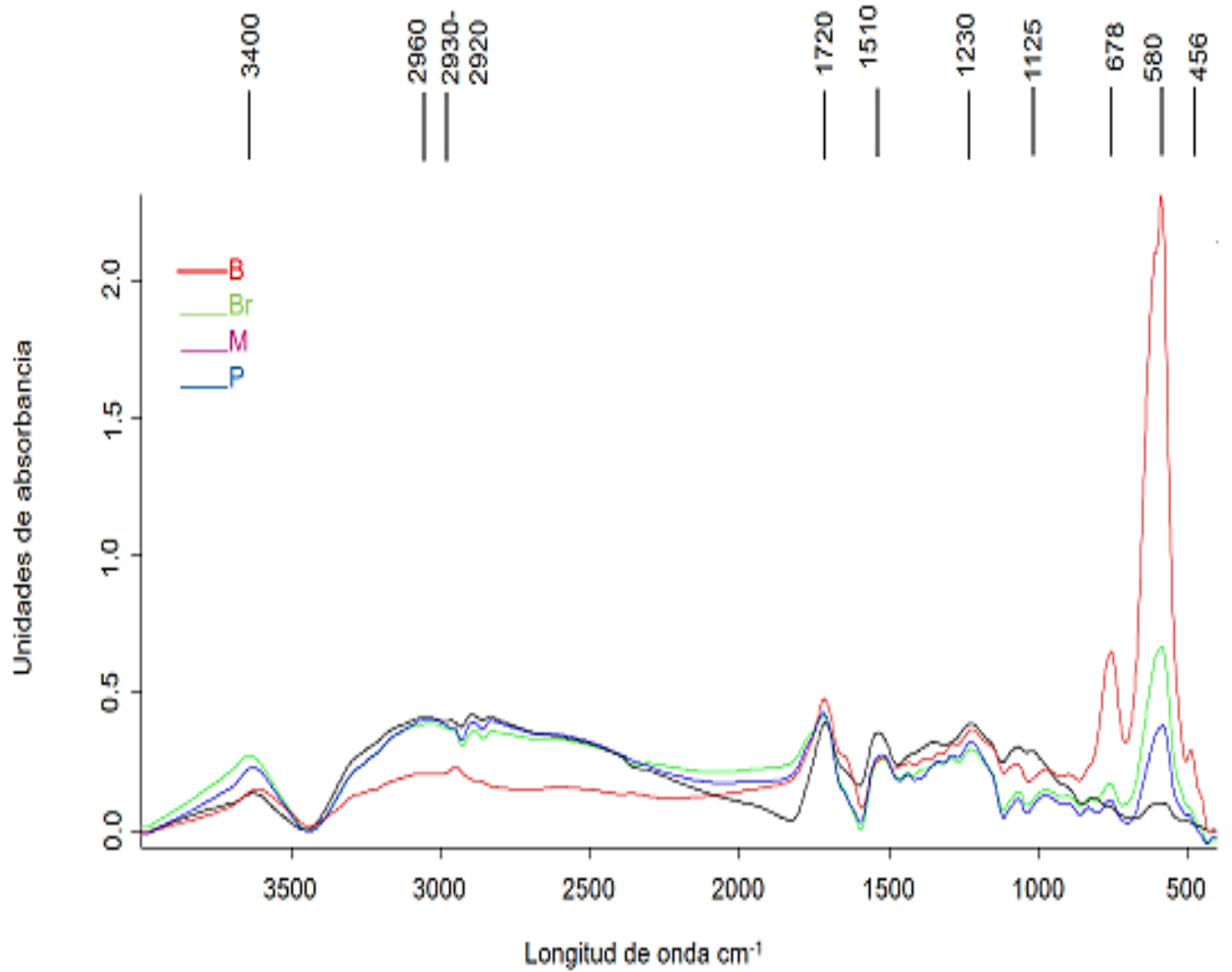


Figura 10. Espectro infrarrojo de los ácidos húmicos. B, bosque; Br, bosque reforestado; M, cultivo de maíz; P, pastizal.

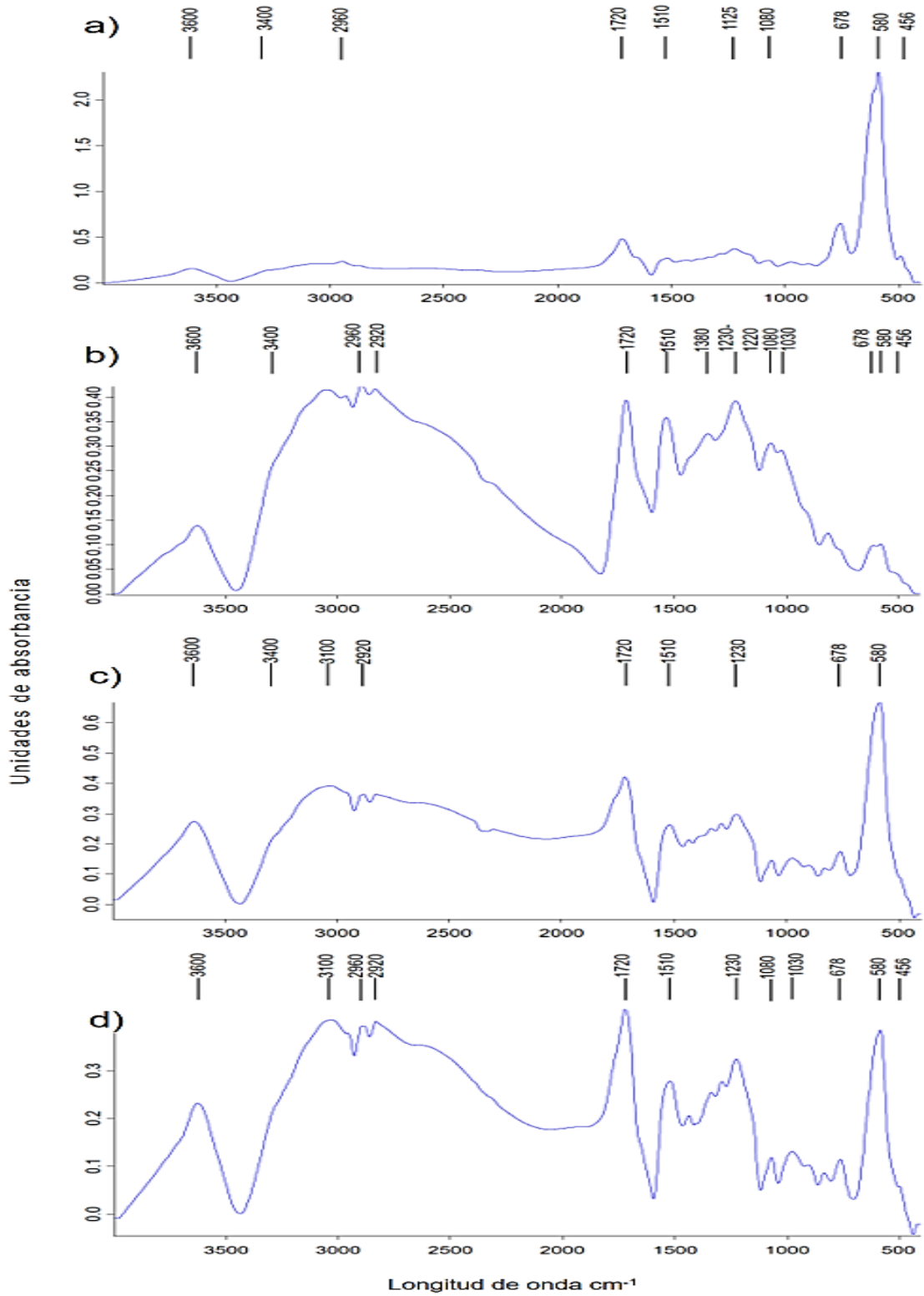


Figura 11. Espectros IR de los ácidos húmicos; a) bosque, b) cultivo de maíz, c) pastizal, d) bosque reforestado.

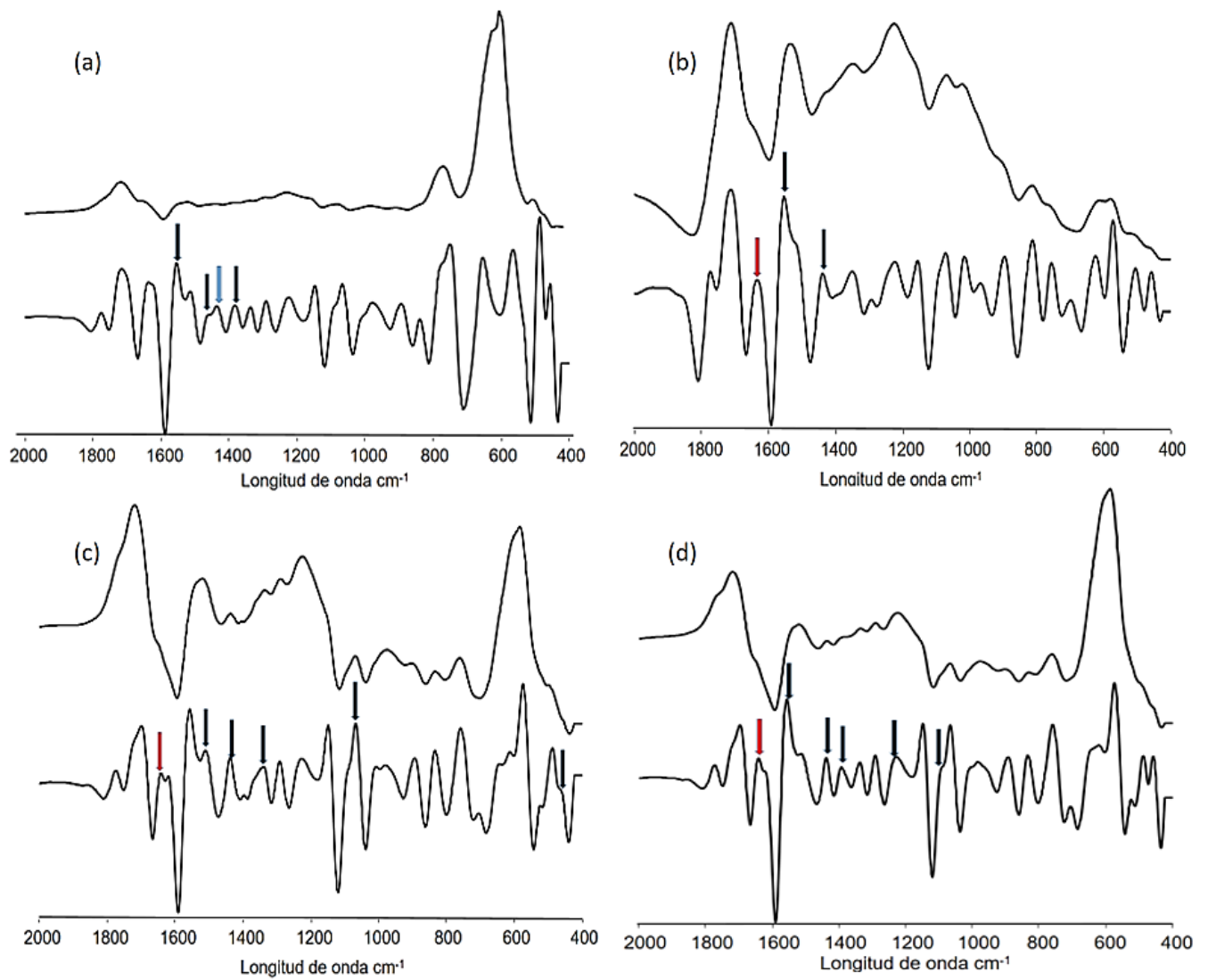


Figura 12. Segunda derivada de AH; (a) bosque, (b) cultivo de maíz, (c) pastizal, (d) bosque reforestado.

7.3. Densidades ópticas relativas

7.3.1. Densidades ópticas relativas de MOS

Las densidades ópticas relativas (DORs) permiten compensar errores de peso durante la preparación de la muestra y comparar datos entre los distintos espectros (Vaca *et al.*, 2006), se obtienen generalmente dividiendo las absorbancias en las bandas de 2930 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} , sin embargo para MOS se consideraron las bandas 1650 cm^{-1} y 1125 cm^{-1} debido a que las bandas en 2930 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} no fueron localizadas en todos los espectros.

En la **tabla 2** se muestran las DORs de los distintos usos de suelo respecto a 1650 cm^{-1} (tensión C=O de amidas secundarias (banda de amidas I), vibración de C=C aromático, tensión asimétrica COO^-) y 1125 cm^{-1} (alcoholes alifáticos).

El uso de suelo Br presenta una mayor abundancia de componentes aromáticos respecto a B, M y P, con relación a la banda 1125 cm^{-1} (Alcoholes alifáticos) los usos de suelo B, M y P poseen mayor cantidad relativa de componentes alifáticos.

A si mismo el uso de suelo P presenta un elevado contenido de grupos O-H, N-H ($3400/1125$), proteínas y alquenos ($1650/1125$), grupos COO^- ($1380/1125$) y polisacáridos ($1030/1125$).

La predominancia de proteínas y alquenos ($1650/1125$) en B, M y P indica que estos usos contienen una gran riqueza de estos (Melina, 2019), esto puede deberse a la adición de residuos orgánicos debido a su tipo de uso y el tipo de vegetación que

la conforma, mientras que la presencia de polisacáridos (1030/1125), los polisacáridos asociados a AH son la celulosa y la hemicelulosa, ácido acético, ciclopentenonas, furanos, furaldehídos y levoglucosenona, los cuales son un indicador de la descomposición y de la evolución de la MOS (López, 2003; Vásquez *et al.*, 2015).

Tabla 2. Densidades ópticas relativas de las principales bandas de los espectros infrarrojos de la materia orgánica soluble de los distintos usos de suelo respecto a amidas (1650 cm^{-1}) y alcoholes alifáticos (1125 cm^{-1})

Banda (cm^{-1})	Alcoholes alifáticos (1125 cm^{-1})				Banda (cm^{-1})	Amidas (1650 cm^{-1})			
	B	M	P	Br		B	M	P	Br
3400	-	1.68	5.76	2.21	3400	-	1.68	2.53	2.86
1720	-	0.29	0.6	-	1720	-	0.3	0.26	-
1650	1.05	1.01	2.27	0.78	1650	1	1	1	1
1460	-	0.48	-	0.29	1460	-	0.48	-	0.38
1380	0.75	1.36	3.14	0.81	1380	0.71	1.34	1.39	1.05
1030	1.8	1.2	3.56	0.96	1030	1.71	1.2	1.57	1.24

B, Bosque natural; M, cultivo de maíz; P, pastizal; Br, Bosque reforestado

7.3.2 Densidades ópticas relativas de AH

Las DORs en AH se obtienen de la misma manera que en MOS, sin embargo para este caso se consideró la banda en 1510 cm^{-1} debido a que la banda en 2930 cm^{-1} no fue localizada.

La **tabla 3** muestra las DORs de los AH respecto a 1510 cm^{-1} (tensión aromática C-H) donde se puede observar que en general los AH tienen un predominio de sus componentes alifáticos.

De igual forma el uso de suelo B posee mayores componentes aromáticos que los demás usos, lo que representa un signo indicativo del proceso de humificación (Vacta *et al.*, 2006), de igual forma presenta una predominancia de proteínas y alquenos ($1650/1510$), carboxilos, carbonilos, cetonas y aldehídos ($1720/1510$), esta última banda se mantiene en los demás usos de suelo.

Tabla 3. Densidades ópticas relativas de las principales bandas de los espectros infrarrojos de ácidos húmicos de los distintos usos de suelo respecto a C-H aromático (1510 cm⁻¹).

Banda (cm ⁻¹)	Tensión C-H aromático (1510 cm ⁻¹)			
	B	M	P	Br
3400	0.12	0.38	0.83	-
1720	1.81	1.10	1.55	1.60
1650	1.06	-	0.52	0.58
1550	0.87	-	-	-
1420	0.94	0.77	0.74	0.81
1380	1	0.90	0.92	0.86

B, Bosque natural; M, cultivo de maíz; P, pastizal; Br, Bosque reforestado

De esta manera este estudio finalmente aporta valiosos conocimientos sobre cómo el cambio en el uso del suelo impacta sus propiedades fisicoquímicas, particularmente la textura y el contenido de materia orgánica. Además, se destaca la variabilidad en la composición de la materia orgánica del suelo (MOS) y los ácidos húmicos bajo diferentes usos del suelo, con un enfoque especial en las diferencias observadas entre bosques reforestados y naturales. Estos hallazgos son cruciales para el manejo sostenible del suelo y la planificación de la reforestación, proporcionando una base científica para la toma de decisiones que promuevan la conservación y mejora de la calidad del suelo.

8. Conclusiones

El cambio de uso de suelo afecta significativamente sus propiedades fisicoquímicas, especialmente la textura y el porcentaje de materia orgánica, ya sea por el laboreo, la vegetación que crece en él o su manipulación de este.

El bosque reforestado mostró la mayor absorbancia en los grupos funcionales de la materia orgánica soluble (MOS), mientras que la menor absorbancia se observó en el suelo de bosque natural. En general, esta diferencia no se observó en los ácidos húmicos, lo que resultó en absorbancias similares en todos los usos de suelo.

De acuerdo a las densidades ópticas relativas de la materia orgánica soluble, el bosque reforestado presentó una dominancia de amidas, mientras que los demás usos de suelo presentaron una mayor cantidad relativa de componentes alifáticos. En cuanto a la tensión CH aromática de los ácidos húmicos, este dominó en todos los usos de suelo, siendo el suelo de bosque natural el que tuvo una mayor cantidad de componentes aromáticos en comparación a los demás usos de suelo.

9. Referencias

- Aghasi, B., Jalalian, A., & Honarjoo, N. (2010). The comparison of some soil quality indexes in different land uses of Ghareh Aghaj watershed of semirom, Isfahan, Iran. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 4(11), 528-532.
- Agostini, M. D. L. Á., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A., & Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ciencia del suelo*, 32(2), 171-176.
- Aguilar Campos, P. R. (2009). "Diagnóstico ambiental de la zona norte del Parque Estatal El Ocotal, en Timilpan, Estado de México [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM <https://repositorio.unam.mx/contenidos/227149>
- Al-Shammary, A. A. G., Kouzani, A. Z., Kaynak, A., Khoo, S. Y., Norton, M., & Gates, W. (2018). Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere*, 28(4), 581-596.
- Alvarez, A. J. L. (2003). Evaluación de la aplicación de un programa de nutrición a base de ácidos carboxílicos sobre la productividad de un huerto de paltos (Persea americana Mill) cv. Hass.
- Arteaga, B., Garcés, N., Guridis, F., & Pino, J. A. (2014). Una revisión sobre indicadores integradores para evaluar el impacto de las sustancias húmicas

- sobre el sistema suelo-agua de lixiviación (I). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 83-88.
- Baldotto, M. A., & Baldotto, L. E. B. (2014). Ácidos húmicos. *Revista Ceres*, 61, 856–881.
- Brady, N. (1984). *The Nature and Properties of Soils*. Maryland, USA. *Pearson education*.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Maserá, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (44), 18-36.
- Boguta, P., D'Orazio, V., Senesi, N., Sokołowska, Z., & Szewczuk-Karpisz, K. (2019). Insight into the interaction mechanism of iron ions with soil humic acids. The effect of the pH and chemical properties of humic acids. *Journal of Environmental Management*, 245, 367-374.
- Carter, M. R. (2002). Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy journal*, 94(1), 38-47.
- Castellano, M. J., Mueller, K. E., Olk, D. C., Sawyer, J. E., & Six, J. (2015). Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Global change biology*, 21(9), 3200-3209.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A., & Sereno, R. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y

- prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231.
- Chianese, S., Fenti, A., Iovino, P., Musmarra, D., & Salvestrini, S. (2020). Sorption of organic pollutants by humic acids: a review. *Molecules*, 25(4), 918.
- Cantú S., I., & Yáñez D., M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(45), 122-151.
- Cantú S., I., Díaz G., K. E., Y. Díaz, M. I., González R., H., & Martínez S., R. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 59-86.
- Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., Dendooven, L., & Reyes-Reyes, B. G. (2012). Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 189-197.
- Dick, D. P., Santos, J. H. Z., & Ferranti, E. M. (2003). Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two southern Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 29-39.
- Docampo, R. (2010). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. *Serie Actividades de Difusión*, 687, 81-89.

- Eguiarte, D. R. G. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Revista Terra Latinoamericana*, 25(2), 187-194.
- Fahramand, M., Moradi, H., Noori, M., Sobhkhizi, A., Adibian, M., Abdollahi, S., & Rigi, K. (2014). Influence of humic acid on increase yield of plants and soil properties. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 3(3), 339-341.
- Gabriels, D., & Lobo, D. (2011). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.
- Gallignani, M., Torres, M., Ayala, C., & Brunetto, M. D. R. (2008). Determinación de cafeína en café mediante espectrometría infrarroja de transformada de Fourier. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 31(2), 159-168.
- Garay, O., & Ochoa, A. (2010). Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del río Mantaro. Subproyecto “Pronóstico Estacional de lluvias y temperaturas en la Cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura”. Instituto Geodésico del Perú. Recuperado de: https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/5294/IGP_2010_Suelo_Agricola_Mantaro.pdf?sequence=1
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de:

<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251->

[1](#)

García, Y, Ramírez, Wendy, & Sánchez, Saray. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138. Recuperado en 18 de febrero de 2020, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es)

[03942012000200001&lng=es&tlng=es.](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es)

Gol, C. (2009). The effects of land use change on soil properties and organic carbon at Dagdami river catchment in Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 30(5), 825.

Gomes, B. A., Lopes, F., Andrade, M. H. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science and Engineering: C*, 62, 967-974.

González, A., Rodríguez, G., & Duque, J. F. (2021). Impacto de la cobertura boscosa y uso de suelo sobre la textura y conductividad hidráulica del suelo en la subcuenca del río Estibaná. *In Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología–APANAC* (pp. 257-262).

Gregorich, E. G., Beare, M. H., Stoklas, U., & St-Georges, P. (2003). Biodegradability of soluble organic matter in maize-cropped soils. *Geoderma*, 113(3-4), 237-252.

- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C., & Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4), 367-385.
- Gutiérrez, F. (1997). Aplicación de la espectrometría infrarroja al análisis químico de los bienes culturales. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 5(18), 56-60.
- Haynes, R. J. (2000). Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(2), 211-219.
- Hernández-Hernández, R. M., Ramírez, E., Castro, I., & Cano, S. (2008). Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia*, 42(3), 253-266.
- Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M., & Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Bioagro*, 25(1), 47-56.
- Joffre, R., Ågren, G. I., Gillon, D., & Bosatta, E. (2001). Organic matter quality in ecological studies: theory meets experiment. *Oikos*, 93(3), 451-458.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.

- Katon, J. E. (1996). Infrared microspectroscopy. A review of fundamentals and applications. *Micron*, 27(5), 303-314.
- Li, X., Xing, M., Yang, J., Zhao, L., & Dai, X. (2013). Organic matter humification in vermifiltration process for domestic sewage sludge treatment by excitation–emission matrix fluorescence and Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of hazardous materials*, 261, 491-499.
- Loaiza, J. (2011). El recurso suelo. *Suelos ecuatoriales*, 41(1), 6-18
- López B., W., Reynoso S., R., López M., J., Villar S., B., Camas G., R., & García S., J. O. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 897-910.
- López, L., Mónaco, S. L., & Méndez, B. (2003). Caracterización de la materia orgánica extraída de suelos por diferentes técnicas. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Universidad Central de Venezuela, 29, 257-284.
- López B., W., Reynoso S., R., López M., J., Camas G., R., & Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 65-79.
- López M. y Estrada H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, *Bioagrobiencias*, 8(1), 3-11.
- López-Salazar, R., González-Cervantes, G., Vázquez-Alvarado, R. E., Olivares-Sáenz, E., Vidales-Contreras, J. A., Carranza de la Rosa, R., & Ortega-Escobar, M. (2014). Metodología para obtener ácidos húmicos y fulvicos y su

caracterización mediante espectrofotometría infrarroja. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE8), 1397-1407.

López-Vazquez, V. H., Balderas-Plata, M. A., Chávez-Mejía, M. C., Juan-Pérez, J. I., & Gutiérrez-Cedillo, J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 22(2), 136-144

Lubal, P., Široký, D., Fetsch, D., & Havel, J. (1998). The acidobasic and complexation properties of humic acids: Study of complexation of Czech humic acids with metal ions. *Talanta*, 47(2), 401-412.

Machado, W., Franchini, J. C., de Fátima Guimarães, M., & Tavares Filho, J. (2020). Spectroscopic characterization of humic and fulvic acids in soil aggregates, Brazil. *Heliyon*, 6(6).

Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., & Reyes-Sosa, M. B. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 871-881.

Mas, J. F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).

Melina Garcia, D. (2019). Calidad de la materia orgánica soluble en vermicomposta elaborada con estiércol de bovino o equino y sustrato postcosecha del hongo

- pleurotus spp. [Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/105728>
- Méndez, J. M., Haller, V. V., Spínola, A. G., Flores, J. I. C. y Cruz, M. D. J. S. (2017). Incremento de la materia orgánica del suelo y rendimiento de mango en Luvisoles, Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*, 499-508.
- Moreno, C., González, M. I., & Egido, J. A. (2015). Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Ecuador es Calidad*, 2(1).
- Mosquera, C. S., Bravo, I., & Hansen, E. W. (2007). Comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. *Revista Colombiana de Química*, 36(1), 31-41.
- Nemes, A., & Rawls, W. J. (2004). Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. *Developments in soil science*, 30, 47-70.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (s.f.). *Textura del suelo*. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#top
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.
- Paim, S., Linhares, L. F., Mangrich, A. S., & Martin, J. P. (1990). Characterization of fungal melanins and soil humic acids by chemical analysis and infrared spectroscopy. *Biology and Fertility of Soils*, 10, 72-76.

- Porta C. J., López-Acevedo R. M. & Roquero. C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España, Madrid: Ediciones Mundi prensa
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Pignatello, J. J. (1998). Soil organic matter as a nanoporous sorbent of organic pollutants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 76, 445-467.
- Quintero G., D., Huelva L., R., H., O. L., Guridi I., F., & Louro B., R. (2012). EL sistema de usos de los suelos Ferralíticos modifica la estructura y las propiedades de sus ácidos húmicos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4), 55-66.
- Quiroga, A. R., Galantini, J. A., & Studdert, G. A. (2017). La materia orgánica como indicador de cambios en la calidad de los suelos influenciados por el manejo. *Manejo y conservación de suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas*, 139-159.
- Rodríguez, J., Mañunga, T., & Cárdenas, C. (2012). Influencia de las fracciones de materia orgánica sobre el desempeño de un sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(2), 447-455.
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E., & Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *REIBC*, 2(5), 63-70.

Ramírez C., R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

Recuperado de

<http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>

Razaby, T. E. (2010). Soluble Organic Matter, its Biodegradation, Dynamics and Abiotic Production. [Tesis doctoral. Universidad de Canterbury]. Repositorio

de investigación de UC.

https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/5302/thesis_fulltext.pdf?sequence=1

Reyes H., Aguilar, M., Aguirre, J. R., & Trejo, I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones geográficas*, (59), 26-42.

Ribo Herrera, M. (2004). Balance de macronutrientes y materia orgánica en el suelo de agrosistemas hortícolas con manejo integrado y ecológico. [Tesis doctoral. Universidad de Valencia]. Repositorio digital del instituto de Valencia de investigaciones agrícolas. <https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/6186>

Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de iniciación científica*, 4, 101-105.

Rivero, C., Chirenje, T., Ma, L. Q., & Martinez, G. (2004). Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma*, 123(3-4), 355-361.

Riveros S. R., (2007) Efecto de la Materia Orgánica Soluble y Coloidal de los Biosólidos Sobre la Biodisponibilidad de Cu, Pb, Ni, Cd y los Niveles de Ácido

Ascórbico y Glutación en Plantas [Tesis de licenciatura. Universidad de Chile].

Repositorio de la universidad de chile.

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/105668/riveros_r.pdf?sequence=3

Rodríguez, M. D., Venegas, J., Angoa, P., & Montañez, J. L. (2010). Extracción secuencial y caracterización fisicoquímica de ácidos húmicos en diferentes compost y el efecto sobre trigo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(2), 133-147.

Rubio Gutiérrez, A. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. [Memoria de ingeniero técnico agrícola, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas <http://hdl.handle.net/10261/57951>

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. *Universidad de la República: Facultad de agronomía*. Montevideo, Uruguay.

Ruíz, M., Elizalde, G., & Paolini, J. (1997). Caracterización de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. *Agronomía Tropical*, 47(4), 381-395.

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381-397

- Sanmiguel Plazas, R. A., Aguirre Pedreros, W. J., & Rondón Barragán, I. S. (2014).
Perspectivas sobre el uso de sustancias húmicas en la producción aviar. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 9(1), 104-113.
- Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., & Gamino, M. D. L. R. (2011).
Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80,
29-37.
- SEMARNAT. (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que
establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de
suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*.
- Shirazi, M. A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture.
Soil Science Society of America Journal, 48(1), 142-147.
- Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. J. (2009). Análisis de la contaminación
del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación
económica. *Semestre económico*, 12(23), 13-34.
- Stengel, P & Gellini S. (2003). *Soil fragile interface*. Francia, Paris: CRC PRESS
- Strosser, E. (2010). Methods for determination of labile soil organic matter: an
overview. *Journal of Agrobiology*, 27(2), 49.
- Sutton, R., & Sposito, G. (2005). Molecular structure in soil humic substances: the
new view. *Environmental science & technology*, 39(23), 9009-9015.
- Thompson, L. (1988). Los suelos y su fertilidad. Nueva York, USA: *Reberte*.

- Tinoco, P. (2000). Caracterización molecular de la materia orgánica de suelos afectados por distintos tipos de degradación en la Comunidad de Madrid [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio de datos de investigación UAM. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/674673>
- Tortosa, G. (2007). Extracción de materia orgánica soluble de un compost de orujo de oliva de dos fases [Tesis de licenciatura, Universidad de Murcia]. Consejo superior de investigaciones científicas. <http://hdl.handle.net/10261/24568>
- Vaca Paulín, R., Lugo de la Fuente, J., & Esteller Alberich, M. V. (2006). Caracterización de la materia orgánica soluble y de los ácidos húmicos en suelo acondicionado con lodo residual fresco o compostado. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 27-37.
- Valero, M. A. C., & Torres, L. E. C. (1999). Sustancias húmicas en aguas para abastecimiento. *Ingeniería e Investigación*, (44), 63-72.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. R. D., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra E. & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37.
- Vásquez, J. R., Schellekens, J., & Kaal, J. (2015). Composición de la materia orgánica en los suelos de seis zonas edafoclimáticas del Magdalena (Colombia). *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 5(3), 243-258.

- Veobides-Amador, H., Guridi-Izquierdo, F., & Vázquez-Padrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos tropicales*, 39(4), 102-109.
- Von Lützow, M., Leifeld, J., Kainz, M., Kögel-Knabner, I., & Munch, J. C. (2002). Indications for soil organic matter quality in soils under different management. *Geoderma*, 105(3-4), 243-258.
- Xia, Q., Ruffly, T., & Shi, W. (2020). Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 107953.
- Zagal, E., y Córdova, C. (2005). Soil organic matter quality indicators in a cultivated Andisol. *Agricultura Técnica*, 65(2), 186-197.