

Espinosa-Fuentes, M.L. Hernández-Pablo, N., Casanova-López, K., Velázquez-Gabriel, R. 2025. Estimación del Potencial de Captura de Carbono en Suelos de un Sitio de la Reserva de Calakmul durante la Temporada de Lluvias, p. 61-92. En: J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202503.

Estimación del Potencial de Captura de Carbono en Suelos de un Sitio de la Reserva de Calakmul durante la Temporada de Lluvias

*M.L. Espinosa-Fuentes¹, N. Hernández-Pablo²,
K. Casanova-López², R. Velázquez-Gabriel²*

¹Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático
Universidad Nacional Autónoma de México

²Facultad de Química
Universidad Autónoma del Carmen

Resumen

El presente trabajo estimó las propiedades fisicoquímicas y el almacén de carbono edáfico en un bosque tropical en la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Los resultados de pH, conductividad y textura obtenidos, nos permiten clasificar el suelo como neutro a moderadamente alcalino, con una salinidad despreciable y de franco arenoso a franco arcilloso arenoso. Con respecto a los % de MO y CO, los valores obtenidos nos permiten clasificar a los suelos como suelos con contenidos de MO y CO de medios a muy altos, que favorecen la fertilidad, con un alto contenido de nutrientes y un potencial más alto de almacenamiento de carbono. Los suelos fueron clasificados como suelos orgánicos, lo cual está de acuerdo con la estructura y vegetación encontrada. Se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad entre 10 y 30 cm de profundidad, siendo más elevado a nivel superficie, esto es de esperarse ya que el muestreo se realizó durante la temporada lluviosa. Se encontraron correlaciones significativas entre el contenido de humedad y la conductividad, y correlaciones inversas significativas entre los % de limo y arcilla y el pH, sugiriendo que la textura juega un papel muy importante en los valores de pH observados en ambos sitios. Los resultados muestran que, el sitio de estudio no ha perdido a gran escala sus propiedades y sigue siendo un suelo con alto contenido de nutrientes y apto para almacenamiento de carbono; y que la degradación y modificaciones que ha sufrido el sitio no ha sido significativa. El potencial de captura de carbono encontrado fue visiblemente más bajo que el reportado para bosques y parques nacionales semi-remotos, pero significativamente más elevado que el reportado para bosques urbanos en los alrededores de la Ciudad de México. Finalmente, se puede concluir que, el bosque tropical subperennifolio de Calakmul cuenta con un alto almacenamiento de carbono.

Palabras clave: captura de carbono, suelos, lluvias, Calakmul, Campeche.

Abstract

The study aimed to assess the physical and chemical properties, as well as the carbon storage in the soil of a tropical forest in the Calakmul Biosphere Reserve. The results indicated that the soil is neutral to moderately alkaline, with low salinity, and has a sandy loam to sandy clay loam texture. The organic matter (OM) and carbon (CO) content in the soil was found to be medium to very high, promoting fertility, high nutrient content, and potential for carbon storage. The soil was classified as organic, consistent with its structure and vegetation. Variations in moisture content were observed between depths of 10 and 30 cm, with higher moisture levels at the surface due to the rainy season. The study also found significant correlations between moisture content and conductivity, as well as significant inverse correlations between silt and clay content and pH, indicating the important role of soil texture in pH values at the study sites. The study results indicate that the site has not experienced significant loss of its properties on a large scale. The soil still has a high nutrient content and is suitable for carbon storage. Although the site has undergone some degradation and modifications, they have not been significant. The potential for carbon sequestration was found to be lower than that reported for semi-remote forests and national parks, but significantly higher than that reported for urban forests around Mexico City. In conclusion, the sub-evergreen tropical forest of Calakmul has a high carbon storage capacity.

Keywords: Carbon storage, Soils, Rain, Calakmul, Campeche.

Introducción

Los bosques y selvas de México son considerados de gran diversidad biológica y alta productividad. Es reconocido que los bosques proveen una gran cantidad de servicios como control de erosión, control de inundaciones, conservación del agua, purificación del aire y agua, estabilización del clima local, entre otros servicios (Gibson, *et al.*, 2000). Entre los bosques más importantes para combatir el cambio climático son los bosques tropicales ya que cuentan con una alta capacidad de absorber carbono. Actualmente, México tiene el privilegio de contar con bosques tropicales principalmente en el sureste, en los estados de Chiapas, Tabasco y Campeche. Los bosques tropicales, también conocidos como selva húmeda o selva alta perennifolia, de acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), constituyen uno de los ecosistemas con mayor riqueza de especies. Están formados por árboles de hasta 30 metros o más de alto, de muy diversas especies y conservan su follaje todo el año, por eso se les llama perennifolias, esta característica conlleva que se almacenen grandes cantidades de materia orgánica (SEMARNAT, 2017). Estos ecosistemas tienen una gran importancia ya que equilibran la ecología, proporcionan diversos servicios ambientales a la sociedad, es decir, producen oxígeno, permiten que el agua de lluvia se filtre al subsuelo y se recarguen los mantos acuíferos, mantienen los suelos fértiles al producir materia orgánica, constituyen el hogar de animales, proporcionan madera y materias primas para fabricar medicamentos, resinas, entre otros productos. (CONANP, 2017).

En estos sitios llueve en grandes cantidades y las temperaturas se mantienen constantes durante todo el año. Las hojas de las plantas y de los árboles se caracterizan por ser muy grandes pues su función es captar la mayor cantidad de luz posible. (SEMARNAT, 2017). Los bosques cubren una tercera parte del sistema terrestre y, por lo tanto, el carbono que se almacena en los suelos forestales representa una tercera parte del total de carbono del suelo a un metro de profundidad, que aproximadamente es de 1500 Gt (Dixon, 1995).

Lo anterior ha llevado a la conclusión de que los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de suelo, por lo que es importante considerar el manejo de los bosques para la fijación del carbono (FAO, 2002). Estos bosques se consideran que cuentan con una riqueza y gran variedad de seres vivos. Es importante cuidar estos espacios ya que sin ellas se pierden grandes cantidades de nutrientes y en la mayoría de los casos es irreversible. Los sumideros forestales son importantes para la mitigación del cambio climático y en latitudes templadas o boreales los sistemas forestales se comportan como sumideros netos.

El cambio climático ha tomado gran importancia a nivel mundial debido a las consecuencias que provoca al medio ambiente, este se atribuye a los gases de efecto invernadero, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático reconoce seis, entre ellas se encuentra el CO₂; este elemento es el principal gas que provoca este efecto, ocupando el 0.03% del volumen atmosférico, y siendo responsable del 64 %

del forzamiento radioactivo que provoca el calentamiento global (Myhre *et al.*, 2013). La capacidad de los bosques de capturar y retener el carbono ayuda a la mitigación del cambio climático, ya que reduce el contenido de este gas de efecto invernadero en la atmósfera. Uno de los servicios ecosistémicos más importantes proporcionados por los bosques es el almacenamiento de carbono, es decir, “la captura y el almacenamiento a largo plazo de CO₂, que constituye el principal motor del cambio climático”. (Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo (CORDIS, 2017).

Uno de los sistemas que son eficaces son los reservorios ya que, desempeñan un papel crucial en la regulación del clima y el mantenimiento de la vida en nuestro planeta, a su vez son componentes fundamentales del ciclo del carbono, un proceso esencial para el equilibrio biogeoquímico de la Tierra. El carbono circula continuamente entre la atmósfera, los océanos, la biosfera y la litosfera en una serie de interacciones complejas. Entre los principales reservorios se encuentra el suelo, en él se almacena grandes cantidades de carbono orgánico en forma de materia orgánica descompuesta, raíces y microorganismos.

Las tasas de acumulación de carbono dependen de la producción primaria neta de vegetación, que a su vez depende de la radiación solar, la temperatura del aire, los nutrientes y el agua necesarios para que las

plantas crezcan (Jobbágy & Jackson, 2000). Sin embargo, se desconoce las características y el almacenamiento de carbono que posee este bosque. Es importante conocerlo ya que de esta forma se logra un mejor aprovechamiento del sitio y se conoce la eficiencia y deficiencia que puede presentar. Para lograr que el carbono se acumule en los suelos, es necesario implementar medidas de manejo adecuadas para ello.

Los suelos tropicales también requieren atención y medidas de conservación, ya que por ser abundantes en biomasa suelen deforestarse para explotar sus recursos maderables o emplearse para la agricultura intensiva, lo que ha provocado su infertilidad. Al realizar este estudio funcionara para identificar si el suelo de esta zona es una fuente o un sumidero de carbono en los diferentes usos del suelo (FAO, 2002). Ante el calentamiento global, se hace de vital importancia promover estrategias que permitan reducir al mínimo la pérdida de bosques tropicales y a su vez promuevan la regeneración y restauración de estos bosques, como estrategias para mitigar el calentamiento global y conservar la biodiversidad. El presente trabajo tuvo como objetivo estimar el almacén de carbono edáfico en sistemas con diferente uso de suelo y estudiar las propiedades fisicoquímicas de un bosque tropical del área de Calakmul, Campeche perteneciente a la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC).

Antecedentes

Estudios realizados en México

En México se han realizado estudios en diferentes tipos de suelo en bosques para determinar el potencial que tienen para almacenar carbono en ellos, en donde se especifica que el paso de los años beneficia o afecta el potencial en los sitios. En suelos de origen volcánico, la edad de la superficie es un factor determinante de la capacidad de almacenamiento de C (Peña *et al.*, 2009). En bosques de pino y oyamel localizados en el campo volcánico de la sierra del Chichinautzin se encontró, bajo un régimen rústico, que los Andosoles de edades entre 8 000 y 10 000 años antes del presente (A.P.) tenían una acumulación de C orgánico total en el suelo de entre 370 y 540 Mg ha⁻¹, respectivamente. A lo largo de la cronosecuencia, con Leptosoles, Regosoles y Andosoles de entre 1835 hasta 10 000 años de edad, se estimó una tasa de incremento de carbono de 40 Mg ha⁻¹ cada 1000 años, sugiriendo que alrededor del 61% de la variabilidad del C se relaciona con la edad del suelo (Peña *et al.*, 2009). En el sitio Cuauhtzin (8000 años A.P., 540 Mg ha⁻¹), se obtuvo que debido a la cronosecuencia el C aumentó, están relacionado estos dos sitios ya que ambos se consideran suelos andosoles.

En Atécuaro Michoacán en suelos de tipo Cambisol y Andosol, el cambio de bosques de encinos (130 g C kg⁻¹) a pastizales (48 g C kg⁻¹) reduce el carbono orgánico del suelo (COS) en un 63 %. El cambio de uso de suelo tuvo un impacto negativo y significativo en el COS asociado a las fracciones arcillosa y limosa (Covaleda *et al.*, 2011). Esta respuesta puede explicarse por la disminución

del pH del suelo derivada de las prácticas de manejo, lo cual facilita la formación de complejos del tipo metal-humus-arcillas, mejora la protección física del COS y consecuentemente, disminuye la actividad microbiana (Huygens *et al.*, 2005).

En Ixtlán de Juárez, el COS en la localidad con menor precipitación fue de 2.7 ± 0.39 mg g⁻¹, el bosque de 1 año (2.7 ± 0.25 mg g⁻¹) y el bosque de 20 años después del aprovechamiento (1.9 ± 0.27 mg g⁻¹). El aprovechamiento forestal disminuyó 16 y 29 % la concentración de COS después de 1 y 20 años, en comparación con el bosque de andosoles (Huygens *et al.*, 2005). Estos resultados en la cantidad total de C y en la tasa de mineralización sugieren una mayor disponibilidad de materia orgánica en el bosque de un año, esto favorece a la cantidad de materia orgánica disponible del suelo.

En Michoacán, los bosques utilizados para la elaboración de carbón disminuyen la concentración y la tasa de mineralización de C orgánico en los primeros centímetros, pasando de 114 a 55 g kg⁻¹ (Gómez *et al.*, 2009). En la temporada seca la actividad microbiana es inhibida, por lo que se acumula la materia orgánica del suelo (MOS) y no hay ningún flujo de mineralización de C. Por otra parte, las quemaduras redujeron la cantidad de CO₂ después de 28 días debido a que reduce la cantidad de materia orgánica del suelo y el sustrato de C para los microorganismos del suelo (Gómez *et al.*, 2009). El método comúnmente aplicado para la determinación del carbono orgánico total de estos suelos estudiados a diferentes profundidades o globalmente para uno o más horizontes

y transformar los datos tomando en consideración la densidad y la pedregosidad del suelo. Las estadísticas se calculan sobre diferentes muestras para determinar las existencias de carbono. Los resultados pueden ser expresados en kg cm^2 , t ha^{-1} o Gt (Pg) totales sobre áreas especificadas y a varios rangos de profundidad. La escala puede ser el lugar o parcela, la cuenca, la región, un país específico o un continente o la zona agroecológica (FAO/IIASA, 1999). La extensión espacial es

construida usando mapas digitales para las distintas unidades de suelos considerados.

El bosque de Calakmul se considera el segundo bosque tropical de mayor extensión en América, después de la selva del Amazonas. La Selva Maya es uno de los pulmones más importantes de México; captura el CO_2 , generado por diversas fuentes para transformarlo en oxígeno, se espera que los resultados confirmen estos datos.

Metodología

Área de estudio

La Reserva de la Biosfera de Calakmul se encuentra al Sureste del estado de Campeche dentro del municipio de Calakmul. Sus límites son, al Este con el estado de Quintana Roo, y al Sur con Guatemala. Esta reserva forma parte de la segunda área de selva tropical más grande del continente americano – la Selva Maya. Sus coordenadas limítrofes son $19^\circ 15'$ y $17^\circ 45'$ N y $90^\circ 10'$ y $89^\circ 15'$ O. La superficie de la reserva es de 723.185 ha, su topografía es bastante homogénea y el rango altitudinal va de los 260 a los 385 msnm. El clima es cálido subhúmedo, con una temperatura media anual alta de 27°C y una baja de 18°C , y con precipitaciones medias anuales de 750 mm (Arriaga *et al.*, 2000; DOF., 1994). Calakmul es la región de selva tropical más importante del continente norteamericano. Se encuentra a 322.7 km de Ciudad del Carmen y constituye la región de selva tropical más importante del continente norteamericano. Las características geológicas de la región hacen que la mayor parte del agua se encuentre en depresio-

nes, en los llamados “bajos” que contienen depósitos aluviales cuaternarios producto de la dilución y del transporte de las rocas calizas. La alta proporción de áreas bajas de inundación intermitente, así como algunas permanentes son conocidas como “aguadas.” Las lagunas y aguadas forman parte de un sistema de bajaríos o *ak'alches*, los cuales a su vez son parte de humedales extraordinarios que por su intermitencia albergan un gran número de especies animales de la selva (Boege & Fuentes, 2000).

Las selvas altas subperennifolias se encuentran en laderas de poca pendiente, tienen alturas mayores a los 30 m y cubren una superficie menor a las 10 000 ha. Las selvas medianas subperennifolias cubren la mayor superficie de la reserva con más de 480 000 ha y son comunidades vegetales de 15 a 25 m de altura en donde un 25 a 50 % pierden sus hojas. Las selvas bajas inundables subperennifolias tienen una superficie importante de alrededor de 85 000 ha, la altura del dosel va de los 4 a 15 m y un 25 a 50 % de las especies pierden sus hojas (Arriaga *et*

al., 2000; Morales *et al.*, 2001). El sitio seleccionado como área de estudio se localiza en la comunidad Nuevo Bécál, Calakmul, Campeche, las coordenadas se muestran en la tabla 1.

Muestreo del suelo

Se consideró un sitio de estudio en la temporada de lluvias 2023, el sitio se encuentra en Nuevo Bécál, Calakmul, Campeche. El sitio se encuentra cercano a una Aguada; en donde se tomaron en cuenta 5 puntos, colectando 3 muestras por cada punto, la primera a una profundidad de 0.10 m y la segunda a 0.30 m con un nucleador de profundidad de 193.3 cm³ de volumen esto con el fin de observar si hay un cambio de materia orgánica por profundidad del punto, la última muestra se recolecto con ayuda de un cilindro metálico de 95.4261 cm³ este último para determinar la densidad aparente. Se registró el lugar de muestreo con ayuda de estacas de madera y se ubicó geográficamente el sitio. En la figura 1 se muestra el estado geográfico en el que se encuentra el primer sitio, se observa que cuenta con gran vegeta-

Tabla 1. Coordenadas del sitio.		
Sitio	Latitud	Longitud
La Aguada	18°43'34.0"N	89°12'16.7"O

ción, no mostro inundación y con presencia de palo mulato (*Bursera simaruba*), chechén prieto (*Metopium brownei*) e Iraca (*Carludovica palmata*).

Acondicionamiento de las muestras

Una vez obtenidas las muestras del suelo están fueron etiquetadas y embolsadas, posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio para seguir la siguiente metodología:

1. Las muestras pesadas y posteriormente secadas a temperatura ambiente. Se extendieron bajo la sombra en una superficie plana y en un lugar bien ventilado para acelerar el secado (figura 2), esto se realizó para mejorar la homogeneización de la muestra y disminuir los cambios químicos indeseables.



Figura 1. Sitio de la Aguada.



Figura 2. Secado de muestras.

2. De acuerdo con los requerimientos en los análisis químicos las muestras fueron molidas con ayuda de un mortero y un pistilo, se retiró con anticipación de la muestra, rocas y material orgánico visible, posteriormente se pasaron por un tamiz de 2 mm de diámetro. Los agregados del suelo o terrones que no llegaron a pasar por el tamiz se molieron y tamizaron nuevamente (figura 3).

3. Las muestras fueron embolsadas nuevamente y etiquetadas para su identificación con toda la información necesaria: época de muestreo, fecha, sitio de muestreo, punto de colecta, profundidad de la colecta, ubicación geográfica y características del sitio.

4. Por último, se colocaron en un área dentro del laboratorio donde se mantuvieran libre de humedad y totalmente cerradas.

Determinación del % de humedad

Se utilizó el método gravimétrico descrito por Etchevers *et al.* (2005), que consiste en la determinación de la masa de agua que



Figura 3. Molienda de muestras.

contiene una muestra de suelo por diferencia de peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco de la muestra, considerando como suelo seco aquél secado a temperatura ambiente bajo la sombra. La muestra de suelo fue homogenizada manualmente con la finalidad de destruir todos los terrones o agregados, se pesó y registró el peso del plato de plástico, luego se extendió la muestra de suelo húmeda en el plato de plástico y nuevamente se anotó el peso ($Pp+Sh$), se colocó sobre una superficie plana y se dejó secar el suelo a temperatura ambiente bajo la sombra durante 15 días; se rompieron manualmente los agregados que se formaron durante el transcurso de tiempo, al pasar los 15 días se pesó y se registró a peso del suelo ya seco junto con el plato ($Pp+Ss$) y se depositó toda la muestra seca en una bolsa; la cantidad de humedad de la muestra se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{(Pp + Sh) - (Pp + Ss)}{(Pp + Sh) - Pp} \times 100$$

Donde:

% H = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%).

Pp = Peso del plato de plástico (g).

Sh = Peso del suelo húmedo (g).

$Pp + Sh$ = Peso del plato más peso del suelo húmedo (g).

$Pp + Ss$ = Peso del plato más peso del suelo seco (g).

Se optó por realizar el secado de las muestras a temperatura ambiente ya que corresponden a suelos orgánicos, que pueden tener pérdidas de masa por oxidación y volatilización de componentes orgánicos si son secadas a 105° C en una estufa.

Determinación de pH

Para la determinación del pH del suelo se utilizó el método electrométrico descrito por Mylavarapu y Kennelley (2002), usando una solución de agua pura y un conductímetro (CONDUCTRONIC PC 45). Este método determina la actividad del H^+ por medio de un electrodo sensible a este ion, es decir, si un suelo es ácido o alcalino. El pH es un logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrogeno en el suelo. Influye determinantemente en la disponibilidad de los nutrientes minerales en solución para su absorción por el sistema radicular de las plantas. Este parámetro es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinario de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo: solución, la presión parcial de bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión, etc.

Se pesó en un vaso de precipitado 10 g de suelo seco previamente tamizado a 2 mm, se adicionó 20 mL de agua destilada y se agito manualmente a intervalos de 5 min durante 30 min con una varilla de vidrio, de esta manera se obtuvo una mezcla de suelo: agua (1:2), después de agitar la muestra, se dejó reposar durante 15 min (mientras tanto se calibró el potenciómetro con soluciones reguladoras de pH 2, 4, 7 a 10, según el suelo, enjuagando con agua destilada el electrodo antes de iniciar la lectura de cada solución), pasado el tiempo se agitó nuevamente la suspensión y se introdujo el electrodo en la

suspensión (figura 4). Se registró el pH al momento en que la lectura se estabilizó.

Determinación de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se analizó por la técnica descrita por Mylavarapu y Kennelley (2002), que consiste en medir la conductividad eléctrica por medio de un conductímetro (CONDUCTRONIC PC 45) que mide la transferencia de electricidad de un extracto en suspensión 1:2 de suelo-agua. La CE de un extracto de suelo se define como la aptitud de éste para transmitir la corriente eléctrica, depende de la actividad de los iones disueltos y permite establecer una estimación cuantitativa de la cantidad de sales que contienen. La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para transportar la corriente eléctrica. Una solución acuosa que contiene iones tiene esa habilidad. La conductividad de una solución



Figura 4. Lectura de pH.

electrónica depende de la concentración total de iones presentes en agua, de la movilidad de cada uno de los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación.

En el análisis de conductividad eléctrica las muestras se prepararon de la misma manera para el método de pH, que consiste en tomar 10 g de muestra la cual será depositada en un vaso de precipitados, se le agregó 20 mL de agua destilada y se agitó cada cinco minutos por 30 min. Una vez llegado a los 30 min. se dejará reposar las muestras por 15 min. La lectura se realizó enjuagando el electrodo con agua destilada antes de iniciar, posteriormente el electrodo se intro-

dujo en la suspensión (figura 5) y se registró la conductividad momento en que la lectura se estabilizó (en mS).

Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente (D_A) será determinada a partir del método del cilindro de volumen conocido, este método resulta ser el más sencillo, pues viene determinada por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente del cilindro. El principal inconveniente que presenta el método del cilindro es la presencia de piedras, por lo que solo puede utilizarse adecuadamente en suelos poco pedregosos que, por lo menos en sistemas forestales, son los menos. La D_A de un suelo se suele utilizar como medida de la estructura del suelo. Una densidad baja, generalmente, equivale a más porosidad y mayores agregados del suelo. Un suelo de bosque saludable tendrá una densidad baja, lo que corresponde a mayor estabilidad, menos compactación y probablemente mayor contenido de humedad que un suelo con una densidad mayor.

Para ello se utilizó un cilindro metálico con un volumen conocido en la recolección de la muestra. En uno de sus extremos se le colocó un cabezal cilíndrico, que se fue golpeando con un mazo de goma para poder presionar e introducir el cilindro o anillo toma de muestras dentro del suelo sin afectar a la muestra. Una vez clavado completamente, se extrajo el cilindro del suelo, cortando con una herramienta apropiada, que permitió eliminar el sobrante del extremo que se clavó. Una vez el cilindro se llenó y se enrasó en ambos extremos, se le colocó dos tapaderas de plástico a ambos extremos. Ya en el la-



Figura 5. Lectura de la conductividad eléctrica.

laboratorio se extrajo el suelo contenido, cuyo volumen corresponde con el del cilindro y que es conocido, se acondiciono la muestra para después colocarlas en unas charolas de aluminio y se desecaron a 105 °C por 24 h en un horno de secado (figura 6).

Por último, se pesó la muestra al pasar el tiempo. La densidad aparente finalmente se calculó con la siguiente ecuación:

$$\rho_{as} = \frac{M_s}{V_T}$$

Donde:

ρ_{as} = densidad aparente en seco ($\frac{g}{mL}$)

M_s = masa del suelo seco (peso del suelo seco a 105 °C)

V_T = volumen Total (Volumen del cilindro $\pi \times r^2 \times h$)

Determinación de textura

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua, aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo y lo atraviesa. La deter-

minación de la textura del suelo se realizará mediante el método de Bouyoucos. Una vez realizado el análisis granulométrico, se determinará la textura del suelo de acuerdo con las claves taxonómicas de suelos del Soil Survey Staff (2014).

Para determinar la textura se pesaron 50 g de suelo, previamente secado y pasado por un tamiz de 2 mm de diámetro de apertura, en seguida se colocó la muestra en un vaso de precipitado de 500 mL, se le agregó agua destilada aproximadamente hasta la mitad de la capacidad y se le adicionó 10 mL de hexametafosfato de sodio 1 N, se agitó durante 10 min. con un agitador mecánico. La mezcla obtenida se agregó a una probeta de 1000 mL, se introdujo el hidrómetro Bouyoucos y se aforó con agua destilada, en seguida se agito vigorosamente por 2 min., se dejó reposar por 40 seg. y se introdujo nuevamente y con mucho cuidado el hidrómetro y el termómetro (para determinar la temperatura en suspensión), así será obtenida la primera lectura de los 40 seg., posteriormente la probeta con la suspensión será agitada nuevamente y se deja reposar por 2 h (figura 7) y se repite el mismo procedimiento para obtener la segunda lectura.



Figura 6. Muestras en el horno de secado.

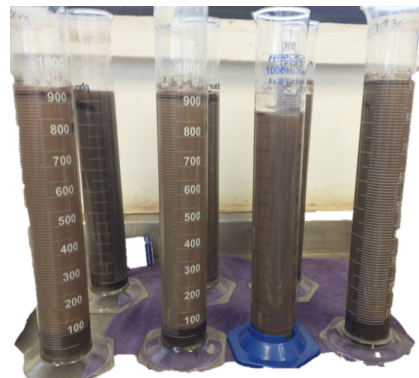


Figura 7. Análisis de textura del suelo.

Se corrige las lecturas del hidrómetro agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5 °C restando la misma cantidad por cada grado debajo de dicha temperatura.

Los porcentajes de arena, limo y arcilla se calcularon con las siguientes expresiones:

Porcentaje de Arcilla+limo:

$$\% \text{ de arcilla+limo} = (\text{lectura a los 40 segundos}) \times 2$$

Porcentaje de arena:

$$\% \text{ de arena} = (\% \text{ de arcilla+limo}) - 100$$

Porcentaje de arcilla:

$$\% \text{ de arcilla} = (\text{lectura obtenida a 2 horas}) \times 2$$

Porcentaje de limo:

$$\% \text{ de limo} = 100 - (\% \text{ arcilla} + \% \text{ limo})$$

Una vez realizado el análisis granulométrico, se determinará la textura, para los suelos de Calakmul, según la figura 8 que muestra las diferentes clases texturales.

Materia orgánica y carbono orgánico

La materia orgánica se determinó por el método de calcinación o pérdida por ignición (loss on ignition, LOI) (Schulte & Hopkins, 1996) que cuantifica directamente el contenido de MO y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas. Este método sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico original.

La materia orgánica es considerada como uno de los principales indicadores de calidad de suelo debido a su efecto benéfico sobre las propiedades físicas y el abastecimiento de nutrientes. También ha sido documentado su efecto positivo sobre la sustentabilidad del sistema productivo en el largo plazo, por lo que es necesario determinarla con exactitud. El peso perdido es proporcional a la

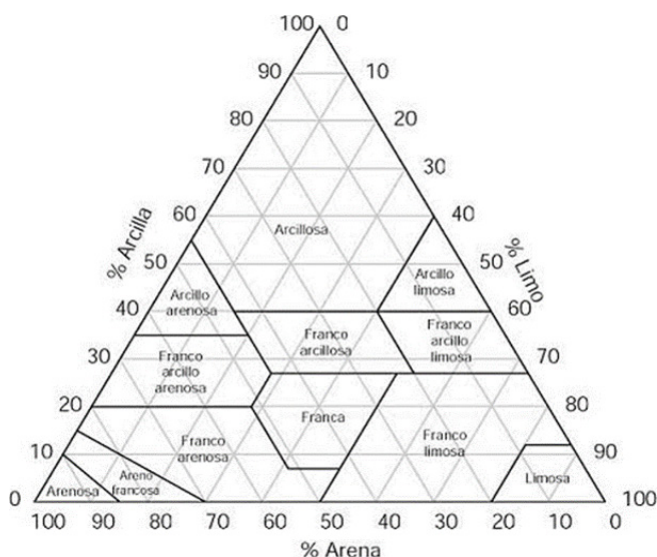


Figura 8. Diagrama triangular para la determinación de la textura, escala U.S.D.A. Soil Survey Staff.

cantidad de materia orgánica contenida en la muestra.

Se siguió la siguiente metodología: se colocaron crisoles de 15 mL a peso constante, después se pesaron 5 g de muestra en los crisoles, posteriormente fueron colocados en estufa durante 24 h. a 105 °C. Las muestras fueron en desecador y pesadas. Luego se colocaron durante 2 h. en una mufla a 360 °C (Figura 9), posteriormente se transfirieron a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente.

El cálculo de MO se realizó por diferencia de peso en las distintas temperaturas, según:



Figura 9. Materia orgánica.

$$\%MO = \frac{((\text{peso } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso } 360^{\circ}\text{C}) \times 100)}{\text{peso } 105^{\circ}\text{C}}$$

Resultados

Parámetros fisicoquímicos por sitio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para humedad relativa, % de arena, % de arcilla, % de limos, pH, conductividad, densidad aparente, materia orgánica, carbono orgánico, carbono almacenado y contenido de carbonatos para ambos sitios durante la temporada de lluvias.

Humedad relativa

La cantidad de agua que posea el suelo es una de sus características más específicas y está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración. En la figura 10 se muestran los resultados del % de la humedad re-

lativa (HR) para el sitio de La aguada a la profundidad de 10 cm.

En la figura 11, se presenta la humedad relativa para el sitio de La Aguada a 30 cm de profundidad.

Se puede observar que, el porcentaje de humedad fue más elevado a 10 cm de profundidad, esto se debe a que, después de la lluvia o el riego, es común que la humedad sea mayor en las capas superiores del suelo (zona de semillas), ya que el agua tiende a infiltrarse inicialmente en esas capas antes de descender a capas más profundas (zona de raíces). Se aplicó la prueba de Mann-Whitney, para identificar si existieron diferencias significativas en los porcentajes de humedad entre profundidades, tal y como se muestra en la tabla 2. Se encontró que el valor p ($p < 0.05$) es menor que el nivel de significancia, por lo que la hipótesis nula (H_0 =La diferencia de posición entre las muestras es igual a cero) debe ser rechazada y se debe

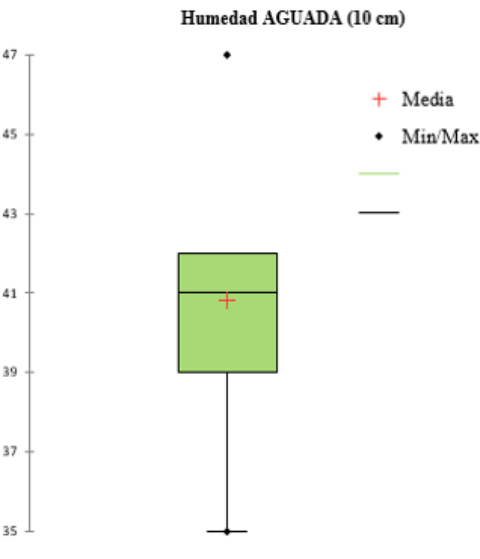


Figura 10. Humedad relativa expresada en porcentaje a 10 cm.

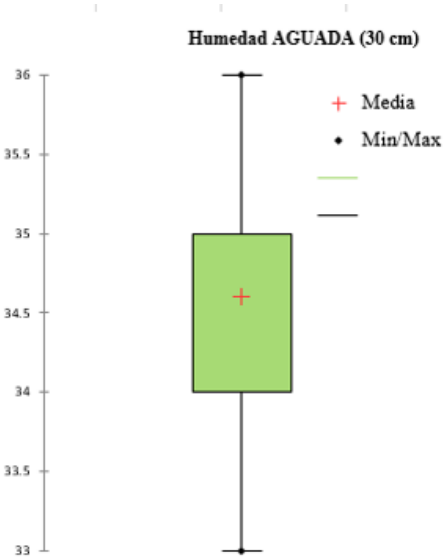


Figura 11. Humedad relativa expresada en porcentaje a 30 cm.

Tabla 2. Prueba de Mann-Whitney para humedad a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
U	23.500
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.778
valor-p (bilateral)	0.024
alfa	0.050

aceptar la hipótesis alternativa (H_a =La diferencia de posición entre las muestras es diferente de cero), para ambos sitios de muestreo. Por lo tanto, se puede establecer que, existieron diferencias significativas en los niveles de humedad entre profundidades de muestreo para el sitio de estudio.

Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las clases de tamaño de las partículas que lo forman, particularmente arenas, limos y arcillas. La textura del suelo es relevante ya que define el comportamiento de los suelos, principalmente su capacidad

de retención de agua y de nutrimentos (SERMANAT, 2015). Se puede decir que la textura es un término usado para describir las proporciones relativas de arena, limo y arcilla presentes en un suelo. Se clasificó la textura del suelo con la escala de texturas americana, de acuerdo con *Soil Survey Staff* (2014) y la escala de la U.S.D.A. Los resultados a ambas profundidades de muestreo (figuras 12 y 13) nos permiten clasificar al suelo de franco arenoso a franco arcilloso arenoso. La textura no mostró ninguna variación con respecto a la profundidad de muestreo. Los suelos franco-arenosos tienen más de un 60 % de contenido de arena y en menor proporción arcilla y limo, este tipo de suelo tienen la propiedad de un buen drenaje debido a la gran cantidad de arena que contiene esto ayuda a que sea más fácil la infiltración de agua y evita encharcamientos. Además, este tipo de suelos pueden retener cierta cantidad de agua, y tienen una buena aireación que beneficia a la vegetación, ya que permite

la entrada de oxígeno a las raíces. Entre sus desventajas se encuentra la fertilidad, ya que ésta va a depender del contenido de materia orgánica que contenga. Los suelos franco arcilloso arenoso cuentan casi con las mismas características ya que tiene mayor proporción de arena, y menores cantidades arcilla y limo, pero a diferencia de los suelos franco-arenosos, suelen tener una mejor proporción de los tres. Ambos suelos ocasionan que la conductividad sea menor lo cual permite que el suelo sea óptimo para las plantas, porque favorece la fijación de nutrientes a través de las raíces.

pH (potencial de hidrogeno)

El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad, o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados. Los valores promedios de pH obtenidos fueron comparados con la Tabla 3 de

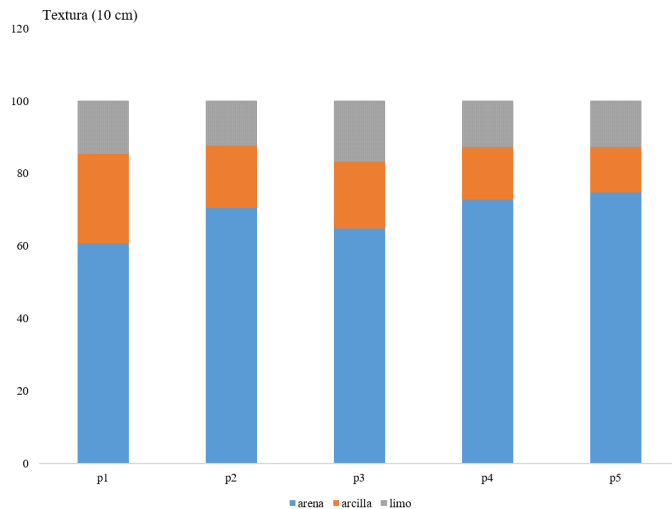


Figura 12. Textura a 10 cm de profundidad para los 5 puntos en el sitio de la Aguada.

acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000. A partir de esto, se observa que el rango de pH obtenido a la profundidad de 10 cm (figura 14), nos permite clasificar los suelos muestreados como de neutros a medianamente alcalinos. Por otro lado, a la profundidad de 30 cm, de acuerdo con la figura 15, se puede observar que el suelo del sitio de La Aguada se clasificó como neutro.

Al tener un pH neutro es generalmente beneficioso para el crecimiento de las plantas, ya que se tiene alta disponibilidad de nutrientes, presenta porcentajes equilibrados y disponibilidad de los elementos químicos. Los suelos medianamente alcalinos traen consecuencias al sitio ya que está perdiendo sus propiedades, en el segundo sitio se obtuvieron valores de pH más elevados, proba-

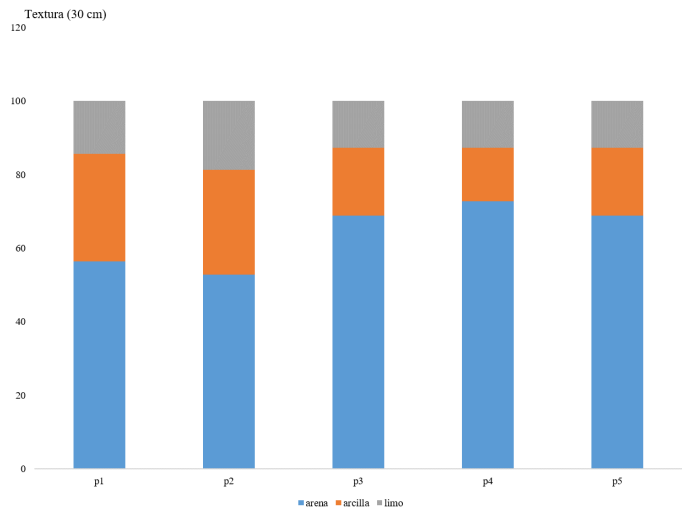


Figura 13. Textura a 30 cm de profundidad para los 5 puntos en el sitio de la Aguada.

Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo con el rango de pH.	
Valor de pH	Categoría
< 5.0	Fuertemente ácido
5.1 – 6.5	Moderadamente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 8.5	Medianamente alcalino
8.5	Fuertemente alcalino

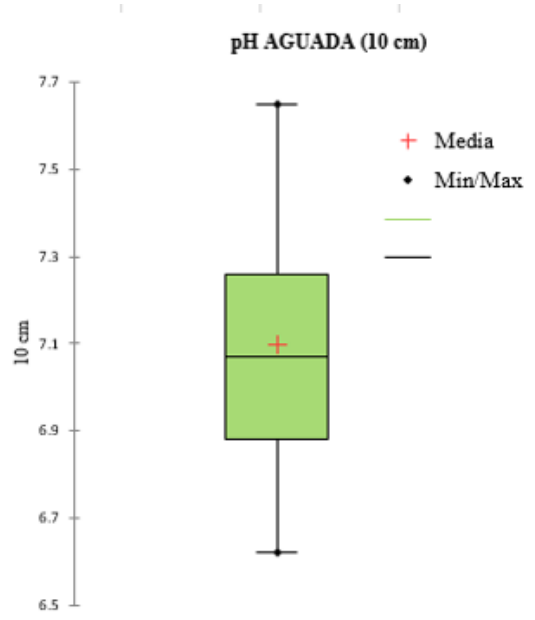


Figura 14. pH de los sitios estudiados a 10 cm.

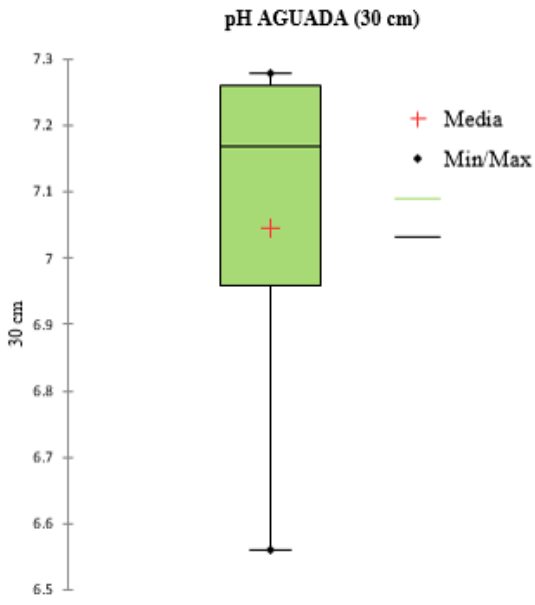


Figura 15. pH de los sitios estudiados a 30 cm.

blemente debido a que el lugar cuenta con deforestación y por ende ha sido modificado por el hombre. Para determinar si estas diferencias observadas fueron o no significativas entre profundidades, se aplicó la prueba de Mann-Whitney (tabla 4), se puede observar que el valor de ($p>0.05$) fue mayor que el nivel de significancia, por lo que se puede concluir que, no hubo diferencias significativas en los valores de pH entre profundidades para el sitio de muestreo.

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de la solución del suelo para transportar corriente eléctrica en función del contenido de sales disueltas o ionizadas en la solución.

Los valores promedios obtenidos fueron comparados con la tabla 5 de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

A partir de las figuras 16 y 17, se puede observar que, a ambas profundidades de muestreo, los valores de conductividad obtenidos nos permiten clasificar los suelos muestreados como suelos con efectos despreciables de salinidad.

Los valores de conductividad obtenidos son favorables, ya que se clasifica como un suelo libre de sales y no presentan restricción para ningún cultivo, y presentan un mayor rendimiento. Esto está de acuerdo con las características y naturaleza de los sitios muestreados puesto que son representativos de suelos de bosques maderables.

Tabla 4. Prueba de Mann-Whitney para pH a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
U	12.500
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.778
valor-p (bilateral)	0.952
alfa	0.050

Tabla 5. Interpretación de la conductividad eléctrica en suelos de acuerdo con la NOM-021-SERMANAT-2000.	
CE (dS m ⁻¹) a 25°C	Efectos
<1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1-2.0	Muy ligeramente salino
2.1-4.0	Moderadamente salino
4.1-8.0	Suelo salino
8.1-16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

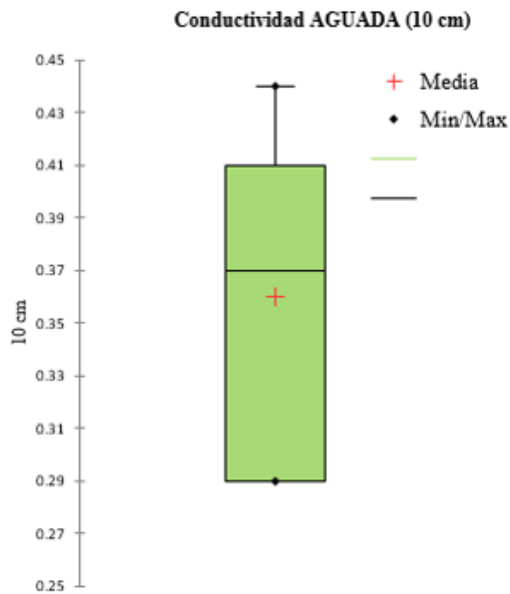


Figura 16. Conductividad eléctrica a 10 cm.

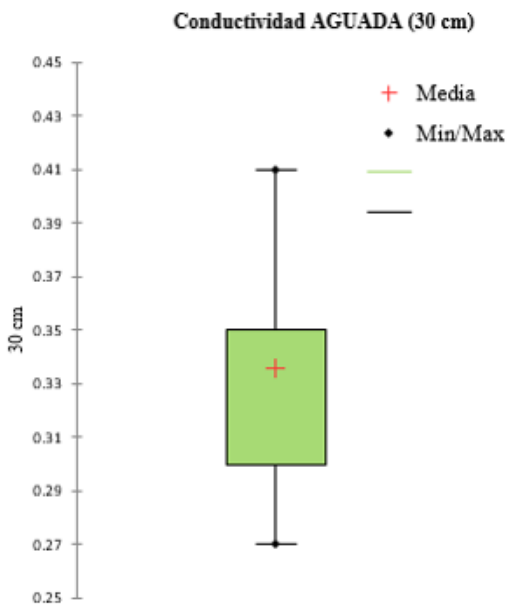


Figura 17. Conductividad eléctrica a 30 cm.

Para identificar si hubo diferencias significativas entre profundidades de muestreo, se aplicó la prueba de Mann-Whitney (tabla 6). Se puede observar que el valor de ($p<0.05$) fue mayor al nivel de significancia, por lo cual, se concluye que las diferencias observadas entre profundidades en los valores de conductividad no fueron significativas estadísticamente.

Densidad aparente (DA)

La densidad aparente es definida como la relación entre la masa del suelo secado en horno y el volumen global, que incluye el volumen de las partículas y el espacio poroso entre las partículas. Es dependiente de las densidades de las partículas del suelo (arena, limo, arcilla y materia orgánica), de su grado de compactación, estructura y humedad. Las densidades de las partículas minerales usualmente se encuentran en el rango de entre 2.5 a 2.8 g cm⁻³, mientras que las partículas orgánicas presentan usualmente menos que 1.0 g cm⁻³. La densidad aparente es una propiedad dinámica que varía con la condición estructural del suelo. Esta condición puede ser alterada por cultivo; pisadas de animales; maquinaria agrícola; y clima, por ejemplo,

por impacto de las gotas de lluvia. Estratos compactados del suelo que tienen altas densidades aparentes, restringen el crecimiento de las raíces, e inhiben el movimiento del aire y el agua a través del suelo.

En general, cuanto mayor la densidad, menor el espacio poroso para el movimiento del agua, crecimiento, penetración a través de raíces, y el desarrollo de las plántulas. Los valores promedios obtenidos en ambos sitios de muestreo fueron comparados con la tabla 7 de acuerdo con la NOM-021-SEMAR-NAT-2000.

Los valores de densidad aparente oscilaron entre 0.75-0.95 g cm⁻³ (figura 18). A partir de esto, se puede clasificar como un suelo orgánico. Se observa que el sitio de La Aguada obtuvo valores altos, ya que, este sitio presenta una alta descomposición de plantas, lo que favorece la fertilidad. Probablemente estos resultados estén relacionados con el % MO ya que a menor DA mayor % mo se tiene.

Materia orgánica (MO)

La materia orgánica del suelo es el almacén más importante de carbono orgánico en el planeta y está compuesta de las mismas moléculas de las que están hechas los seres vivos

Tabla 6. Prueba de Mann-Whitney para conductividad eléctrica a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
U	12.500
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.639
valor-p (bilateral)	0.802
alfa	0.05

Tabla 7. Valores típicos de densidad aparente según el origen y tipo de suelo.

Tipos de suelo	g m^{-3}
Organicos y volcanicos	Menor de 1.00
Minerales	
Arcillosos	1.0 – 1.19
Francosos	1.20 – 1.32
arenosos	Mayor a 1.32
>16.0	Muy fuertemente salino

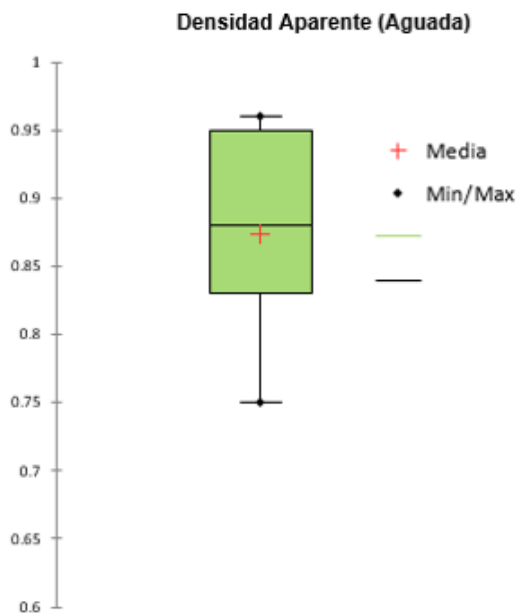


Figura 18. Densidad aparente para el sitio de la Aguada.

que no han podido ser transformadas a su forma elemental. Por ello, en el suelo hay residuos que provienen de plantas, animales y microorganismos (López, 2020). Dentro de sus principales funciones están: regular el CO₂ en la atmósfera (ya que en estos se encuentra almacenados una gran cantidad de materia orgánica, componente impor-

tante de las reservas de carbono globales) y fundamental para la productividad agrícola y forestal de los suelos (Tun, 2023). Al tener una alta humedad se espera que los % de MO sean por consiguiente elevados. Los valores promedios obtenidos fueron comparados con la tabla 8 de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

A una profundidad de 10 cm (figura 19), los valores obtenidos en el sitio de la Aguada oscilaron entre 9-11%, lo que nos permite concluir que el suelo en este sitio presentó contenidos de materia orgánica considerados como de medios a altos. A una profundidad de 30 cm (figura 20), los valores obtenidos en el sitio de la Aguada oscilaron

entre 7 y 10 %, lo que nos permite concluir que el suelo en este sitio presentó contenidos de materia orgánica considerados como medios.

Para determinar si las diferencias observadas en el contenido de materia orgánica con respecto a la profundidad fueron o no significativas, se aplicó la prueba de Mann-

Tabla 8. Clasificación de los suelos de acuerdo con su contenido de materia orgánica.	
Clase	Materia orgánica (%)
Muy bajo	< 4.0
Bajo	4.1 – 6.0
Medio	6.1 – 10.9
Alto	11.0 – 16.0
Muy alto	> 16.1

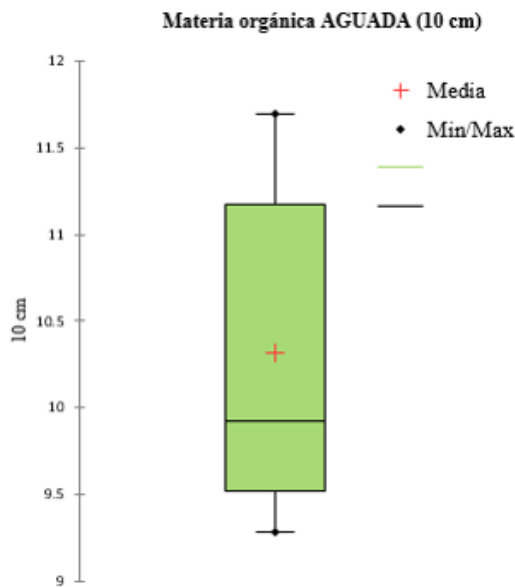


Figura 19. Materia orgánica a 10 cm.

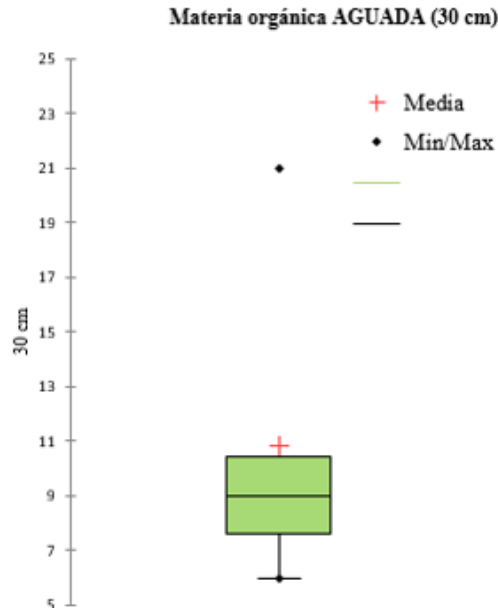


Figura 20. Materia orgánica a 30 cm.

Whitney para ambos sitios. A partir de la tabla 9, se puede observar que el valor de ($p < 0.05$) fue mayor al nivel de significancia, por lo cual, se concluye que la profundidad no influyó en el contenido de materia orgánica puesto que, no hubo diferencias significativas.

Carbono orgánico (CO)

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. Constituye un elemento clave del ciclo global del carbono a través de la atmósfera, vegetación, suelo, ríos y océano. El carbono orgánico del suelo es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69.8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2002).

A partir de las figura 21, se puede observar que, los porcentajes obtenidos a 10 cm de profundidad para el sitio de la Aguada oscilaron entre 5.4 y 6.8 %.

Por otro lado, en la figura 22 se observa que, para una profundidad de 30 cm, el %CO para para el sitio Aguada fluctuó entre 3.6 y 12.4%.

Para determinar si estas diferencias fueron o no significativas, se aplicó la prueba de Mann-Whitney en la en los sitios. A partir de las tabla 10, se puede observar que el valor de ($p < 0.05$) fue mayor al nivel de significancia, por lo cual, no hubo diferencias significativas entre las profundidades de muestreo en el sitio estudiado.

Carbono Almacenado (C.A)

Una forma de mitigación de los daños ocasionados por el cambio climático global es la

Tabla 9. Prueba de Mann-Whitney para materia orgánica a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
	17
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.917
valor-p (bilateral)	0.421
alfa	0.050

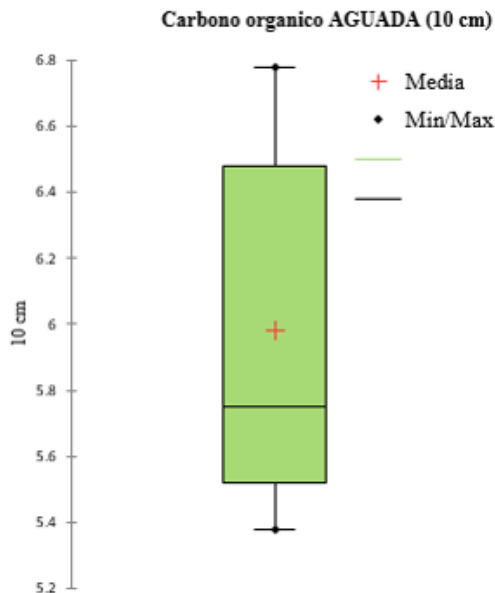


Figura 21. Carbono orgánico a 10 cm.

conservación del carbono del suelo e incluso la promoción del aumento de los contenidos de carbono orgánico en el suelo debido a sus múltiples beneficios ambientales y ecológicos (FAO, 2002). La cantidad de C almacenado en el suelo depende del clima, composición de la vegetación, actividad microbiana y régimen de disturbio (Jobbagy &

Jackson, 2000). De acuerdo a los resultados obtenidos en el sitio de La Aguada a una profundidad de 10 cm, la tasa de captura de carbono osciló entre 33.5 y 39.3 Mg ha⁻¹. Por otro lado, a una profundidad de 30 cm, la tasa de captura de carbono en el sitio osciló entre 33.5 y 39.39 Mg ha⁻¹.

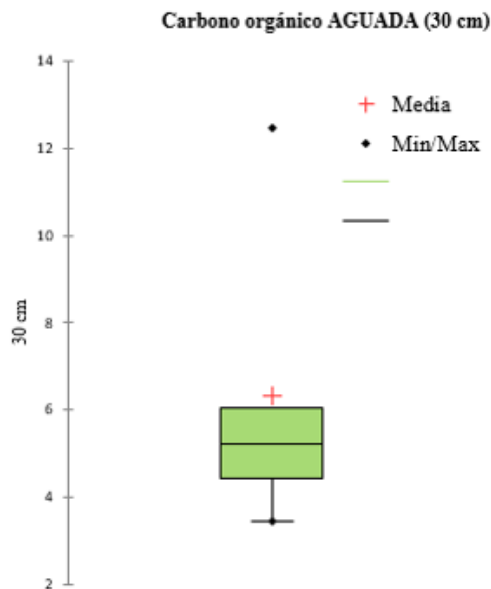


Figura 22. Carbono orgánico a 30 cm.

Tabla 10. Prueba de Mann-Whitney para Carbono Orgánico a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
U	17
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.917
valor-p (bilateral)	0.421
alfa	0.050

Para determinar si hubo o no diferencias significativas en la tasa de captura de carbono entre profundidades de muestreo se aplicó la prueba de Mann-Whitney a cada uno de los sitios. A partir de la tabla 11, se puede observar que el valor de ($p < 0.05$) fue mayor al nivel de significancia, por lo cual, no hubo diferencias significativas entre las profundidades de muestreo en el sitio.

Análisis estadístico bi-variado y multivariado

A partir de la tabla 12, se puede observar que, para el sitio de La Aguada se obtuvo una correlación significativa entre humedad y conductividad; y entre el % de arena y el pH; mientras que, se obtuvo una correlación significativa inversa entre % de arcilla y pH.

Tabla 11. Prueba de Mann-Whitney para Carbono almacenado a 10 y 30 cm en el sitio de la Aguada.	
Prueba de Mann-Whitney / Prueba bilateral:	
U	17
U (estandarizado)	0.000
Valor esperado	12.500
Varianza (U)	22.917
valor-p (bilateral)	0.421
alfa	0.05

Tabla 12. Análisis de correlación de Pearson para el sitio Aguad.									
Variables	PH	Conductividad	humedad	%arena	%arcilla	%limo	MO	CO	CA
PH	1	-0.248	-0.342	0.660	-0.640	-0.548	0.320	0.320	0.320
Conductividad	-0.248	1	0.632	0.303	-0.381	-0.015	-0.151	-0.151	-0.151
humedad	-0.342	0.632	1	0.272	-0.345	-0.005	0.092	0.092	0.092
%arena	0.660	0.303	0.272	1	-0.977	-0.810	0.408	0.408	0.408
%arcilla	-0.640	-0.381	-0.345	-0.977	1	0.665	-0.381	-0.381	-0.381
%limo	-0.548	-0.015	-0.005	-0.810	0.665	1	-0.377	-0.377	-0.377
MO	0.320	-0.151	0.092	0.408	-0.381	-0.377	1	1.000	1.000
CO	0.320	-0.151	0.092	0.408	-0.381	-0.377	1.000	1	1.000
CA	0.320	-0.151	0.092	0.408	-0.381	-0.377	1.000	1.000	1

En la tabla 13, se presenta el Análisis de Componentes Principales para el sitio de La Aguada, encontrando que, los factores F1 y F2 contribuyen en un 72.642% a explicar la variabilidad de los datos (figura 23).

En la figura 23 se presentan los bi-plots de los componentes mayoritarios (F1 y F2) donde es posible identificar agrupaciones de variables. El primer grupo de variables es humedad y conductividad, lo cual está de acuerdo con lo esperado, puesto que, a mayor contenido de agua o humedad, se espera un valor de conductividad más elevado. En el tercer cuadrante se identifica un segundo

grupo constituido por CO, MO y CA, lo cual es de esperarse puesto que se trata de variables altamente dependientes entre sí. Así mismo, se observa una relación inversa entre el pH y el % de limo y arcilla; demostrando que, a mayor contenido de limo y arcilla, se tienen valores de pH más bajos.

Comparación de los resultados obtenidos en este estudio con la literatura

A partir de la tabla 14 se observan los resultados obtenidos en el sitio de La Aguada, durante la temporada de lluvias. Estos resultados fueron comparados con resultados obtenidos en estudios que reportan parámetros

Tabla 13. Factores ACP para las variables medidas en el sitio Aguada.						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	4.397	2.140	1.655	0.424	0.309	0.074
Variabilidad (%)	48.860	23.782	18.390	4.713	3.436	0.818
% acumulado	48.860	72.642	91.032	95.746	99.182	100.000

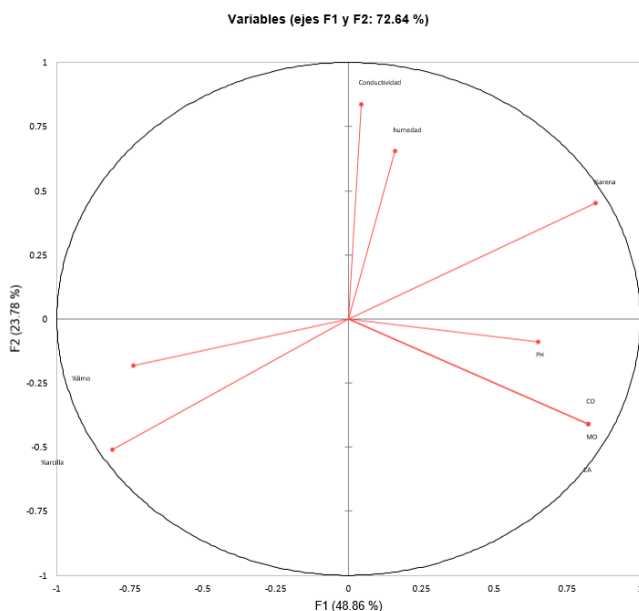


Figura 23. Bi-plot de los componentes mayoritarios F1 y F2 resultantes del análisis de componentes para el sitio Aguada.

fisicoquímicos en suelo y tasa de captura de carbono en bosques de México. En la tabla 14 se puede observar que, el contenido de humedad en el sitio de la Aguada fue considerablemente más elevado que el reportado en el sitio Valle de Quibor en Venezuela, comparable con los niveles de humedad reportados en el Parque Nacional del Nevado de Toluca y la Zona de Restauración Ecológica del Bosque de Tlalpan; y ligeramente más bajos que los encontrados en la Zona de

Uso Público del Bosque de Tlalpan, Zona de Protección Estricta del Bosque de Tlalpan, y la Zona de Protección con Uso Restringido del Bosque de Tlalpan. Por otro lado, en el caso del pH, se puede observar que, tanto los valores de pH encontrados en el sitio de La Aguada como los reportados en otros bosques de México se encuentran en el rango de valores que los permiten clasificar de neutros a moderadamente alcalinos. En cuanto a la densidad aparente, se puede observar

Tabla 14. Comparación de datos obtenidos en el sitio de la Aguada.

Parámetros	Temporada de Lluvias	Referencias									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Humedad	Los valores promedio de humedad fluctuaron 32-48%.	44.90		0.91-1.12				25.49-65.49	31.84-89.69	8.81-65.02	20.8851.89
pH	Neutros y moderadamente alcalinos (6.56-7.28).	6.4	6.5-7.5	7.74			6.61-7.67	5.86-7.48	5.73-7.25	6.30-7.40	6.22-6.85
Densidad Aparente	De acuerdo con la Norma se clasifican como orgánicos. 0.75, 0.83, 0.88, 0.95, 0.96)	0.68	1.02	0.11-0.56				0.48, 0.64, 0.4	0.4, 0.48, 0.32	0.64, 0.6, 0.36	0.4, 0.4, 0.48
Conductividad	La salinidad de los suelos se encuentra despreciable (0.0027-0.0044 dS m-1)	0.11	0.19-1.03	0.39			0.08-0.16	0.09 -0.23	0.08 - 0.29	0.09 - 0.30	
Materia orgánica	Los porcentajes de materia orgánica oscilaron entre 5.97-21.39%. Se clasifican como medios a altos.	27.1	3.20-4.07	0.24-0.62			1.27-4.74	1.54-7.09	1.18-6.51	1.13-2.83	
Carbono orgánico	El contenido de carbono orgánico oscilo entre 2.39-8.55 %.	15.8	2.32-2.94	0.13-0.19			32.6	0.51-1.89	0.62-2.84	0.47-2.60	0.45-1.13
Tasa de almacenamiento de carbono	La tasa de captura de carbono fluctuó entre 21.07-75.41.	73.1			113.16	146.3	14.2-65.7	2.16-12.12	2.39-37.66	2.4378.12	1.82-5.43

1: Parque Nacional de Nevado de Toluca, 2: Bosque de San Juan de Aragón, 3: Valle de Quibor, Venezuela, 4: Parque Nacional Ixta-Popo, 5: Parque Nacional Perote 6: Faja Volcánica Transmexicana, 7: Zona de Uso público del Bosque de Tlalpan 8: Zona de Protección Estricta del Bosque de Tlalpan, 9: Zona de Protección con Uso Restringido del Bosque de Tlalpan, 10: Zona de Restauración Ecológica del Bosque de Tlalpan.

que los valores obtenidos en este estudio son comparables a aquéllos obtenidos en otros bosques del país, a excepción del Bosque de San Juan de Aragón, que presenta valores de densidad relativamente más elevados.

En cuanto a la conductividad se puede apreciar a partir de la tabla 14 que, los niveles de salinidad en el sitio de La Aguada fueron insignificantes y mucho más bajos que aquéllos reportados en estudios realizados en bosques del país. Por otro lado, el contenido de materia orgánica y de carbono orgánico obtenidos en el sitio de La Aguada fueron comparables a los reportados para el Parque Nacional del Nevado de Toluca y

significativamente más elevados que los reportados para la mayoría de los bosques en México. Finalmente, en cuanto al almacenamiento de carbono obtenido en este sitio fue comparable a los obtenidos para el Sitio de Nevado de Toluca y la Faja Volcánica Transmexicana; pero más bajos que las tasas de captura de carbono reportadas para el Parque Nacional Izta-Popo y Parque Nacional de Perote; y más altas que las reportadas en el Bosque de Tlalpan; esto es de esperarse, puesto que el Bosque de Tlalpan es un sitio urbano que está sujeto a un stress antropogénico que no se tiene ni en Calakmul ni en los parques de Izta-Popo y Perote.

Conclusiones

Los resultados de pH y conductividad obtenidos en Calakmul, nos permiten clasificar los suelos como de neutros a moderadamente alcalinos y con cantidades despreciables de salinidad según la NOM-021-SERMANAT-2000. En cuanto a la textura, se pueden clasificar los suelos como de franco arenoso a franco arcilloso arenoso. Con respecto a los % de MO y % de CO, los valores obtenidos nos permiten clasificar a los suelos de Calakmul como suelos con contenidos de carbono orgánico y materia orgánica de medios a muy altos, favoreciendo la fertilidad, el contenido de nutrientes y un potencial más alto de almacenamiento o captura de carbono. Los suelos fueron clasificados como suelos orgánicos según la NOM-021-SERMANAT-2000 lo cual está de acuerdo con la estructura y vegetación de los sitios. Se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad entre 10 y 30 cm de profundidad,

siendo más elevado a nivel superficie, esto es de esperarse ya que el muestreo se realizó durante la temporada lluviosa. En cuanto a las correlaciones multivariadas, se encontraron correlaciones significativas entre el contenido de humedad y la conductividad, y correlaciones inversas significativas entre los % de limo y arcilla y el pH, sugiriendo que la textura juega un papel muy importante en los valores de pH observados en ambos sitios. Esto demuestra que, a pesar de la vegetación y modificaciones por el hombre en el sitio de estudio, no ha perdido a gran escala sus propiedades y sigue siendo un suelo con alto contenido de nutrientes y apto para almacenamiento de carbono, esto demuestra que la degradación del sitio no ha llegado a niveles extremos y que la modificación que ha sufrido el sitio no ha sido significativa. El potencial de captura de carbono encontrado fue visiblemente más bajo que el reportado para

bosques y parques nacionales semi-remotos, pero significativamente más elevado que el reportado para bosques urbanos en los alrededores de la ciudad de México. Finalmente,

se puede concluir que, el bosque tropical subperennifolio de Calakmul cuenta con un alto almacenamiento de carbono.

Literatura citada

- Arriaga, L., Espinoza, J.M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. CONABIO.
- Boege, E., & Fuentes, T. (2000). Convivir con la selva. Documentación y sistematización de 10 años de experiencia de desarrollo y conservación de Pronatura Península de Yucatán A.C. en Calakmul, Campeche, México. USAID, BSP, TNC. 1-133
- CONANP. (2017). La importancia que tienen los bosques tropicales. GOB. Recuperado el 1 de febrero de 2024. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/la-importancia-que-tienen-los-bosques-tropicales>.
- CORDIS. (2017). Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo CORDIS. Recuperado el 03 de febrero de 2024. <https://cordis.europa.eu/article/id/205986-the-link-between-carbon-sequestration-and-biodiversity/es>
- Covaleda, S., Gallardo, J. F., García-Oliva, F., Kirchmann, H., Prat, C., Bravo, M., & Etchevers, J. D. (2011). Land-use affects distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil Use Manage*, 27, 186-194.
- DOF (1994). Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas, en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial. México, D.F. 1-60
- NOM-021-RECNAT-2002. (2002). Diario Oficial de la Federación. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Dixon, R. (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gas?. *Agroforestry systems*, 31,99-116.
- Etchevers, J. D., Monreal, C. M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., & López, R. M. (2005). Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29.
- FAO/IIASA. (1999). World agro-ecological zoning. Rome, Italy.
- FAO. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma.
- Gibson, C.C., McKean, M.A., & Ostrom, E. (2000). Explaining Deforestation: The Role of Local Institutions. In: Gibson C.C., McKean, M.A., & Ostrom, E. (Ed). *Pepole and Forests. Communities, Institutions, and Governance*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. London, England. 1-27.
- Gómez-Luna, B. E., Vázquez-Marrufo, G., Ruiz-Aguilar, G. M. L., & Olalde-Portugal, V. (2010). Cambios en las propiedades físico-químicas y microbiológicas del suelo generados por la producción de carbón vegetal en el bosque templado de (*Quercus* spp.) en Santa Rosa, Gto, México. *Ra Ximhai*. 187-197.

- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzun, C., & Godoy, R. (2005). Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences*, 2, 159-174.
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Applic.*, 10, 423-436.
- Myhre, G., Samset, B.H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Bernsten, T.K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R.C., Feichter, J., Ghan, S. J., Hauglustaine, D., Iversen, T., Kinne, S., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Lin, G., & Zhou, C. (2013). Forzamiento radiactivo del efecto directo del aerosol a partir de simulaciones de AeroCom Fase II. *Atmos. Química. Phys*, 13, 1853-1877.
- Mylavarapu, R. S., & Kennelley, D.E (2002). UF/IFAS extension soil testing laboratory (ESTL): Analytical procedures and training manual. Institute of food and Agricultural Sciences. University of Florida. Gainesville. U.S.A. 28.
- Morales, R. J., & Magaña, R.S. (2001). Fuentes de impacto, necesidades de investigación científica y monitoreo en Calakmul, Campeche. Pronatura Península de Yucatán y The Nature Conservancy. 81.
- Peña-Ramírez, V. M., Vázquez-Selem, L., & Siebe, C. (2009). Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835-35,000 years B. P.) in Mexico. *Geoderma*, 149, 224-234.
- SEMARNAT. (2017). Bosques tropicales, ecosistemas con gran riqueza de especies. Recuperado el 01 de febrero de 2024, <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-tropicales-ecosistemas>
- Soil Survey Staff. (2014). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. USDA & NRCS.
- Tun, E. (2023). Caracterización físicoquímica y almacenamiento de carbono en suelos de un bosque urbano de la Ciudad de México. [Tesis]. Universidad Autónoma del Carmen.

