

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



**EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE LA ACTIVIDAD
MICROBIANA Y LA DIVERSIDAD VEGETAL EN EL PARQUE
NACIONAL LA MALINCHE**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**

PRESENTA

Ing. Alma Lucero Corona Cuapio

REALIZADO BAJO LA DIRECCIÓN

DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS

TUTORES

DRA. JOSEFINA PÉREZ VARGAS

DR. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ Y PÉREZ



IXTACUIXTLA, TLAX., NOVIEMBRE 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Código: 505-RGE-04
Publicación: Diciembre 2020
Revisión: 9001:2015 04

C. ALMA LUCERO CORONA CUAPIO

PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de evaluación de examen de grado ha revisado el trabajo de investigación titulado: **"Efecto del cambio de uso de suelo sobre la actividad microbiana y diversidad vegetal del Parque Nacional La Malinche"**, realizado bajo la dirección de la Dra. Elizabeth García Gallegos. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. Héctor Santos Luna Zendejas

Dra. Gema Lilia Galindo Flores

Dra. Libertad Juárez Santacruz

Dr. José Luis Martínez y Pérez

Dra. Elizabeth García Gallegos

[Handwritten signatures in blue ink over horizontal lines]

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
Ixtacuixtla, Tlax., 06 de OCTUBRE de 2023.

[Handwritten signature in blue ink]

DR. HÉCTOR SANTOS LUNA ZENDEJAS
COORDINADOR GENERAL DEL CIGyA Y POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS
EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

c.c.p. Expediente



Documento exclusivo para uso de la dependencia responsable o autoridad correspondiente

AGRADECIMIENTOS

Cuando de agradecer el amor, valores, motivación, cuidado siempre está mi familia a quien va dedicado este trabajo.

Gracias a mis padres por todo el apoyo que me han dado académicamente en todos estos años de formación, por el amor y el apoyo incondicional que siempre me han brindado, en este momento mis mejores recuerdos son ustedes siempre ahí, junto a mí, impulsándome para lograr cualquier cosa que me propusiera, gracias a Dios por ponerlos en mi camino como padres, han sido mi mejor ejemplo de superación. A mi hermano por ser un gran compañero de vida, siempre contando con su apoyo incondicional.

Mamá eres el gran ejemplo de que nunca hay que dejar de tener metas en vida, eres una mujer tan completa que tu plenitud me inspira a ser mejor cada día y a ti papá por tu dedicación de tantos años de trabajo profesional.

Gracias a la familia que he formado, Felipe, Leoncito e Ian son ustedes mi motivación para seguir superándome, a quien van dirigidos mis triunfos, son mis mejores maestros de vida. Felipe tu entrega, dedicación y crecimiento profesional, es mi mejor motivación para que nuestros hijos tengan el mejor ejemplo de superación.

Gracias al CIGyA por abrirme las puertas para poder continuar con mis estudios, a todas las personas que fueron participes en este proceso, ya sea de manera directa e indirecta.

Gracias a la Dra. Elizabeth García Gallegos por aceptar ser mi directora de tesis, al Dr. José Luis Martínez y Pérez y a la Dra. Josefina Pérez Vargas por ser mis asesores de tesis, mil gracias a ustedes por haberme dedicado su tiempo y por compartirme sus conocimientos.

Gracias a los doctores que me impartieron clases, contribuyendo a enriquecer mi proyecto de tesis, al Dr. Héctor, Dr. Oscar, Dra. Eunice, Dra. Estrella, Dr.

Cuauhtémoc, Dra. Alba, Dra. Arely gracias por compartir sus conocimientos conmigo. Al Lic. Iván y al Dr. Cuauhtémoc por su apoyo en los tramites administrativos del proceso de titulación.

Gracias a los integrantes de mi comité científico por tomarse el tiempo de revisar mi tesis y realizar las anotaciones correspondiente para mejorar la calidad de mi trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Página
OFICIO DE IMPRESIÓN (Registro N°, 505-RGE-04, Autorización de impresión)	I
AGRADECIMIENTOS	II
INDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 MARCO TEÓRICO	2
I.1.1 Recurso suelo	2
I.1.2 Funciones del suelo	2
I.1.3 Cambio de uso del suelo	3
I.1.4 Calidad e indicadores del suelo	3
I.1.4.1 Indicadores biológicos del suelo	4
I.1.5 Diversidad vegetal	6
I.1.5.1 Índices de diversidad	7
I.2 ANTECEDENTES	8
I.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	10
I.4 HIPÓTESIS	10
I.5 JUSTIFICACIÓN	10
I.6 OBJETIVOS	11
I.6.1 General	11
I.6.2 Específicos	11
I.7 METODOLOGÍA	12
I.7.1 Ubicación del área de estudio	12
I.7.2 Muestreo y preparación de las muestras de suelo	13
I.7.3 Caracterización física y química del suelo	15
I.7.4 Determinación de la actividad microbiana del suelo	15
I.7.4.1 Respiración microbiana	15
I.7.4.2 Determinación de C de la biomasa microbiana	16
I.7.4.3 Determinación del N de la biomasa microbiana	19
I.7.5 Muestreo para la diversidad vegetal	20
I.7.6 Determinación de los índices de vegetación	21
I.7.7 Diseño experimental y modelo estadístico	22
II RESULTADOS	24
III DISCUSIÓN	37
IV CONCLUSIONES	45
V REFERENCIAS	46

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo	4
Tabla 2. Parámetros del suelo, el método y su referencia	15
Tabla 3. Cantidad de glucosa adicionada a cada muestra de suelo con base al contenido de materia orgánica del suelo	18
Tabla 4. Índices de diversidad determinada en cada suelo de acuerdo con Moreno (2000)	22
Tabla 5. Análisis de varianza de los diferentes parámetros evaluados del suelo	24
Tabla 6. Propiedades físicas de los diferentes tipos de suelo dentro del parque Nacional La Malinche	25
Tabla 7. Propiedades químicas de los diferentes tipos de suelo dentro del Parque Nacional La Malinche	26
Tabla 8. Parámetros biológicos en los diferentes suelos	26
Tabla 9. Porcentaje de abundancia de familias por uso de suelo	27
Tabla 10. Índices de vegetación por uso de suelo	28
Tabla 11. Porcentaje de similitud de especies en los suelos por cambio de uso	30
Tabla 12. Análisis de correlación de Pearson para las propiedades de los suelos y los índices de diversidad	34
Tabla 13. Proporción de la variación explicada para cada componente principal de los parámetros evaluados	35

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación de la comunidad de San Bartolomé Cuahuixmatlac	12
Figura 2. Concentración de glucosa que induce una máxima respiración del suelo	14
Figura 3. Curvas para determinar la concentración de glucosa y el tiempo requerido que induce y una máxima respiración del suelo	17
Figura 4. Distribución de los cuadrantes para el muestreo de vegetación	21
Figura 5. Dendrograma de la similitud de especies por uso de suelo	31
Figura 6. Curva de acumulación de especies	32
Figura 7. Gráfico biplot de las propiedades edáficas y diversidad vegetal en los suelos por cambio de uso	36

RESUMEN

El cambio de uso de suelo es la transformación de la cubierta vegetal original para otros fines, en los bosques, estos cambios tienen un gran impacto en los suelos causando su degradación, la cual provoca una alteración en los diferentes servicios y beneficios que estos brindan al ecosistema. Sin embargo, existen herramientas que indican el nivel de degradación de los suelos dependiendo del tipo de transformación al que han sido sometidos. Las actividades naturales como antrópicas han acelerado esta degradación, por lo que es necesario evaluar el impacto de éstas y con ello tener una visión más completa de cómo afecta al suelo y por consecuencia a la vegetación. El objetivo de este trabajo consistió en analizar el efecto del cambio de uso del suelo sobre la actividad microbiana y diversidad vegetal en tres diferentes ambientes dentro del Parque Nacional La Malinche (PNLM) los cuales fueron: suelos del bosque (testigo), bajo saneamiento a causa del gusano descortezador y con actividades agrícolas. Los resultados indicaron que este tipo de actividades afectan los suelos de este ecosistema, principalmente en las propiedades biológicas como son la liberación de CO₂ y algunas propiedades químicas como el contenido de materia y carbono orgánico. Por el lado de las propiedades físicas afecta el porcentaje de porosidad y la densidad aparente son los parámetros que se ven más afectados. En cuanto a las biológicas con respecto a la vegetación, también se observa un impacto negativo, debido que la mayoría de las especies vegetales dejan de tener presencia para dar paso a otras diferentes, provocando así cambios en el microclima de los sitios, el cual se ve afectado por la humedad y temperatura. Debido a que el PNLM es un área natural protegida, es importante suscitar el interés en las disciplinas ambientales para establecer programas encaminados a la conservación de los suelos y por ende de la vegetación con la finalidad de seguir obteniendo los grandes benéficos que brinda.

ABSTRACT

The change of land use is the transition of the original vegetation cover for other purposes. In forests, these changes greatly impact the soils that cause their degradation, which causes a modification in the different services and benefits that they provide to the ecosystem. However, there some tools indicate the level of soil degradation on the type of transformation to which they have been subjected. Natural and anthropic activities have accelerated this degradation, which is why it is necessary to evaluate the impact that these have in order to have a more complete vision of how it affects the soil and, consequently, the vegetation. This work aims to analyze the effect of land use change on microbial activity and plant diversity in three different environments within La Malinche National Park forest soils (control), under sanitation due to the worm debarked and with agricultural activities. The results indicate that this type affects the soils of this ecosystem, mainly in the biological ones such as the release of CO₂ and some chemical properties such as the content of organic matter and organic carbon. , On the side of the physical properties, the percentage of porosity and the apparent density are the parameters that are most affected. However, on the side of the vegetation, an impact is also observed, because the fact that the plant species cease to have a presence to give way to other different ones, thus causing changes in the microclimate of the sites, which is affected by the humidity and temperature. The NPLM being a protected natural area, it is important that the reflectors point towards the conservation of soils and vegetation to continue obtaining the great benefits they provide as a fore

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es considerado como la capa que cubre la superficie terrestre, compuesta por minerales, agua, aire y materia orgánica, además de ser el hábitat de una amplia diversidad de microorganismos (Fray, 2010). Una de las principales funciones que en él se realizan es el ciclo de nutrientes y la regulación hídrica; además de diversas interacciones ambientales. También funciona como hábitat de diversas especies, es considerado como una reserva genética y fuente importante de materias primas (Trujillo-González *et al.*, 2018). Sin embargo, el suelo puede perder dichas funciones, debido a una degradación natural o acelerada, resultado de la intervención del hombre (Bermúdez, 2012).

De manera particular, los suelos forestales de los bosques templados están influenciados por la presencia de vegetación, la cual forma una capa superficial orgánica que proporciona un microclima especial, lo que permite un mayor desarrollo de microorganismos en comparación con los suelos agrícolas (Vanegas-Chacón y Méndez-Paiz, 2016). No obstante, estos ecosistemas son degradados debido a los cambios en el uso de suelo, ya sea para la agricultura, la tala ilegal, los incendios forestales, las plagas y enfermedades, lo que genera impactos negativos a la biodiversidad y a la provisión de servicios ecosistémicos (Flores-Arteaga, 2019).

Este impacto puede ser medido a través de indicadores de calidad del suelo, los cuales cubren un amplio número de propiedades físicas, químicas y biológicas, estas últimas son más sensibles a los cambios (Muñoz-Rojas, 2018). Dentro de las propiedades biológicas, los indicadores microbiológicos como la actividad microbiana, el contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) de la biomasa microbiana, son más sensibles para detectar diferencias en el suelo (Cruz *et al.*, 2004; Gómez y Paolini, 2011).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en evaluar el efecto del cambio de uso de suelo dentro del Parque Nacional La Malinche sobre la actividad microbiana del suelo y la diversidad vegetal.

I.1 MARCO TEÓRICO

I.1.1 El recurso suelo

El suelo es considerado un recurso natural finito, no renovable que proporciona diversos servicios ecosistémicos, entre ellos, el relacionado con los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo (Silva y Correa, 2009). Es un componente ambiental que por su origen, formación y evolución no puede ser aislado del entorno que lo circunda. Además, este influye en el medio en el que se ubica teniendo impacto en las actividades sociales y económicas de su entorno (Burbano-Orjuela, 2016). Por ello, tanto el uso inadecuado como el cambio de uso o su sobreexplotación, con el fin de satisfacer necesidades humanas de interés económico y social, pueden contribuir a su degradación natural, ya que es uno de los recursos más utilizados por el hombre, debido al enorme crecimiento poblacional, industrial y urbano (Sánchez-Corona, 2008).

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo ha adoptado un concepto holístico, considerándolo como la capacidad de este para funcionar dentro de ciertos límites naturales y antrópicos del ecosistema, para sustentar la productividad vegetal y animal, mantener la calidad del agua y del aire, promover la salud de plantas, animales y hombre, y con ello soportar su habitabilidad (Doran y Parkin, 1994; De la Rosa, 2005).

I.1.2 Funciones del suelo

Los suelos son un elemento importante para el adecuado funcionamiento de los ecosistemas, es el hábitat de una gran diversidad de microorganismos, participa en la retención de carbono, purificación del agua y reducción de contaminantes, además de satisfacer diversas necesidades humanas, como la provisión de alimentos, sostén para infraestructura humana, suministro de alimentos, fibras y combustibles (FAO, 2015). Sin embargo, estas funciones del suelo se ven amenazadas por la erosión, la pérdida del carbono orgánico del suelo (COS), por el desequilibrio de nutrientes, la acidificación de él suelo, contaminación, inundaciones, compactación, sellado del suelo, salinización y pérdida de la biodiversidad (FAO, 2016).

El suelo influye considerablemente sobre el medio en el que se ubica y repercute en las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se desarrollan en ese territorio, los diversos servicios que brinda como recurso validan la importancia de su conocimiento por parte de la sociedad mundial para que lo valoren, protejan y conserven. De ahí la importancia de conocer y respetar el suelo para hacer un manejo óptimo de este recurso, sin olvidar la gran relación entre el sistema natural y sistema socio-cultural (Burbano-Orjuela, 2016).

I.1.3 Cambio de uso del suelo

El término “cambio de uso del suelo” es la acción que afecta a las propiedades del suelo relacionadas con su funcionalidad y productividad, lo que le provoca alteraciones impactando en su calidad.

La SEMARNAT en el 2006, definió el término cambio de uso de suelo como la transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos o degradar la calidad de la vegetación al modificar la densidad y la composición de las especies presentes. El análisis de cambios en la cobertura de suelo es importante y necesario, porque proporcionan la base para conocer las directrices de los procesos de degradación, desertificación, y pérdida de la biodiversidad, así como de servicios ecosistémicos de una región (Gaspari et al., 2015).

Falcón, (2014) mencionó que el cambio global ha afectado a los suelos, la deforestación e incendios han ocasionado cambios en la cobertura vegetal de los diferentes ecosistemas terrestres, aunado al incremento poblacional, así como un aumento en la demanda de los recursos naturales.

I.1.4 Calidad e indicadores del suelo

La calidad del suelo se entiende como la capacidad que tiene para desempeñar funciones en un ecosistema natural o mejorado, sostener la productividad de las plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y el hábitat (Doran y Parkin, 1994). *Cruz et al.*, (2004) mencionan que la calidad del suelo es la capacidad que tiene para atender las diferentes demandas de uso, cuya dinámica puede cambiar en corto plazo de acuerdo con el manejo que se le realice.

Indicadores, tales como las propiedades físicas, químicas y biológicas (Tabla 1), van a permitir monitorear el impacto de las actividades tanto naturales como antrópicas, además de determinar si el uso de este recurso es sostenible (García *et al.*, 2012). Trujillo-González *et al.*, (2018) señalaron que a pesar de los beneficios potenciales del uso de indicadores se debe considerar que los requerimientos cambian si el uso es agrícola, forestal, urbano y/o industrial. Además, se deben incluir funciones como aumento de la productividad, la salud de las plantas, animales y seres humanos, entre otras y considerar las condiciones particulares de cada región, debido a que las variables edafoclimáticas varían de un lugar a otro.

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo.

Físicas	Químicas	Biológicas
Textura	pH	C de la biomasa microbiana
Estructura	Conductividad eléctrica	N de la biomasa microbiana
Densidad aparente	Capacidad de intercambio catiónico	Respiración del suelo
Profundidad del perfil	Carbono orgánico total	Coeficiente metabólico
Conductividad hidráulica	Carbono hidrosoluble	Actividad enzimática
Estabilidad de agregados	Nitrógeno total	Comunidades microbianas (conteo en placa, técnicas metagenómicas)
Tasa de infiltración		Fauna edáfica (hormigas, oribátidos, colémbolos, lombrices)

Muñoz-Rojas (2018), Wolińska *et al.* (2018), Cabrera *et al.* (2019).

I.1.4.1 Indicadores biológicos del suelo

El componente microbiano del suelo es importante para la salud de los ecosistemas, así como para el manejo de los recursos vegetales, lo cuales inciden sobre los microorganismos del suelo, en cuanto a su biodiversidad y densidad de las poblaciones microbianas que a mediano y largo plazo pueden ocasionar la pérdida de la fertilidad y su posterior degradación (Portugal y Aguilera, 1998).

La actividad microbiana como indicador biológico ayuda a entender la importancia de los ciclos biogeoquímicos, como parte fundamental en el ámbito ecológico, debido a que por una parte representan el nivel biológico en donde se involucra el

componente lábil de la materia orgánica, lo que permite mantener la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas (Zagal et al., 2002). La tasa de respiración microbiana, del suelo, edáfica o basal, es un proceso que refleja la actividad biológica y se pone de manifiesto a través del desprendimiento de CO₂ o el consumo de O₂ que resulta del metabolismo de los organismos vivos presentes en el suelo. El término “respiración del suelo” hace referencia a la actividad biológica global de la biota del suelo, que incluye a los microorganismos (bacterias, algas, hongos y protozoos), macroorganismos (lombrices, nematodos e insectos) y raíces de las plantas. En contraparte, la “respiración microbiana” refleja exclusivamente la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el suelo (Hernández y García et al., 2003). Fernández et al. (2018) refirieron que una mayor respiración se relaciona con un incremento en la actividad microbiana; sin embargo, altas tasas de respiración por encima de un valor límite podrían representar una pérdida excesiva de carbono para el ecosistema.

Por otro lado, la actividad de los microorganismos presentes en el suelo puede ser estimada por la cantidad de C y N de la biomasa que se encuentra en el suelo. El C de la biomasa microbiana (C-BM) es un indicador biológico que permite identificar de manera temprana los efectos de las distintas prácticas de manejo del suelo, los nutrientes que pueden estar en el suelo se relacionan con el C-BM, debido a que la biomasa microbiana está representada entre de 1 y 4% del carbono orgánico total (Toledo et al., 2019). El C-BM cumple la función de catalizador y como suministro en la conversión de nutrientes, además de contribuir a la creación y estabilización de la estructura de suelo; generalmente se expresa en mg de carbono por kg de suelo, o también como µg de C por gramo de suelo seco (Ruíz y Paolini, 2004).

Respecto al N, forma parte fundamental de la biomasa microbiana, la cual mineraliza las formas orgánicas de este elemento siendo sus unidades µg N g⁻¹ suelo (Delgado y España, 2000).

I.1.5 Diversidad vegetal

La “biodiversidad” se refiere a todas las formas de vida que se manifiestan en la Tierra. En un sentido más amplio, la biodiversidad no se limita al número de especies que han existido, sino que también incluye desde la variación genética en individuos y poblaciones, hasta la diversidad de ecosistemas y biomas (Wilson, 1988). México es un país con una riqueza natural extraordinaria; sin embargo, a pesar de dos siglos de trabajo en sistemática, se conoce solamente una fracción del total de las especies que existen en el país. Un problema de suma importancia es que esta gran diversidad biológica se está perdiendo con un aumento en la tasa de extinción de especies en orden de magnitud mayor que la tasa natural (Martínez-Meyer *et al.*, 2014). En el caso de la diversidad vegetal, es considerada como la variación de especies que habitan en un área determinada, las cuales se van a hacer presentes en los diferentes niveles jerárquicos de las diferentes formas de organización de vida, como lo son a nivel de organismos y ecosistemas (Ortega y Escaso, 2012).

La estructura, y conservación de la diversidad vegetal son características principales para considerar en los bosques, para poder entender el funcionamiento de estos ecosistemas (Graciano-Ávila *et al.*, 2017). La conformación de las comunidades de especies vegetales está directamente asociada con la altitud y características del suelo, así como a las diferentes condiciones del clima, lo que da pauta a la riqueza y diversidad de especies (Ávila-Sánchez *et al.*, 2018).

Se han desarrollado trabajos de investigación para conocer el número de especies con el fin de dar seguimiento a las variaciones de su riqueza, cuál ha sido el impacto de las actividades humanas, así como para explicar cuál es su interacción con los métodos de estimación descritos. La riqueza de especies se describe como la relación del número de taxones encontrados por unidad de área (Campos-Sánchez *et al.*, 2017).

Dentro del Parque Nacional La Malinche podemos encontrar bosques de pinus, la cual está caracterizada por la dominancia de especies arbóreas pertenecientes al género *Pinus* (Pinaceae), en estos sitios podemos encontrar estratos principalmente

compuestos por gramíneas, tales como *stipa ichu*, *Festuca tolucensis* y *Muhlenbergia macroura*, mientras que en el estrato arbustivo encontramos especies como *senecio cinerarioides*, *S. salignus* y *Baccharis conferta* (Fernández y López-Dominguez, 2005).

I.1.5.1. Índices de diversidad

Los índices de biodiversidad se han enfocado hacia la generación de parámetros que permiten caracterizar las comunidades ecológicas, se han desarrollado diferentes tipos como alfa, beta y gamma, con la finalidad de analizar la interacción en los ecosistemas naturales y el efecto de los cambios en el ambiente, y así generar estrategias para su manejo y conservación (Jost y González-Oreja., (2012).

De acuerdo con Sugg (1996) la diversidad alfa es el número de especies que viven y están adaptadas a un hábitat homogéneo, cuyo tamaño determina el número de especies por relación de área-especie, en la cual a mayor área mayor cantidad de especies. Este índice tiene estrecha relación tanto a factores locales como a interacciones poblacionales, dando como resultado sucesos de colonización o recolonización (Sonco, 2013).

I.2 ANTECEDENTES

Entre los trabajos desarrollados en diferentes partes del país y que de una u otra forma se relacionan con el presente estudio, se encuentra el de Iglesias (2001) estudió la dinámica de la biomasa microbiana para C, N y P durante 24 meses en suelos incendiados con coberturas de roble y enebro. Para la determinación del N de la biomasa microbiana empleo el método de fumigación-incubación, como resultado obtuvieron que en las muestras sin fumigar hubo diferencias con el paso del tiempo, la cantidad de N-NH₄ a los 2 meses fue de 294 y 124.98 mg kg⁻¹ mientras que a los 22 meses de 11.35 y 38.58 mg kg⁻¹, por otro lado, en las muestras fumigadas no se observaron diferencias significativas, los valores a los 2 y 22 meses fueron de 198.90 y 111.47 mg kg⁻¹, respectivamente, debido a esto el autor atribuyó que, la fumigación ocasionó la liberación de sustancias orgánicas que se descomponen fácilmente, dichas sustancias serían inaccesibles al ataque microbiano, con lo cual puede haber una inmovilización del N mineral.

Álvarez-Solís y Anzueto-Martínez (2004) analizaron el efecto de las prácticas agrícolas en el cultivo de maíz sobre la actividad microbiana del suelo y su fertilidad, para ello seleccionaron localidades en los altos de Chiapas, Tzeteltón y Bautista, las parcelas seleccionadas contaban con sistemas de producción de barbecho largo-corto y anual continuo, encontraron que la respiración microbiana en Tzeteltón suelo de barbecho largo fue más alto con valores de 220 y 223 mg CO₂ g⁻¹, de modo que el suelo con uso agrícola tiene un mayor desprendimiento de CO₂ que en parcelas con más años de cultivo, además la respiración microbiana tiene correlación positiva con la materia orgánica y el N total del suelo, las diferencias en las cantidades encontradas de C orgánico mineralizado está relacionado con la disminución de la fracción lábil de la materia orgánica que es afectada principalmente por la acidez del suelo, la importancia de la implementación de diferentes prácticas agrícolas contribuyen a mantener la calidad y cantidad de las reservas orgánicas del suelo.

Condori-Castillo (2012) estimó la diversidad florística y distribución en sitios fragmentados por actividades agrícolas. Encontró 52 especies, en la zona no

fragmentada se encontraron 49 especies, 3778 individuos, 39 géneros y 17 familias mientras que se observaron solo 20 especies, 2200 individuos, 17 géneros y 6 familias en la zona fragmentada, lo que indica una disminución en cuanto a la diversidad de la flora vegetal.

Cruz-Ruiz et al., (2012) quienes analizaron la influencia del uso de suelo sobre la respiración y propiedades físicas y químicas en el Parque Nacional Nevado de Toluca considerando muestras de tres diferentes usos de suelo: bosque, cultivo continuo y dedicado al pastoreo. Los suelos que liberaron una mayor cantidad de CO₂ fueron los de bosque y pastoreo, esto es debido a que el proceso de mineralización del carbono está relacionado con la fracción lábil del carbono y , los valores de CO₂ desprendidos en el suelo del bosque fueron de 91.23 y 64.89 mg C kg⁻¹ en suelo bajo cultivo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo respecto a la concentración de N, esto debido a que las poblaciones nitrificantes en el bosque han decaído en su diversidad, además de denotar una pobre cantidad de materia orgánica.

Alanís-Rodríguez et al. (2014) analizaron la diversidad α y la β de un sotobosque en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, se seleccionaron tres áreas de bosque con regeneración de 3, 11 y 69 años después de un incendio. Se identificaron 23 familias, 33 géneros y 43 especies, las familias más abundantes fueron Asteraceae, Anacardiaceae y Rubiaceae, la zona que presentó mayor riqueza de especies fue la de 3 años con regeneración, debido a que la afectación de la estructura arbórea por las llamas incrementó la radiación solar directa; además de una mayor disponibilidad de nutrimentos debido a las cenizas, lo que genera condiciones favorables en el suelo para la germinación del banco de semillas. El índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') a 3 años fue de 1.47, de 1.46 para el sitio con 11 años y a los 69 años fue de 1.32. Respecto a la diversidad β a los 3 años fue del 47 % disminuyendo a 11 y 69 años.

Re (2019) evaluó la actividad microbiana asociada a la composición florística en el Área Natural Protegida “Parque Universitario Provincia del Monte”, de la ciudad de Neuquén, Argentina, se realizaron cinco transectos de 50 m cada uno, se

determinó la abundancia y frecuencia realizando el conteo de especies en cada espacio muestreado, para ello se utilizó el índice de Shannon-Weaver (H') y el índice de Simpson (D), así como el coeficiente de similitud de Jaccard, se realizaron análisis físico-químicos del suelo. Como resultados obtuvieron que los valores el índice de Shannon, oscilaron de 1.10 a 1.79; mientras que, la concentración de carbono fue en promedio de 8.4×10^{-5} y 2.91×10^{-5} mg de $\text{CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de suelo seco h^{-1} , respectivamente. En tanto, en la medición de la respiración basal, los valores fueron 1.25×10^{-4} y 1.38×10^{-2} mg de $\text{CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de suelo seco h^{-1} .

Rendón-Pérez (2021) determinó la composición de especies en un bosque templado y su relación por el efecto de las prácticas silvícolas, se encontraron en total 88 especies pertenecientes a 47 géneros y 29 familias, en el estrato arbustivo se registraron 6 familias y *Baccharis conferta* Kunth y *Ageratina glabrata* Kunth fueron las especies dominantes, en el estrato herbáceo se registraron 58 especies de 26 géneros y 24 familias. La familia mejor representada fue la Asteraceae, de acuerdo con la diversidad alfa el índice de Simpson máximo se encontró en el estrato herbáceo del área bajo aprovechamiento maderable fue de 0.62, es decir, la mayor diversidad de especies del estrato arbustivo y herbáceo se tuvo bajo aprovechamiento forestal.

I.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿El cambio de uso de suelo dentro del Parque Nacional La Malinche modifica la diversidad vegetal y la actividad microbiana del suelo?

I.4 HIPÓTESIS

Los cambios de uso de suelo dentro del Parque Nacional La Malinche reducen la diversidad vegetal y la actividad microbiana del suelo.

I.5 JUSTIFICACIÓN

El suelo provee importantes servicios ambientales, pero el cambio climático, como el un uso inadecuado, así como su sobreexplotación para satisfacer intereses económicos y sociales, contribuyen a su degradación. Una de las problemáticas que se identifican en el Parque Nacional La Malinche el cambio de uso de suelo

representa un gran problema, que puede modificar la diversidad vegetal la cual va a influir de manera significativa en el componente microbiológico, el cual responde de forma rápida ya que es sensible a situaciones de estrés asociados a eventos ambientales y antrópicos. Dicho componente, es esencial, debido a que es responsable de múltiples funciones en el suelo, participan en casi todas las reacciones metabólicas y constituyen un suministro de energía y nutrientes, dado por la degradación de la materia orgánica, proceso ligado a los microorganismos y su velocidad de descomposición indica el nivel de la actividad microbiana de un suelo. Por tal motivo este componente biológico se ha propuesto como indicador válido para diagn

osticar el impacto generado por cambios en el uso del suelo.

I.6 OBJETIVOS

I.6.1 General

Analizar el efecto del cambio de uso del suelo sobre la actividad microbiana y diversidad vegetal en tres diferentes ambientes dentro del Parque Nacional La Malinche.

I.6.2 Específicos

1. Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos dentro del Parque Nacional La Malinche para conocer el impacto del cambio de uso de suelo.
2. Estimar la actividad microbiana del suelo a través de la tasa respiratoria de los microorganismos y el contenido de C y N de la biomasa microbiana por la técnica de fumigación-extracción.
3. Determinar la riqueza y abundancia de la diversidad vegetal por el cambio de uso del suelo dentro del Parque Nacional La Malinche.
4. Analizar la relación entre las propiedades edáficas y diversidad vegetal por cambio de uso dentro del Parque Nacional La Malinche.

I.7 Metodología

I.7.1 Ubicación del área de estudio

Por el cambio de uso del suelo dentro se seleccionaron tres sitios en la comunidad de San Bartolomé Cuahuixmatlac (Figura 1), municipio de Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala. El clima es templado subhúmedo, temperatura media anual oscila entre 10 y 16 °C, los meses más calurosos se presentan entre marzo y junio; la precipitación media anual oscila entre 700 y 1000 mm, los meses más lluviosos se registran entre mayo y septiembre (López-Domínguez, 2004). El suelo predominante corresponde al orden Luvisol en un 35 % y Regosol 32 % (INEGI, 2009).

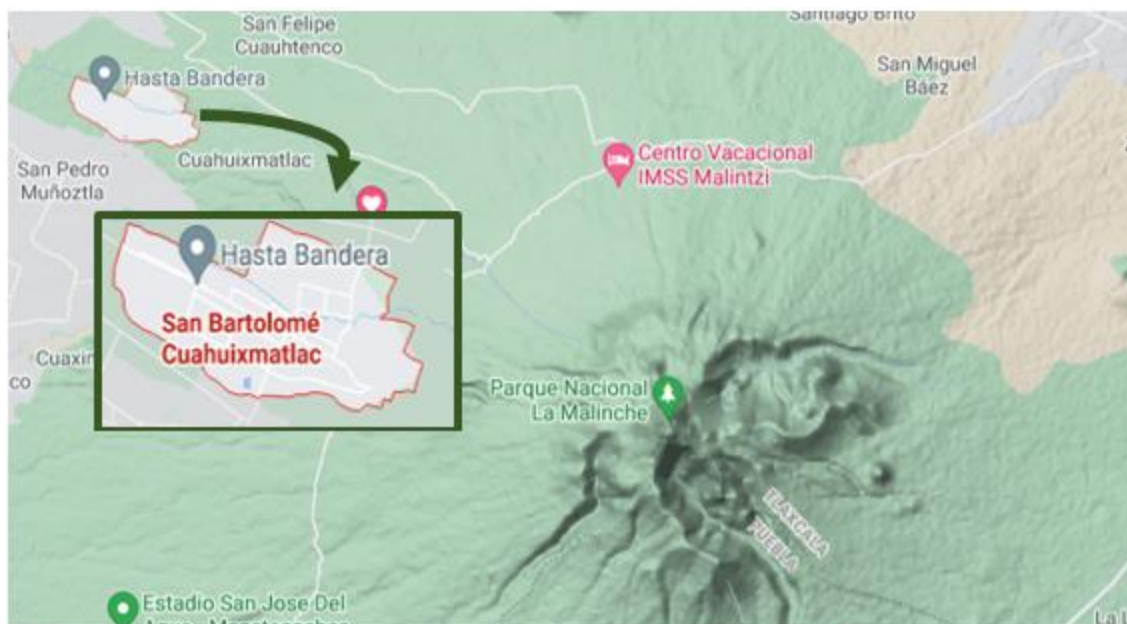


Figura 1. Ubicación de la localidad de San Bartolomé Cuahuixmatlac municipio de Santa Ana Chiautempan Tlaxcala

Los suelos seleccionados fueron de bosque, agrícola y bosque con saneamiento, se realizó el muestreo en el mes de agosto (2021), durante la época de lluvia.

- 1) Sitio bosque, en donde predomina *Pinus montezumae* Lamb. y *Lupinus elegans* HBK, se localiza en las coordenadas geográficas 19°16'16.5" N y 98°05'51.6" W a 2 810 m.s.n.m
- 2) Sitio agrícola, cultivado con maíz por más de 40 años, localizado en las coordenadas geográficas 19°16'16.5" y 98°05'51.6" y a 2 810 m.s.n.m
- 3) Sitio bajo saneamiento, al momento del muestreo sin presencia de arbolado por tala controlada, debido al ataque de la plaga del gusano descortezador, el cual ha afectado a miles de árboles dentro del Parque Nacional La Malinche. Este sitio se ubica en las coordenadas 19°16'56" N y 98°07'25" a 2 592 m.s.n.m. El saneamiento se realizó en el mes de octubre 2020 de acuerdo con la NOM-019-SEMARNAT-2017 que establece los lineamientos técnicos para la prevención, combate y control del gusano descortezador.

I.7.2 Muestreo y preparación de las muestras de suelo

Para el muestreo de cada uno de los suelos se consideró una superficie de 50 m x 50 m = 2 500 m², se utilizó el método sistemático, en donde se indica que para esta superficie se deben tomar al menos 7 muestras simples. Éste se basa en un patrón geométrico específico, donde las muestras son tomadas a intervalos regulares a lo largo de ese patrón, útil para cubrir en forma fácil y uniforme un sitio, la distribución de los puntos de muestreo es a través de una cuadrícula dentro del sitio, como lo indica la NMX-AA-132-SCFI-2016.

En cada sitio se trazaron 25 cuadrantes de 10 m x 10 m en el muestreo no se consideraron los cuadrantes de los bordes para eliminar el efecto de borde y en cada uno de los nueve cuadrantes restantes se recolectaron en zig-zag, tres muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm y de 10-20 cm, todas ellas de 500 g cada una (Figura 2), lo que dio un total de 54 muestras en total. Cada muestra fue colocada en bolsa de plástico, debidamente etiquetada y trasladada en frío al laboratorio para su posterior análisis.

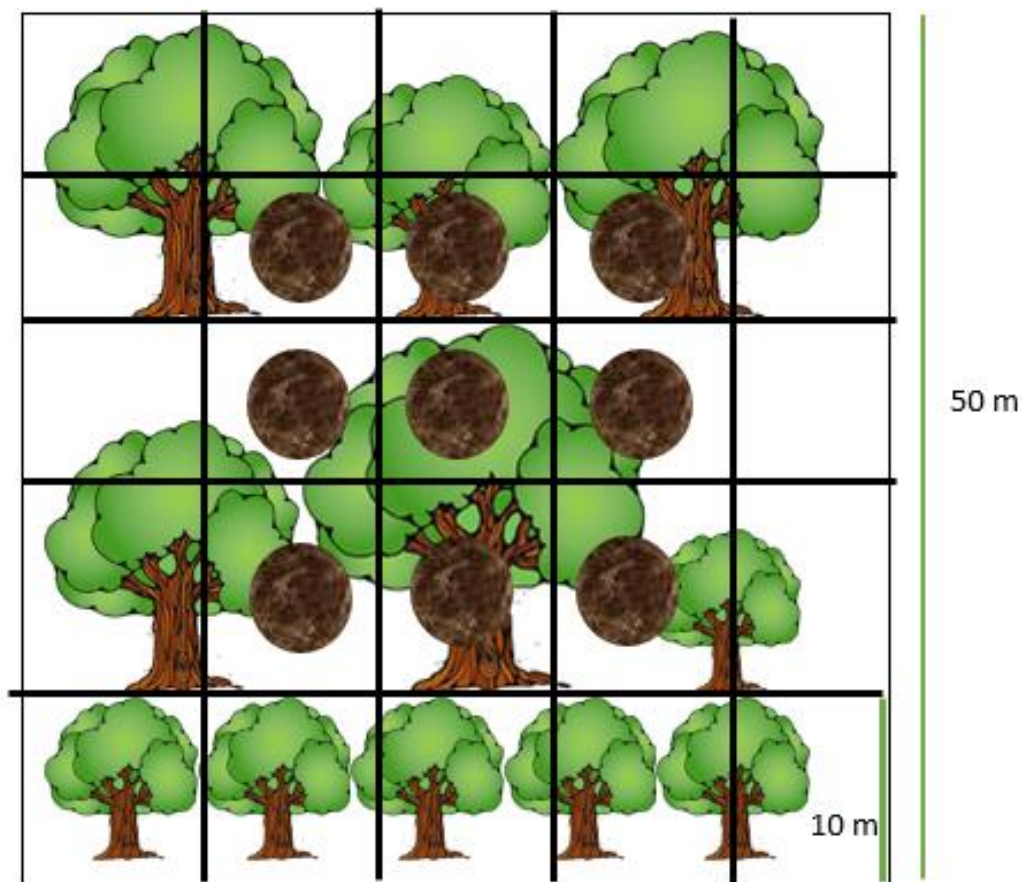


Figura 2. Representación de los cuadrantes para la toma de muestras de suelo.

Una vez en el laboratorio 200 g suelo se conservaron en refrigeración a 4 °C para los análisis microbiológicos, el resto se colocó en papel Kraf para secar a temperatura ambiente y a la sombra por 48 h. Las muestras secas fueron pasadas por un tamiz de malla 2 mm para obtener un tamaño de partícula homogéneo, de acuerdo con lo que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), posteriormente las muestras se conservaron en bolsa de plástico en un ambiente seco y a la sombra hasta sus análisis físico-químicos.

1.7.3. Caracterización física y química del suelo

Se realizó la caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo por cada uno de los sitios y profundidad (0-10 y 10-20 cm), a excepción de la temperatura y humedad, (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros del suelo, método y referencia.

Parámetro	Método	Referencia
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos	Rodríguez y Rodríguez (2002)
Densidad aparente (g cm^{-3})	Método de la probeta	NMX-FF-109-SCFI-2007
Porosidad (%)	Fórmula	Ortíz-Solorio (2019)
pH	Relación 1:2 (p/v)	Álvarez y Marín (2011)
Materia orgánica (%)	Oxidación en húmedo con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Álvarez y Marín (2011)
Carbono orgánico (%)	Fórmula	NOM-021-SEMARNAT-2000
Nitrato (mg kg^{-1})	Extracción KCl 2N	Álvarez y Marín (2011)
Fósforo (mg kg^{-1})	Bray y Kurtz	Álvarez y Marín (2011)
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Equipo HUBBS	Vega-Quintero (2018)
Humedad (%)	Equipo HUBBS	Vega-Quintero (2018)

1.7.4 Determinación de la actividad microbiana del suelo

1.7.4.1 Respiración microbiana

Se determinó por la cuantificación de CO_2 por el método álcali de acuerdo con la metodología que establece Paolini-Gómez, (2018). De las muestras de suelo en refrigeración a 4°C se pesaron 20 g y colocaron en un frasco de vidrio hermético de 250 mL de capacidad, se humedeció con agua destilada al 60 % de su capacidad de campo. Por otro lado, se preparó un vial con 3 mL de NaOH al 0.2 M, el cual se introdujo al frasco donde se encontraba la muestra de suelo, se tapó herméticamente el frasco y se incubó por un periodo de 24 h a temperatura de 22°C en oscuridad, concluido el periodo de incubación se reemplazó la trampa de álcali y posteriormente cada siete días durante cuatro veces en un periodo de 30 días. Los 3 mL de NaOH se vaciaron en un matraz Erlenmeyer de 50 mL para después añadir 2 mL BaCl_2 0.5 M para precipitar el CO_2 y el exceso de NaOH, posteriormente se

tituló con HCl 0.2 N utilizando fenolftaleína como indicador. La cantidad de CO₂ liberado en cada periodo se calculó mediante la fórmula:

$$\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo día}^{-1} = \frac{(B-S) \times M \times 6}{G \times T}$$

Donde:

B= Volumen (mL) de HCl empleado en la valoración de los blancos.

S= Volumen (mL) de HCl empleado en la valoración de las muestras de suelo.

M= Molaridad del HCl utilizado en valoración (0.2 N).

6= Factor de conversión, considerando que 1 mL de NaOH 1M equivale a 6 mg de C-CO₂.

G= Cantidad de suelo (20 g).

T= Tiempo de incubación por periodo (7 días).

Posteriormente se sumó el CO₂ de los cuatro periodos y se obtuvo el promedio por 7 días, para luego transformar las unidades del CO₂ (mg C-CO₂ kg⁻¹ suelo día⁻¹) a kg C-CO₂ ha⁻¹ día⁻¹, en donde se consideró la profundidad del muestreo (0-10 cm y 10-20 cm), así como la densidad aparente del suelo.

I.7.4.2 Determinación del C de la biomasa microbiana

Para la obtención de este parametro se empleó el método de la respiración inducida por un sustrato (RIS) de acuerdo con Albiach *et al.* (2003). Ésta técnica considera el suelo seco y tamizado, así como el contenido de materia orgánica (Tabla 3) que según su concentración y de acuerdo con el porcentaje de materia orgánica serán agrupados (1-2, 2-3, 3-4 y > 13 %), con base en estas cantidades se agruparon las muestras de suelo en 4 grupos. En el grupo de 1-2% de materia orgánica se tuvieron 13 muestras, el grupo de 2-3% de materia orgánica con 18 muestras, el grupo de 3-4% de materia orgánica con 13 muestras y en el grupo con > 13 % de materia orgánica se tuvieron 10 muestras.

1. Determinación de la cantidad óptima de glucosa a añadir al suelo.

Una vez agrupadas las muestras de suelo con base al porcentaje de materia orgánica, se estimó la cantidad más baja de glucosa que produce una respiración máxima de suelo y el tiempo requerido para llegar a ello, para lo cual en frascos herméticamente cerrados se añadieron a 100 g de cada de las muestras de suelo concentraciones de 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6 mg de glucosa/g suelo seco, las cuales fueron disueltas en 2 mL de agua destilada para mantener una atmósfera húmeda. Los frascos se incubaron a 22 °C, la determinación de CO₂ por el método álcali se realizó cada hora durante 6 h posterior al inicio de la incubación de este intervalo de tiempo en el cual se reporta que es degradada la glucosa por los microorganismos del suelo (Albiach et al., 2003). Posteriormente se graficaron los resultados del desprendimiento de CO₂ para obtener el valor máximo de respiración del suelo de acuerdo con la cantidad de glucosa (Figura 4 y Tabla 2).

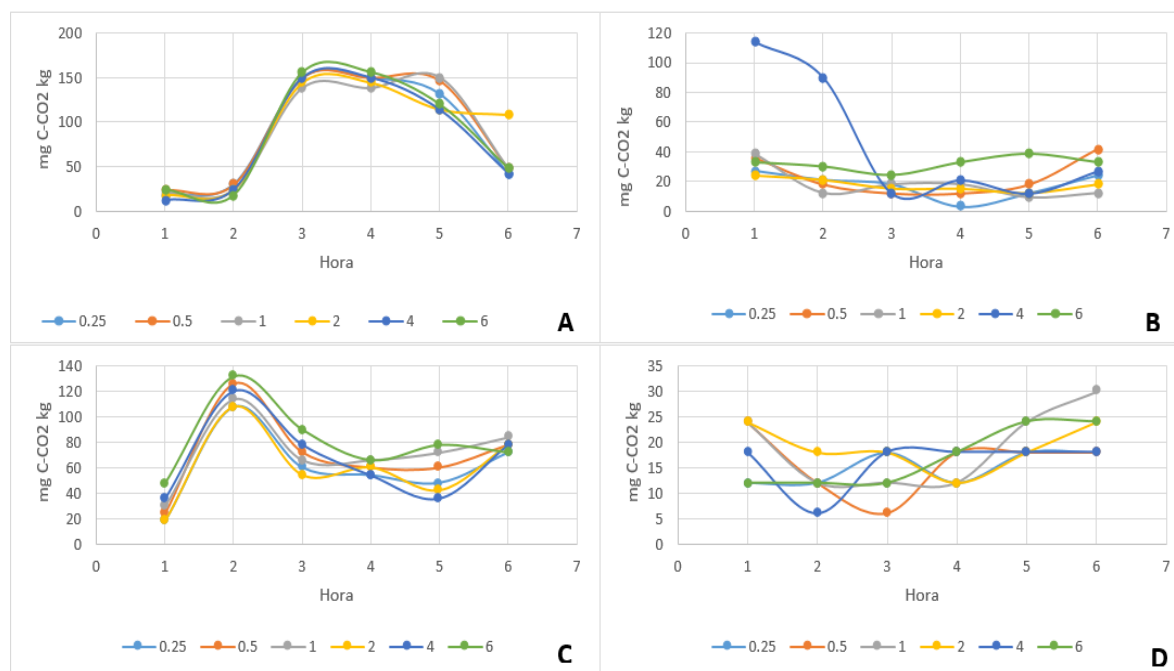


Figura 3. Concentración de glucosa que induce una máxima respiración del suelo. A) suelo 1-2% materia orgánica, B) suelo con 2-3% materia orgánica C) suelo con 3-4 % de materia orgánica y D) suelo > 13% de materia orgánica.

Tabla 3. Cantidad de glucosa adicionada a cada muestra de suelo con base al contenido de materia orgánica.

Materia orgánica (%)	mg de glucosa/g de suelo seco
1-2	2
2-3	0.5
3-4	1
< 13	1

2. Determinación de los valores de respiración por CO₂ desprendido

Una vez que se determinó la cantidad más baja de glucosa que produce una máxima inducción de la respiración del suelo y el tiempo necesario de acuerdo con el % de materia orgánica, se añadió la cantidad de glucosa a las diferentes muestras de suelo (Tabla 2) y se llevaron a incubar a 22 °C. por 7 días. Al término se realizó la determinación del CO₂ a través del método álcali, propuesto por Paolini Gómez (2018).

Posteriormente se calculó el C de la biomasa microbiana (C-BM) por la ecuación propuesta por Ochoa (2015).

$$\text{CO}_2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1} = [(V_b - V_m) \cdot N \cdot 6.6 \cdot 1000] / (P_m \cdot T)$$

Donde:

V_b= Valoración del blanco

V_m= Valoración de la muestra

N= Normalidad del HCl 0.2 N

6.6= Factor de conversión del NaOH

P_m = Peso de la muestra

T= Tiempo de incubación

1.7.4.3 Determinación de N de la biomasa microbiana

Para esta determinación se empleó el método de fumigación-incubación propuesto por Jenkinson y Powlson (1976), en donde las muestras de suelo de cada uno de los sitios se sometieron a la acción fumigante del cloroformo, cuyo propósito es eliminar todo componente microbiano y tras una reinoculación con el suelo no fumigado se determinó la materia orgánica mineralizada, la cual, se descontó de las muestras no fumigadas (controles).

1. Fumigación de las muestras de suelo con cloroformo

Se pesaron 20 g de suelo tamizado por malla 2 mm y se colocan en frascos de 200 mL, se ajustó la humedad al 50% de su capacidad de campo, se consideraron dos controles (frascos sin muestra de suelo). Los frascos con suelo y los controles se colocaron en un desecador de vacío, en el cual se agregó un papel húmedo (sanita) en su parte inferior y un vaso de precipitado con Na_2CO_3 .

Enseguida se colocó un vaso de precipitado de 50 mL con 25 mL de CHCl_3 libre de etanol con perlas de ebullición. El desecador se conectó a una bomba de vacío para que el CHCl_3 lograra ebullicir de forma vigorosa por 2 min, tras lo cual se cerró la llave del desecador y se dejó incubar a 25 °C durante 24 h en la oscuridad. A la par, se prepararon de igual manera las muestras no fumigadas y los controles, con la única diferencia de no colocar CHCl_3 en el desecador. Tras la incubación, las muestras fumigadas se depositaron en desecadores secos y limpios y se eliminó el CHCl_3 aplicando vacío hasta la desaparición del olor a CHCl_3 (unas 5 a 6 veces por 2 min).

Tras la eliminación del CHCl_3 , las muestras fumigadas se inocularon con 1 g de suelo no fumigado. Todos los vasos de precipitado con las muestras de suelo fumigadas y no fumigadas se depositaron al mismo tiempo en frascos de vidrio de 250 mL, los cuales estaban herméticamente cerrados y contenían 10 mL de agua en el fondo y un frasco con 20 mL de NaOH 1 M para atrapar el CO_2 liberado, después se incubaron a 25 °C por 10 días, además se incubaron blancos sin suelo, al final del periodo de incubación se determinó el N de la biomasa microbiana (N-BM) muerta durante la fumigación y que fue mineralizada durante 10 días.

A las muestras de suelo se les agregaron 200 mL de KCl 2 M (relación suelo:extractante 1:4 p/v) y se agitó por 30 min en un agitador mecánico. Después se filtró la suspensión con papel filtro, se recolectó el sobrenadante y se colocó en un tubo Falcón para determinar el contenido de N en sus formas de NH_4^+ y NO_3^- empleando un fotómetro HANNA®.

Para el cálculo del N de la biomasa microbiana (N-BM) se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{N-BM } (\mu\text{g N g}^{-1} \text{ suelo}) = F_N / K_N$$

Donde:

$$F_N = (\text{N muestra fumigada}) - (\text{N muestra no fumigada})$$

Siendo el N ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) de la muestra fumigada del periodo de incubación a 10 días y el N ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) de la muestra no fumigada.

$K_N = 0.57$, fracción de la biomasa muerta mineralizada NH_4^+ durante el periodo de incubación a 10 días (Jenkinson, 1988).

1.7.5 Muestreo para diversidad vegetal

El muestreo en cada ambiente se realizó por el método de cuadrantes propuesto por Mostacedo y Fredericksen (2000). De los cuadrantes trazados para el muestreo de suelo se seleccionaron al azar 3 de ellos y en su interior fueron trazados cuadrantes de $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$. Enseguida se llevó a cabo el conteo del estrato herbáceo para obtener la abundancia y la riqueza de cada una de las especies identificadas taxonómicamente.



Figura 4. Distribución de los cuadrantes para el muestreo de vegetación.

1.7.6 Determinación de los índices de diversidad vegetal

Los índices de diversidad se determinaron en cada uno de los sitios, el índice de diversidad alfa se utilizó para evaluar la diversidad de especies, dentro de esta diversidad se calculó el índice de Shannon-Weaver (H'), el cual expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies obtenidas en la muestra. El índice de Simpson varía inversamente con la heterogeneidad y para obtener la diversidad beta se calculó el índice de Sorensen, el cual se basa en la presencia y ausencia de las especies de las comunidades comparadas. Además, se realizó un dendrograma en el programa past para representar la jerarquía de categorías según el grado de similitud y características compartidas entre especies por cambio de uso de suelo y una curva de acumulación de especies por medio del programa Estimate s (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de diversidad determinados en cada sitio de acuerdo con Moreno (2001).

Tipo de diversidad	Índice	Fórmula
Alfa	Shannon-Wiener	$H' = -\sum p_i \ln p_i$
	Simpson	$\lambda = \sum p_i^2$
Beta	Similitud de Sørensen	$I_s = \frac{2c}{a + b}$

1.7.7 Diseño experimental y modelo estadístico

Los datos de suelo fueron analizados bajo un diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial 3 x 2 con 9 repeticiones, donde el factor A corresponde a los usos de suelo (bosque, agrícola y suelo con saneamiento) y el factor B es la profundidad a la que fue tomada la muestra de suelo (0-10 y 10-20 cm).

El modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Resultado de la actividad microbiana tomando en cuenta los factores de sitio, profundidad.

μ = es el efecto de la media

α_i = efecto de la media por el nivel i del factor A

β_j = efecto de la media por el nivel j del factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$ =efecto de la media causado por la interacción del nivel i del factor A y del nivel j del factor B

ε_{ijk} = es el error experimental asociado al efecto de cada factor

Se verificaron los supuestos de normalidad por la prueba de Shapiro-Wills a los datos de cada variable, para después ser sometidos a un análisis de varianza y a una prueba *post hoc* de intervalos múltiples de Tukey ($p < 0.05$). Se realizó una

correlación Pearson ($p < 0.05$) entre las propiedades del suelo y los índices de diversidad de la vegetación. También se efectuó un análisis de componentes principales (ACP) para determinar el grado de influencia de las variables determinadas en cada suelo por sitio, todo lo anterior con el Software estadístico InfoStat versión libre 2019.

II. RESULTADOS

2.1 Propiedades del suelo

El análisis de varianza muestra que el factor uso de suelo es significativamente diferente ($p < 0.05$) para la mayoría de las variables, excepto para la concentración de nitrato, fósforo y el N-BM. Para el factor profundidad se tuvieron diferencias significativas en porosidad, densidad aparente, arena, arcilla y respiración microbiana determinada por el C-CO₂. La interacción de los factores fue significativa para la partícula arena, arcilla y el C-CO₂ (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza de los diferentes parámetros evaluados en los suelos.

Parámetro	Significancia (valor $p \leq 0.05$)		
	Uso de suelo	Profundidad	Uso de suelo x profundidad
Porosidad (%)	0.0001	0.0121	0.2220
DA (g cm ⁻³)	0.0001	0.0120	0.2398
Arena (%)	0.0001	0.0240	0.0001
Limo (%)	0.0001	0.9622	0.9611
Arcilla (%)	0.0001	0.0033	0.0001
Materia orgánica (%)	0.0001	0.3964	0.7151
C orgánico (%)	0.0001	0.3957	0.7148
pH	0.0104	0.9533	0.8874
Nitrato (mg kg ⁻¹)	0.0520	0.8205	0.5252
Fósforo (mg kg ⁻¹)	0.2510	0.2230	0.0785
C-CO ₂ (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	0.0001	0.0001	0.0002
C-BM (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	0.0340	0.6192	0.5509
N-BM (μg g ⁻¹)	0.2905	0.3071	0.0985

DA = Densidad aparente, C-CO₂ = Respiración microbiana, C-BM = Carbono de la biomasa microbiana, N-BM = Nitrógeno de la biomasa microbiana.

En cuanto a las propiedades físicas el suelo con saneamiento en la profundidad de 0-10 cm presentó el mayor porcentaje de porosidad y fue significativa ($p < 0.05$), la cual de acuerdo con Ortiz-Solorio (2019) es excesiva, así mismo, a una profundidad de 10-20 cm, valor que se refleja en el de densidad aparente, menor a 1 g cm⁻³ con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) para suelos de origen volcánico. No así en el suelo agrícola, el cual tuvo un valor significativamente mayor

($p < 0.05$) al que establece la normatividad mexicana, en las dos profundidades. El porcentaje de la partícula arena es predominante y fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el suelo agrícola y en el suelo de bosque a las dos profundidades, de la misma manera el porcentaje de limo en el suelo con saneamiento fue significativo ($p < 0.05$), respecto a la profundidad. Finalmente, el porcentaje de la partícula de arcilla es significativamente mayor ($p < 0.05$) a una profundidad de 0-10 cm (Tabla 6).

Tabla 6. Propiedades físicas de los diferentes tipos de suelo dentro del Parque Nacional La Malinche.

Uso de suelo	Profundidad (cm)	Porosidad (%)	Densidad aparente (g cm^{-3})	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Bosque	0-10	66.50 ab	0.99 ab	91.62 a	7.28 b	1.10 b
Agrícola		54.83 c	1.20 a	93.11 a	3.75 c	3.14 b
Saneamiento		71.22 a	0.89 b	81.08 c	11.53 a	7.39 a
Bosque	10-20	62.74 b	0.89 b	90.57 a	7.22 b	2.21 b
Agrícola		54.65 c*	1.20 a	92.87 a	3.87 c	2.99 b
Saneamiento		66.56 ab	0.76 c	86.34 b	11.42 a	2.37 b

Promedio de las 18 repeticiones. Letras iguales no hay diferencias estadísticamente significativas por columnas ($p > 0.05$).

De las propiedades químicas (Tabla 7), valores significativos ($p < 0.05$) se observan en el contenido de materia orgánica y carbono orgánico en el suelo con saneamiento en las dos profundidades, con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) se clasifican como altos. Bajo esta misma norma el pH fue moderadamente ácido y sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los usos de suelo, así mismo, sin diferencias ($p > 0.05$) para fósforo y nitrato, sin embargo de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 el valor del fósforo en las dos profundidades y en los diferentes usos de suelo fue alto ($> 30 \text{ mg kg}^{-1}$), con respecto a la concentración del ión nitrato, éste se clasifica como alto ($21\text{-}40 \text{ mg kg}^{-1}$), según Vázquez (1997).

Tabla 7. Propiedades químicas de los diferentes suelos.

Uso de suelo	Profundidad (cm)	Materia orgánica (%)	Carbono orgánico (%)	pH	Nitrato (mg kg ⁻¹)	Fósforo (mg kg ⁻¹)
Bosque	0-10	3.01 b	5.20 b	5.34 a	45.10 a	45.88 a
Agrícola		2.18 b	3.76 b	5.11 a	49.06 a	30.58 a
Saneamiento		11.65 a	20.09 a	5.01 a	81.40 a	66.30 a
Bosque	10-20	2.60 b	4.48 b	5.35 a	48.84 a	39.26 a
Agrícola		1.98 b	3.41 b	5.04 a	55.66 a	80.08 a
Saneamiento		9.40 a	16.20 a	5.05 a	64.90 a	64.13 a

*Promedio de 18 repeticiones. Letras iguales no hay diferencias estadísticamente significativas por columnas ($p>0.05$).

De los parámetros biológicos evaluados el desprendimiento de CO₂ fue significativamente mayor ($p<0.05$) en el suelo con saneamiento a la profundidad de 0-10 cm, valor por encima del que se tuvo en el suelo agrícola (Tabla 8) en las dos profundidades, que de acuerdo con Hinojosa et al. (2021) un valor > 71.68 kg C-CO₂ ha⁻¹ d⁻¹ indica que la actividad microbiana del suelo es alta. En cuanto al C-BM y N-BM no se obtuvieron diferencias significativas ($p<0.05$) por el uso de suelo a las dos profundidades.

Tabla 8. Parámetros biológicos en los diferentes suelos.

Uso de suelo	Profundidad (cm)	C-CO ₂ (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	C-BM (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	N-BM (μg g ⁻¹)
Bosque	0-10	195.28 ab	5.43 a*	4.85 a
Agrícola		35.28 d	6.31 a	8.01 a
Saneamiento		231.78 a	9.83 a	6.63 a
Bosque	10-20	165.39 b	5.28 a	3.93 a
Agrícola		29.62 d	5.87 a	3.44 a
Saneamiento		138.19 c	7.63 a	6.41 a

*Promedio de las 18 repeticiones. Letras iguales no hay diferencias estadísticamente significativas por columnas ($p>0.05$).

2.2 Índices de diversidad

En el suelo de bosque se encontró una abundancia mayor abundancia de especies pertenecientes a la familia de las Oxalidaceae (Tabla 9), siendo altamente representativa de este sitio. En el suelo agrícola las familias que están mejor representadas fueron Rubiaceae, seguido de Poaceae y Asteraceae con 162, 84 y 79 respectivamente. En el caso del suelo con saneamiento el porcentaje de abundancia de familias fue menor, se encontraron plantas de las familias Rubiaceae, Poaceae y Fabaceae. En los diferentes suelos se encontraron otras familias en una menor abundancia.

Tabla 9. Porcentaje de abundancia de especies por familias por uso de suelo.

Familia	Uso de suelo		
	Bosque	Agrícola	Saneamiento
Rubiaceae	1	46.29	37.01
Asteraceae	2.3	22.57	6.91
Commelinaceae	6.78	0	0.99
Poaceae	0.65	22.29	32.07
Fabaceae	3.89	0	19.57
Oxalidaceae	76.53	0	0
Brassicaceae	0	5.71	1.64
Geraniaceae	4.36	0	0
Otros	4.49	3.14	1.81

En la tabla 10 se reportan índices de diversidad alfa que muestran la existencia de un mayor número de individuos en el suelo de bosque, se encontraron 30 diferentes especies, cercano el número de especies en el suelo con saneamiento, pero una disminución importante en el suelo agrícola. Los valores del índice de Shannon de acuerdo con Margalef (1972) varía de 1-5, por lo que, en los tres sitios se tiene una diversidad baja, por otro lado, respecto al índice de Simpson fue ligeramente superior en el suelo con saneamiento, seguido del suelo agrícola y bosque, este índice conocido también como de dominancia representa la probabilidad de que dos individuos escogidos al azar pertenezcan a la misma especie y su valor va de 0 a 1,

por lo que con base a este valor en el suelo de saneamiento se muestra una mayor diversidad vegetal (Moreno 2001).

Tabla 10. Índices de vegetación por uso de suelo.

Especie	Diversidad alfa		
	Bosque	Agrícola	Saneamiento
<i>Bouvardia ternifolia</i>	17		26
<i>Eupatorium grabratum</i>	19	2	
<i>Buddleja parviflora</i>	7		
<i>Commelina erecta</i>	115		6
<i>Ageratum corymbosum</i>	1		
<i>Festuca arundinacea</i>	1		
<i>Stipa ichu</i>	1		
<i>Macroptilium gibbosifolium</i>	1		
<i>Lupinus elegans</i>	65		
<i>Oxalis corniculata</i>	1298		
<i>Muhlenbergia macroura</i>	5	5	9
<i>Alchemilla procumbens</i>	8		
<i>Drymaria cuspidata</i>	8		
<i>Prunus serotina</i>	2		
<i>Dryopteris</i> sp.	1		
<i>Castilleja arvensis</i>	26		
<i>Penstemon barbatus</i>	5		3
<i>Geranium seemannii</i>	74		
<i>Gnaphalium semiamplexicaule</i>	7		9
<i>Conyza filaginoides</i>	2		6
<i>Tagetes lucida</i>	3		
<i>Piptochaetium virescens</i>	1		165
<i>Solanum americanum</i>	1		

<i>Solanum verrucosum</i>	8	3	
<i>Senecio</i> sp.	1	10	2
<i>Malaxis</i> sp.	8		
<i>Bromus secalinus</i>	3		17
<i>Stevia tephra</i>	1		10
<i>Gnaphalium oxyphyllum</i>	5		
<i>Phytolacca icosandra</i>	2		
<i>Bidens odorata</i>		63	5
<i>Cerastium nutans</i>		2	
<i>Richardia tricocca</i>		162	57
<i>Zea mays</i>		68	
<i>Brachypodium mexicanum</i>		10	
<i>Raphanus raphanistrum</i>		17	
<i>Tithonia tubaeformis</i>		4	3
<i>Brassica campestris</i>		3	
<i>Poa annua</i>		1	
<i>Desmodium uncinulatum</i>			117
<i>Quercus candicans</i>			1
<i>Quercus glabrescens</i>			1
<i>Arbutus xalapensis</i>			1
<i>Sonchus oleraceus</i>			2
<i>Allium</i> sp.			2
<i>Cirsium ehrenbergii</i>			1
<i>Sisyrinchium</i> sp.			1
<i>Haplopappus venetus</i>			4
<i>Borreria laevis</i>			142
<i>Capsella bursa-pastoris</i>			10
<i>Helianthemum glomeratum</i>			3

<i>Cheilanthes bonariensis</i>			1
<i>Cosmos bipinnatus</i>			4
Total individuos	1696	350	608
Total especies	30	13	28
Indice de shannon	1.093	1.603	2.122
Indice de Simpson	0.4057	0.7111	0.8219

En cuanto al índice de Sorensen en los suelos de bosque/saneamiento se tuvo la mayor similitud de especies, seguido de los suelos agrícola/saneamiento y de los suelos de bosque/agrícola (Tabla 11).

Tabla 11. Porcentaje de similitud de especies en los suelos por el cambio de uso.

Uso de suelo	Índice de Sorensen
Bosque/Saneamiento	42.11%
Agrícola/Saneamiento	30.00%
Bosque/Agrícola	23.26%

Al calcular el dendograma se tuvo que la similitud entre especies por uso de suelo se observa en el suelo agrícola (A5A2 y A6A3) con un porcentaje del 21%. En el suelo de saneamiento se presentó un 17% y en el suelo de bosque un 13% de similitud (Figura 5).

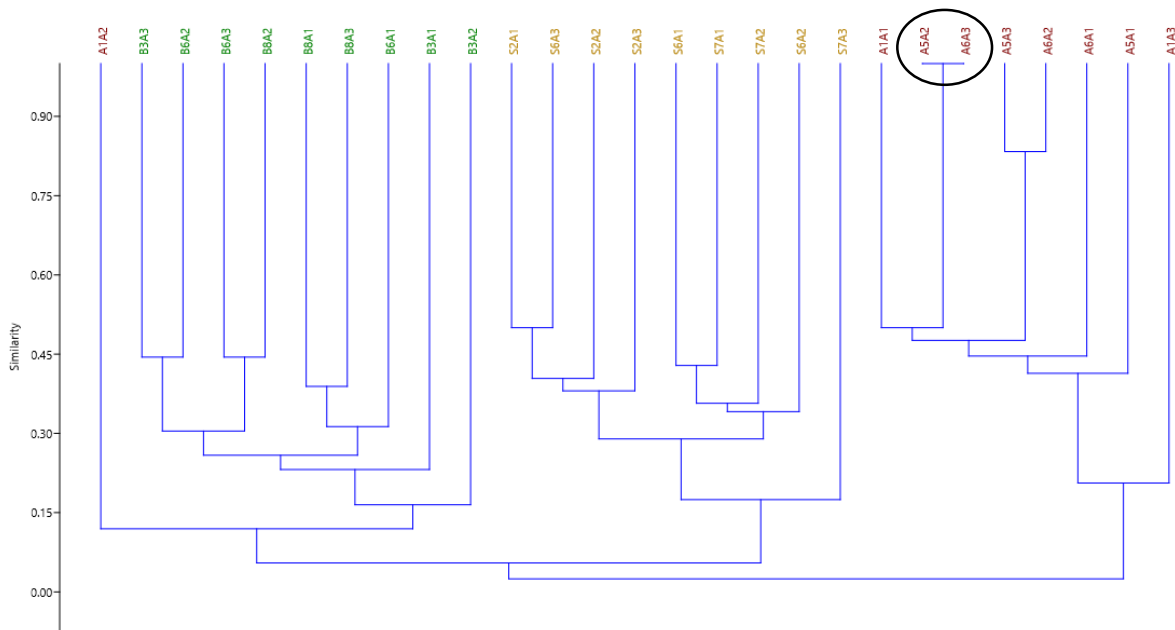


Figura 5. Dendrograma de la similitud de especies por uso de suelo.

En la figura 6 y se observan los esfuerzos de muestreo que se realizaron en cada uno de los sitios, en cuanto mayor es el esfuerzo de muestreo se tiene un número alto de especies colectadas. Al comienzo del muestreo se obtuvieron las especies más comunes de cada sitio y con el aumento del número de colectas se encontraban nuevas especies, las cuales se fueron incorporando al listado, se encontraron especies provenientes de otros sitios.

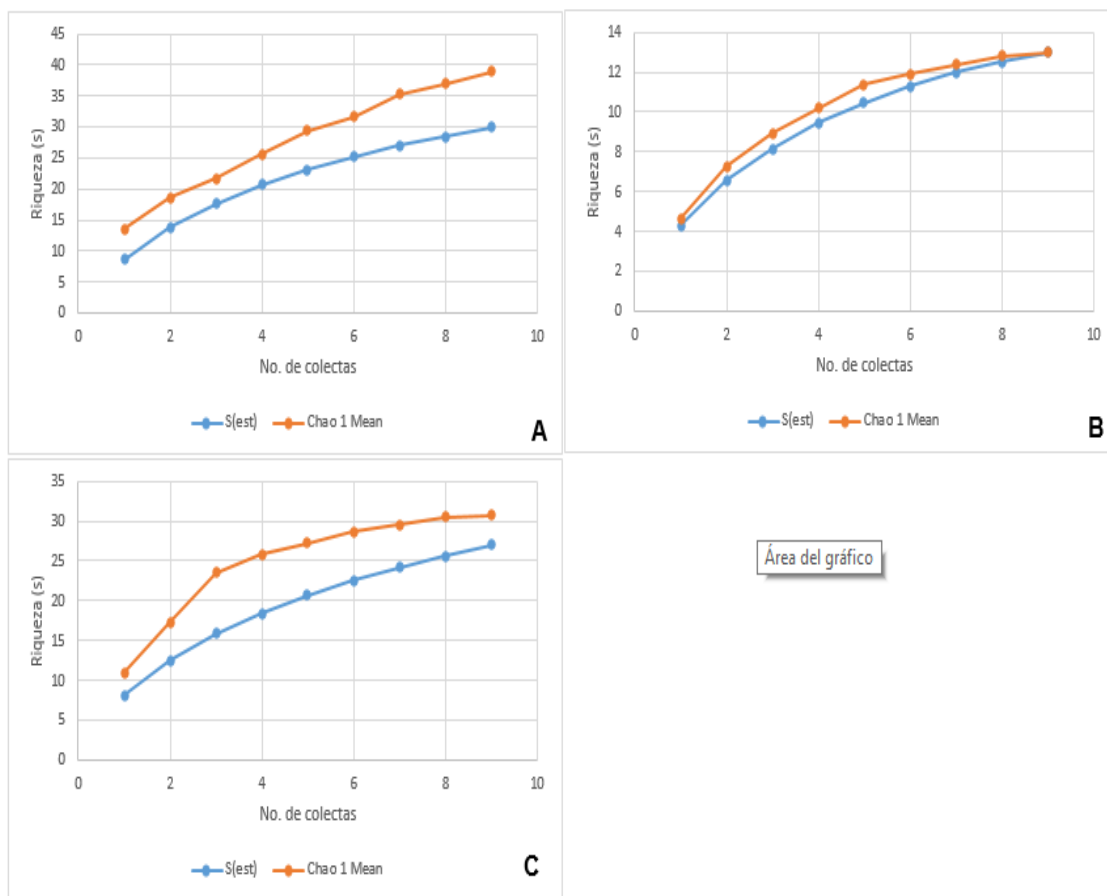


Figura 6. Curvas de acumulación de especies (esfuerzo de muestreo) del sitio A) bosque B) agrícola y C) saneamiento.

Con los valores obtenidos en las curvas de acumulación de especies se obtuvo un 100% en la eficiencia del muestreo para el suelo agrícola, lo que indica que se cuantificaron todas las especies presentes en este sitio, seguido del suelo con saneamiento en un 88% y finalmente en un 77% para el suelo de bosque. Respecto a las líneas Singleton s y Doubletons dentro de la curva de acumulación de especies por sitio, no parecen mostrar una tendencia a la baja, lo que indica que aún faltan especies por contabilizar e identificar para incluirse en la lista del inventario de especies por sitio.

2.3. Relación entre los parámetros del suelo y los índices de diversidad de la vegetación

El análisis de correlación de las diecisiete variables evaluadas (Tabla 12), mostró 35 correlaciones significativas, el contenido de materia orgánica con el carbono orgánico ($r=1.00$) y el C-BM. El carbono orgánico se correlaciona positivamente y significativa con el C-BM, el contenido de nitrato la partícula de limo y los índices de Simpson y Shannon, significa que el carbono en el suelo es esencial para que se lleve a cabo la actividad biológica.

De las propiedades físicas, la densidad aparente correlaciona con la porosidad de manera positiva y significativa ($r=1.00$) y negativa con el C-CO₂, lo que indica que al incrementarse la densidad aparente se verá disminuida la cantidad de CO₂ en el suelo, por una disminución del espacio poroso.

Por otro lado, el C-BM correlacionó positiva y significativamente ($r=1.00$) con la concentración de nitrato y el N-BM con la del fósforo ($r=1.00$), esto señala que los nutrimentos son indispensables para la actividad microbiana en el suelo y al mismo tiempo para las plantas, lo que se observa con las correlaciones positivas y significativas entre el carbono orgánico, nitrato y C-BM con los índices de Simpson y Shannon.

Tabla 12. Análisis de correlación de Pearson para las propiedades de los suelos y los índices de diversidad.

	M.O	C.O	C-CO ₂	D.A	Pors	pH	C-BM	N-BM	NO ₃ ⁻	Arena	Limo	Arc.	P	λ	H'	T °C	H %
M.O	1.00																
C.O	1.00*	1.00															
C-CO ₂	0.60	0.60	1.00														
D.A	-0.78	-0.78	-0.96*	1.00													
Pors	0.78	0.78	0.96*	-1.00*	1.00												
pH	-0.55	-0.55	0.29	-0.07	0.06	1.00											
C-BM	0.93*	0.93*	0.42	-0.58	0.59	-0.73	1.00										
N-BM	0.39	0.39	-0.01	-0.11	0.11	-0.64	0.52	1.00									
NO ₃ ⁻	0.92*	0.92*	0.42	-0.57	0.58	-0.72	1.00*	0.57	1.00								
Arena	-0.97*	-0.97*	-0.70	0.82*	-0.83*	0.44	-0.93*	-0.35	-0.93*	1.00							
Limo	0.91*	0.91*	0.79	-0.92*	0.92*	-0.20	0.72	0.24	0.72	-0.90*	1.00						
Arc.	0.68	0.68	0.30	-0.36	0.36	-0.64	0.88*	0.34	0.87*	-0.76	0.41	1.00					
P	0.41	0.41	0.02	-0.13	0.14	-0.62	0.53	1.00*	0.58	-0.37	0.27	0.35	1.00				
λ	0.93*	0.93*	0.27	-0.51	0.51	-0.79	0.91*	0.50	0.91*	-0.84*	0.75	0.65	0.51	1.00			
H'	0.98*	0.98*	0.57	-0.77	0.77	-0.51	0.86*	0.39	0.86*	-0.93*	0.94*	0.56	0.41	0.93*	1.00		
T °C	0.11	0.11	-0.58	0.41	-0.41	-0.73	0.28	0.06	0.23	0.02	-0.26	0.36	0.02	0.37	0.05	1.00	
H %	0.39	0.39	0.69	-0.69	0.69	0.40	0.13	-0.61	0.08	-0.41	0.57	0.03	-0.60	0.14	0.40	-0.22	1.00

*p≤0.05. Coeficiente de correlación de Pearson, significativo. M.O:Materia orgánica, C.O:Carbono orgánico, C-CO₂:Respiración del suelo, D.A:Densidad aparente, Pors:Porosidad, C-BM:Carbono de la biomasa microbiana, N-BM:Nitrógeno de la biomasa microbiana, NO₃⁻:Nitrato, Arc.:Arcilla, P:Fósforo, H':Índice de Shannon, λ:Índice de Simpson, T°C:Temperatura, H:Humedad.

Las diferentes variables del suelo y de diversidad vegetal se agruparon en dos componentes principales, lo que en conjunto explican el 85% de la varianza, esto señala una reducción significativa del comportamiento de las variables originales (Tabla 13). El primer componente (10.31) explicó el 61% de la varianza y fue conformado por la materia orgánica, carbono orgánico, la partícula de arena y el índice de Simpson; la parte orgánica se asocia directamente con la diversidad vegetal. El segundo componente (4.18) explicó el 25% de la varianza y está representado por el pH, humedad y temperatura, factores importantes que intervienen en el crecimiento de los microorganismos.

Tabla 13. Proporción de la variación explicada para cada componente principal de los parámetros evaluados.

Componente	Valor	% Varianza	% Varianza acumulada
1	10.31	0.61	0.61
2	4.18	0.25	0.85

Autovectores		
Parámetro	CP1	CP2
Materia orgánica	0.31	0.001
Carbono orgánico	0.31	0.0099
C-CO ₂	0.20	0.3
Densidad aparente	-0.25	-0.28
Porosidad	0.25	0.28
pH	-0.16	0.40
C-BM	0.29	-0.13
N-BM	0.14	-0.31
Nitrato	0.29	-0.14
Arena	-0.31	-0.04
Limo	0.28	0.17
Arcilla	0.22	-0.16
Fósforo	0.15	-0.30
Índice de Shannon	0.28	-0.15
Índice de Simpson	0.30	0.02
Temperatura	0.01	-0.33
Humedad	0.11	0.40

Los parámetros del suelo y la diversidad vegetal tuvieron un efecto en cuanto al uso de suelo, se denotan diferencia entre ellos (Figura 8). El suelo con saneamiento a la profundidad de 10-20 cm, la materia orgánica, carbono orgánico, el C-BM, la concentración de nitrato, el índice de Simpson y de Shannon tuvieron un mayor efecto y en el caso de la materia orgánica, carbono orgánico y el índice de Simpson fueron variables dentro del primer componente principal (CP1). El suelo agrícola a una profundidad de 0-10 cm muestra una afectación principal en las partículas de arena, también dentro del CP1, un mayor contenido de esta fracción en los suelos indica una menor cantidad de materia orgánica en los suelos; mientras que, a una profundidad de 10-20 cm la densidad aparente indica que existe una compactación (Tabla 6), lo que afecta la actividad microbiana del suelo. En cuanto al suelo de bosque a una profundidad de 0-10 cm el efecto se denota con el pH, parámetro dentro del CP2. El pH en este suelo fue moderadamente ácido, factor importante en el crecimiento de los microorganismos y se vea reflejado en la producción del C-CO₂, además del C-BM y N-BM.

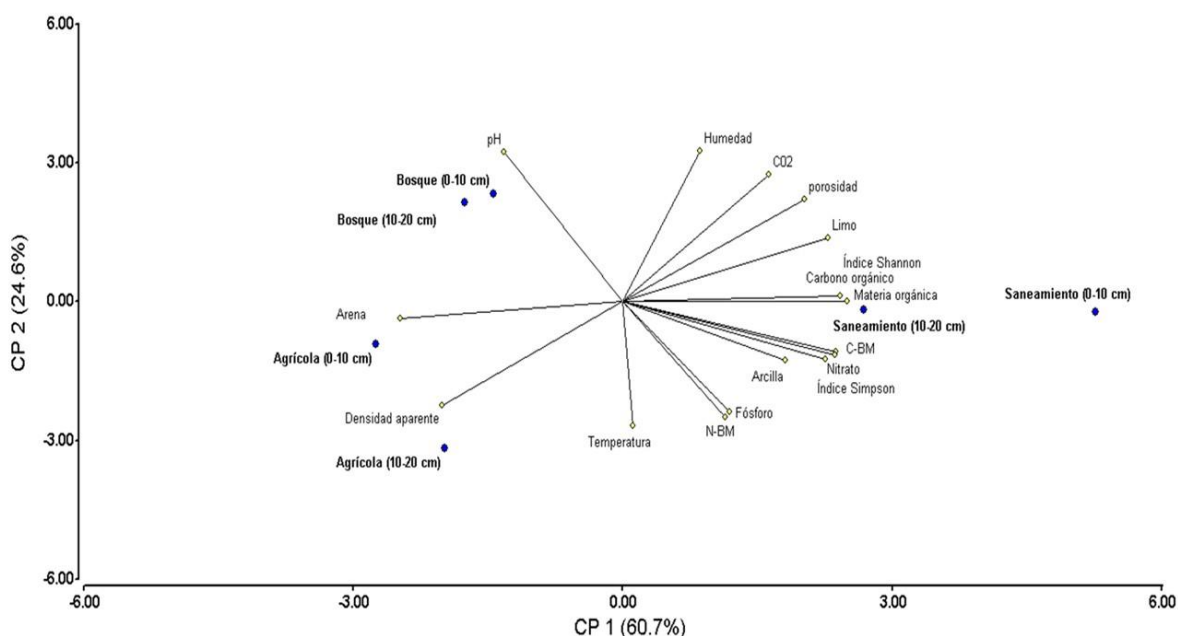


Figura 7. Gráfico biplot de las propiedades edáficas y diversidad vegetal en los suelos por cambio de uso.

III. DISCUSIÓN

Los diferentes parámetros edáficos evaluados permitieron identificar indicadores de su calidad por el cambio de uso, en el caso de los suelos en sitios dentro del Parque Nacional La Malinche, éstos presentaron un mayor porcentaje de porosidad, lo que favorece una mayor diversidad de especies arbustivas, herbáceas y arbóreas, las cuales incrementan la cantidad de macroporos, y promueven un buen drenaje y aireación (Noguera y Vélez, 2011). *Ordoñez et al.*, (2008) reporta que, con el cambio de uso del suelo, de bosque a suelo agrícola, el porcentaje de porosidad disminuirá hasta un 30%, debido a la disminución de los aportes de materia orgánica al suelo, lo que se pudo observar en el suelo agrícola analizado (Tabla 6).

Respecto a la densidad aparente, en el suelo agrícola se tuvo un valor de 1.20 g cm^{-3} en las dos profundidades, y mayor al 1 g cm^{-3} que señala la NOM-021-SEMARNAT, (2000) para suelos de origen volcánico, lo que indica una compactación, dado por el manejo que se le ha dado a este sitio durante más de 40 años (dato proporcionado por el propietario del predio). Debido a la introducción de maquinaria, lo que ha permitido que las partículas del suelo sean reorganizadas y exista una disminución del espacio poroso, lo que limita el intercambio gaseoso e hídrico (Cueto et al., 2009). Esta situación no se refleja en el suelo con saneamiento y en el suelo de bosque, en donde el contenido de materia orgánica ocasiona que el valor de la densidad aparente disminuya (Tabla 6).

El análisis textural realizado a los suelos indicó un predominio de la fracción arena, lo que coincide con lo reportado por Romero-Barrios *et al.* (2015), quienes realizaron una caracterización edáfica de suelos del Parque Nacional Malinche y reportan un porcentaje de arena ligeramente mayor a 1.4 g cm^{-3} . Se observó que en el suelo con saneamiento la fracción arena disminuyó en las dos profundidades, al respecto, Úbeda (2001) menciona que los cambios en la textura del suelo son consecuencia de un incremento en la temperatura, dado por un incendio, lo que provoca la calcinación de los aluminosilicatos.

En cuanto a las propiedades químicas, el contenido de materia orgánica y carbono orgánico fue mayor en el suelo con saneamiento en las dos profundidades (Tabla 6). Se reporta que posterior a un incendio, aun controlado, altera el ciclo biológico de los nutrientes produciéndose una pérdida total o parcial de la materia orgánica, se produce una acumulación de cenizas que contienen nutrientes en forma de sulfatos, óxidos o carbonatos, producto de la combustión del material vegetal (González, 1997). Por otro lado, en el suelo agrícola se presentó un valor muy bajo, esta pérdida de la materia orgánica se relaciona con el cambio de uso de suelo, el manejo proporcionado y la remoción de los residuos vegetales da lugar a una disminución en la cantidad de materia orgánica (Cruz-Ruiz et al., 2012) y diversidad vegetal, lo que ocasiona que este tipo de suelo sea vulnerable a la erosión hídrica (Toledo et al., 2018).

El pH en todos los suelos y a las dos profundidades fue moderadamente ácido (Tabla 6), este valor del pH es adecuado, ya que se trata de suelos forestales. La acidez en los suelos se encuentra influenciado por la aportación de la vegetación a los suelos, así como también a la mineralización de la materia orgánica. Esta condición de acidez se atribuye en primer lugar a la presencia de aluminio en los suelos de tipo forestal y en segundo lugar a la presencia de las acículas de *Pinus* sp., cuando este tipo de vegetación es predominante, ya que son potencialmente acidificantes por la producción de ácidos orgánicos y H_2CO_3 , lo que influye en la formación de complejos Al-humus (Urrego, 1997). Martínez et al. (2002) y Vela et al. (2007) reportaron un pH de ácido a moderadamente ácido en suelos de La Malinche, lo que coincide con los resultados obtenidos en este trabajo. Lilienfein et al. (2000) mencionan que las coníferas incrementan la acidez del suelo y asociado con esto, se alteran procesos edáficos, al aumentar la hidrólisis ácida, la lixiviación de cationes básicos y la actividad fúngica, lo que permite la degradación de la materia orgánica.

Las concentraciones de nitrato y fósforo fueron altas (Tabla 6) en las dos profundidades de los suelos analizados. En los suelos forestales se tiene a la hojarasca como la principal fuente de nutrientes, los cuales varían debido a la

calidad de los materiales aportados por diferentes especies vegetales (Effron et al., 2011). Zalba y Peinemann (1987) mencionan que la concentración de fósforo es mayor bajo vegetación arbórea, probablemente debido a la mayor acidez y elevados aportes de residuos orgánicos, condiciones que favorecen la mayor actividad microbológica, específicamente la fúngica, responsable de la solubilización del fósforo inorgánico y en parte también de la mineralización del fósforo orgánico. La concentración de nitrato, la partícula de limo y con los índices de Simpson y Shannon se asociaron significativa y positivamente, esto quiere decir que con un incremento de la materia orgánica se tendrá una mayor concentración de nitrógeno en forma de nitratos, el cual es un producto de la degradación de los residuos orgánicos.

Dentro de los parámetros biológicos evaluados (Tabla 8) la producción de C-CO₂ presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sitios, el sitio con saneamiento tuvo el valor más alto de 0-10 cm (231.78 kg ha⁻¹ d⁻¹), Hinostroza et al., (2021) realizó una clasificación de los suelos con base a su actividad microbiana y suelos con valores > 78.61 kg ha⁻¹ d⁻¹, indica que presentan una actividad inusualmente alta, debido a un elevado nivel de actividad microbiana y con altas concentraciones de materia orgánica disponible, posiblemente a través del agregado de grandes cantidades de residuos orgánicos y abonos, pero en este caso en particular, este valor se puede deber al incendio. En muchos casos este incremento se ha asociado a la solubilización de compuestos orgánicos dados por el calor (Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Marín y Rojas (2022) señalan que los parámetros microbiológicos se están tratando de emplear como indicadores sensibles de perturbaciones sobre el suelo. En el caso del suelo agrícola, su actividad microbiana fue mucho menor (35.28 kg ha⁻¹ d⁻¹) que el suelo de bosque y saneamiento, con base a Hinostroza et al. (2021) el valor de la actividad microbiana en este suelo es considerada como mediana (17.92 – 35.84 kg ha⁻¹ d⁻¹), lo que indica que el suelo se está alejando de un estado ideal de actividad biológica.

En cuanto al C-BM y N-BM, si bien no se tuvieron diferencias significativas en cuanto al tipo de suelo y profundidad, de 0-10 cm se tuvieron valores ligeramente

superiores que de 10-20 cm y el suelo con saneamiento fue el que presentó la mayor cantidad (Tabla 8). Cruz y López (2015) evaluaron el C-BM en suelos colectados de una toposecuencia del oeste del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, México, entre los 2 650 y 3 750 m.s.n.m. En el suelo influenciado por *Pinus* spp se obtuvo un valor de 0.259 mg ha⁻¹ a una altitud entre 2 650 - 2 800 msnm; mientras que, a 2 800 – 3 000 msnm fue de 0.193 mg ha⁻¹. En suelo bajo la influencia de *Pinus caribaea* de 3 y 29 años se encontró un mayor contenido de C-BM de 250.7 - 272.9 mg kg⁻¹ (Gómez et al., 2008) siendo un valor superior a lo encontrado en los suelos bajo estudio. Cruz-Ruiz et al., (2012) reportaron que el cambio de uso de suelo de bosque a cultivo disminuye la biomasa microbiana, la proporción del C-BM y N-BM en los suelos de cultivo fue menor en más del 55% en comparación con los suelos de bosque, lo que difiere en este estudio, en el suelo agrícola de 0-10 cm se tuvo un incremento del 14% con respecto al suelo de bosque.

La diversidad vegetal en el suelo de bosque se encontró como familia con mayor abundancia de especies a Oxalidaceae (76.53%) (Tabla 9), el suelo agrícola fueron Rubiaceae, Asteraceae y Poaceae y el suelo con saneamiento también fue Rubiaceae, Poaceae y Fabaceae. De la familia Rubiaceae, *Richardia tricocca* y de Asteraceae, *Bidens odorata* son plantas arvenses que predominan en los sitios agrícola y con saneamiento.

En cuanto al número de individuos, el suelo de bosque tuvo un mayor abundancia, de especies en las familias encontradas, las especies más representativas de este sitio fueron *Oxalis corniculata*, *Commelina erecta*, *Geranium seemannii*, *Lupinus elegans*. En el suelo con saneamiento de las 7 familias, se identificaron 27 especies y las más representativas fueron *Piptochaetium virescens*, *Borreria laevis*, y *Desmodium uncinatum*. En este sitio al no existir árboles, se provocó un incremento en la radiación solar directa, lo que pudo generar condiciones óptimas para la germinación de semillas de especies arvenses (Alanís-Rodríguez et al., 2014).

En el suelo de bosque, aunque se tuvo una mayor riqueza de familias, géneros y especies, la abundancia no es muy alta, lo que está reflejado en el bajo valor del índice de Shannon y Simpson (Tabla 10). Al contrario, en el suelo con saneamiento se presentó el mayor índice de Shannon y Simpson. En este caso, el fuego es un

factor natural que ejerce una importante influencia sobre la composición vegetal. En México, son la tercera causa de pérdida de vegetación natural, solo por debajo de la tala ilegal y el cambio de uso del suelo (SEMARNAT, 2006). La riqueza de arbustivas es menor en sitios con incendios recientes con respecto a los suelos sin incendio (testigos) porque algunas especies arbustivas más delicadas son destruidas totalmente por el fuego y tardan en reinstalarse. En cuanto a las herbáceas se tuvo una mayor riqueza en los sitios recientemente quemados (1 y 2 años después del incendio) que un sitio con 9 años desde el incendio; esto debido a que, las especies de ciclo anual responden más rápidamente y tienden a ocupar aquellos claros que son producidos por el fuego (Verzino et al., 2005). Fernández-Méndez et al. (2016) encontraron que la familia Asteraceae fue la que obtuvo mayor representatividad tras un incendio forestal, las especies con mayor dominancia fueron *Hypoxis decumbens*, *Pteridium aquilinum* y *Andropogon bicornis*, especies colonizadoras y pioneras, que se han adaptado al uso del suelo.

En la diversidad beta, el suelo de bosque tiene mayor similitud de especies con el suelo que tuvo un incendio controlado (Tabla 10) por la presencia del gusano descortezador, mientras que, el suelo agrícola el porcentaje fue del 30%, pero el suelo de bosque con el suelo agrícola disminuyó. Al ser un índice indicativo de las especies en común (Moreno, 2001), se deduce que existen más especies compartidas entre el suelo de bosque y con saneamiento. Por otro lado, conforme una masa forestal se desarrolla, se comparte un número menor de especies, aunque la riqueza específica se mantiene por las diferentes intervenciones (Hernández-Salas et al., 2013).

El análisis de correlación destaca que la materia orgánica es una propiedad del suelo que tiene una influencia positiva con la producción de C-CO₂, el C-BM y N-BM (Tabla 12). La materia orgánica del suelo es un indicador clave de su calidad y determinante en la actividad biológica del suelo y está conformada por compuestos ricos en carbono, nitrógeno, fósforo, por lo que es una fuente de nutrimentos y energía para que los microorganismos lleven a cabo su desarrollo y metabolismo (Ferrera y Alarcón, 2001). Cantú Silva y Yáñez Díaz (2018) reportan que las

pérdidas de materia orgánica y nitrógeno por los cambios de uso del suelo de matorral a otro sistema de uso varía desde 2.4% hasta 66%, la materia orgánica disminuye a una profundidad de 0-5 cm, mientras que, el nitrógeno a la profundidad de 5-30 cm. El suelo agrícola es al que le corresponden las mayores pérdidas de materia orgánica y nitrógeno, en ambas profundidades, lo que coincide con lo encontrado en el suelo de uso agrícola dentro del Parque Nacional La Malinche.

El C-BM es el componente funcional del microbioma del suelo, responsable de la descomposición de la materia orgánica, así como del reciclaje de nutrientes, es el carbono del componente vivo de la materia orgánica, dado por las bacterias y hongos, principalmente. El contenido de carbono de la biomasa microbiana refleja el tamaño de la población microbiana total del suelo. Cuando existen alteraciones en el suelo puede existir un descenso de ésta, debido a que reaccionan en respuesta al manejo al cual se encuentra sometido el suelo (Pérez et al., 2020). Gómez-Jorin et al. (2012) Reportan que los niveles del C-BM y N-BM tuvieron una correlación significativa con el contenido de materia orgánica y N total ($r^2=0.97$ y $r^2=0.94$, respectivamente) en suelos ferralíticos, por lo que estos autores consideran a estas determinaciones indicadores biológicos de importancia, debido a su relación directa con la disponibilidad de nutrientes en aquellos suelos afectados por el cambio de uso.

Para las relaciones entre las propiedades edáficas y la diversidad vegetal, los índices de Shannon y Simpson mostraron una correlación positiva principalmente con la materia orgánica. Torres et al. (2010) atribuyen que en suelos con determinado pH y cantidad de materia orgánica se establecerán en mayor o menor cantidad aquellas especies vegetales tolerantes a dichas condiciones o habrá un recambio de especies y su consecuente adaptación y desarrollo. En el caso de los suelos forestales, éstos son ecosistemas con una gran variedad de organismos, así como de interacciones planta-microorganismo, las cuales impactan en la estructura y funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo van a promover modificaciones no solo en las comunidades microbianas, sino en el establecimiento de especies vegetales (Fracetto et al., 2013).

El análisis de componentes de las variables edáficas y vegetación (Figura 8) mostró que el 85.3% de la variabilidad total de los datos es explicada por los CP1 (60.7%) y CP2 (24.6%). Las variables con mayor peso fueron la materia orgánica, carbono orgánico, la partícula de arena, el índice de Simpson, pH, temperatura y humedad, lo que influye en la actividad biológica y en la diversidad de especies vegetales; en este sentido, las relaciones que existen en este estudio entre la dominancia de especies y su repercusión en la diversidad vegetal pueden estar relacionados con los cambios de uso del suelo (Díaz et al., 2003). Rosero et al. (2019), quienes a través de un ACP encontraron que, en suelos de bosque, pradera y un sistema silvopastoril, el CP1 explica que el 48.48% de la variabilidad está determinado por la capacidad de intercambio catiónico (0.97) y el calcio (0.86); en tanto que, en el CP2 (21.69%) destacaron las partículas de arena y arcilla, el pH y N total. Notaro et al. (2018) obtuvieron valores en el CP1 del 79.01% por variables como la actividad enzimática, carbono de la biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo, lo que está relacionado directamente con la materia orgánica y los procesos de humificación y mineralización. Esto se refleja en el suelo con saneamiento, en donde a una profundidad de 10-20 cm el incendio, el cual fue realizado por el efecto del ataque del descortezador, en este suelo se vio afectada la materia orgánica y por consecuencia los niveles de nitrato y fósforo, nutrimentos que permiten un crecimiento y desarrollo de especies vegetales. Quichimbo et al. (2012) reportan que un cambio de uso de suelo tiene un efecto sobre la cobertura vegetal y las propiedades químicas del suelo, encontraron que el CP1 mostró el 34.44% de la variabilidad total, altamente correlacionado con la densidad aparente y materia orgánica, el CP2 explico el 18.1% correlacionado con la saturación de bases y un tercer componente con un 12.49% con el pH, Al+H y la capacidad de intercambio catiónico.

Con los resultados obtenidos, se observó la importancia de evaluar la diversidad vegetal y la actividad microbiana en suelos que han sufrido un cambio de uso, tal es el caso del suelo agrícola, el cual se asocia a una profundidad de 0-10 cm a la partícula arena y a la profundidad de 10-20 cm a la densidad aparente, propiedad que indica una compactación importante, dado por el manejo realizado al paso de

40 años de haber sufrido un cambio de uso, no así la diversidad vegetal, la cual fue mayor que en el suelo de bosque, pero menor que el suelo con saneamiento.

IV. CONCLUSIONES

La densidad aparente en el suelo agrícola a las dos profundidades fue mayor que en suelo con saneamiento y bosque, este valor indica una degradación que se asocia a un bajo contenido de materia orgánica. En el caso del suelo con saneamiento a consecuencia del incendio se tuvo un incremento de carbono orgánico, lo que repercutió en una disminución de la densidad aparente.

La actividad microbiana determinada por el C-CO₂, C-BM y N-BM fue inferior en los primeros cm, siendo más notorio en el suelo agrícola, lo que puede conducir a un deterioro, debido a que los microorganismos son un componente importante para mantener la calidad del suelo.

El suelo de bosque, aunque presentó el mayor número de individuos, la diversidad fue menor al de los suelos agrícola y con saneamiento, esto atribuido a la abundancia de especies de la familia Oxalidaceae (76.53%)

El análisis de componentes principales permitió identificar que la materia orgánica, carbono orgánico, la proporción de arena, pH, temperatura y humedad del suelo, así como el índice de Simpson pueden ser variables utilizadas para determinar el efecto que ocasiona el cambio de uso de suelo.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., y García-Galindo, P. C. (2010). Efecto de la restauración ecológica post-incendio en la diversidad arbórea del Parque Ecológico Chipinque, México. *Madera y Bosques*, 16(4), 39-54.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Yereña-Yamallel, J. I., & Mata-Balderas, J. M. (2014). Efecto de los incendios en la estructura del sotobosque de un ecosistema templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 74-85.
- Albiach, R., Canet, R., Ribó, M., y Pomares, F. (2003). *Determinación del carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana del suelo*. En: García I., Gil S. F., Hernández F. T. y Trasar, C. C. (Eds.). Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Ediciones Mundi-Prensa, España. 268-276.
- Álvarez-Solís y Anzueto-Martínez (2004) Álvarez-Solís, J. D., Anzueto-Martínez, M. de J. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia*, 38(1), 13-22.
- Álvarez S. M. E., & Marín C. A. (2011). Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco.
- Ávila-Sánchez, P., Sánchez-González, A., Catalán-Heverástico, C., Almazán-Núñez, R. C., & Jiménez-Hernández, J. (2018). Patrones de riqueza y diversidad de especies vegetales en un gradiente altitudinal en Guerrero, México. *Polibotánica*, (45), 101-113.
- Bermúdez, F. L. (2012). La erosión entre la naturaleza y el hombre. *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*, (14), 87-106.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124.

- Cabrera-Mireles, H., Murillo-Cuevas, F. D., Villanueva-Jiménez, J., & Adame-García, J. (2019). Oribátidos, colémbolos y hormigas como indicadores de perturbación del suelo en sistemas de producción agrícola. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 231-241.
- Campos-Sánchez, E., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Navarrete-Gutiérrez, D. A., y Pérez-Farrera, M. Á. (2017). Riqueza de especies arbóreas en bosques de montaña de Chiapas: estimaciones a partir de datos de herbarios e inventarios florísticos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(4), 832-844.
- Cantú Silva, I., y Yáñez Díaz, 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), doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138
- Casermeiro, J., De Petre, A. A., Spahn, E., y Valenti, R. (2008). Efectos del desmonte sobre la vegetación y el suelo. *Forest Systems*, 10(2), 233-244.
- Condori-Castillo, G. (2012). Influencia de la fragmentación en la diversidad de la flora silvestre y en los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en Huerta Huaraya, Puno. *Ecosistemas*, 21(1-2).
- Cueto, O. G., Coronel, C. E. I., y Suárez, M. H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., Dendooven, L., y 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.
- Cruz, F. G., & López, L.A. (2015). *Variaciones de carbono de biomasa microbiana y de ácidos húmicos y fúlvicos en suelos forestales de bosques de coníferas*. En: G. Cruz., E. A. Guerra., L. Castillo., M. Arteaga., y J. Campo. (Eds.), *Re-descubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola* (pp. 133- 142).

- Delgado, R., y España, M. (2000). Evaluación de la biomasa microbiana por los métodos de fumigación-incubación y fumigación-extracción y su relación con la disponibilidad de nitrógeno en suelos de Venezuela. *Agron. Trop*, 50(4), 537-551.
- De la Rosa, D. (2005). Soil quality evaluation and monitoring based on land evaluation. *Land Degradation & Development*, 16,551–559.
- Díaz, M., Pulido, F. J., y Marañón, T. (2003). Diversidad biológica y sostenibilidad ecológica y económica de los sistemas adehesados. *Revista Ecosistemas*, 12(3).
- DOF. (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, 1-85 p. <http://dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=717582&>.
- Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
- Effron, D.N., Defrieri, R. L., Sarti, G. C., Escobar, J., y García De Salamone, I. (2011). Propiedades microbiológicas en un suelo de la patagonia argentina bajo la influencia de diferentes especies forestales. *Asociación Argentina, Ciencia del Suelo*, 29 (2), 191-197.
- FAO. (2015). Estado mundial del recurso suelo (EMRS). Resumen técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- FAO. (2016) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/a-i6030s.pdf>.
- Falcón, G. O. (2014). Dinámica de cambio en la cobertura/uso de suelo, en una región del estado de Quintana Roo, México. (Tesis de Maestría). Centro de Investigación en Geografía Ambiental.
- Fernández, R., Frasier, I., Rorig, M., Quiroga, A., y Nollemeyer, E. (2018). Evaluación de indicadores biológicos en suelos de la región semiárida pampeana central. *Ecología austral*, 28(1), 145-156.

- FERNÁNDEZ, J. A. F., & LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, J. C. (2005). PARQUE NACIONAL MALINCHE. *Coordinación General de Ecología del Gobierno del Estado de Tlaxcala, Mexico*.
- Fernández-Méndez, F., Velasco-Salcedo, V., Guerrero-Contecha, J., Galvis, M. & Viana-Neri, A. (2016). Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*, 19(2),143-160 .
- Ferrera, R., y Alarcón, A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia ergo sum*, 8(2), 175-183.
- FLORES-ARTEAGA, L. A. (2019). Servicios ecosistémicos en la región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México (Master's thesis, Universidad Autónoma del Estado de México).
- Fracetto, G.G., Azevedo, L.C., Fracetto, F.J., Andreote, F.D., Lambais, M.R., y Pfenning, L.H. (2013). Impact of amazon land use on the community of soil fungi. *Scientia Agricola*, 70, 59-67.
- Fray, P. (2010). Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible.
- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., Delgado, M. I., y Senisterra, G. E. (2015). Evaluación del servicio ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 114.
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35 (2), 125-138.
- Hernández, T., y García, C. (2003). Estimación de la respiración microbiana del suelo. *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos. Mundi-Prensa. Madrid*, 311-346.
- Gómez, Y., Paolini, J. (2011). Variación en la actividad microbiana por cambio de uso en suelos en sabanas, Llanos Orientales, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 59(1), 1-15.

- Gómez, Y., Paolini, J., Hernández, M. (2008). Sustitución de la sabana nativa con plantaciones de *Pinus caribaea* (Pinaceae) en Venezuela: efecto sobre parámetros indicadores de cambios en el carbono del suelo. *Revista Biológica Tropical*, 56 (4), 2041- 2053.
- Gómez-Jorin, Luís A., Morales-Valdes, Amalia, Dueñas-Vega, Graciela, Dantin-Martínez, Juana María, Chávez-Gonzalez, Nereida, y Torres-Leblanch, Maite. (2012). Contenido de carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana en suelos de La Habana. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1), 179-187.
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., & Lujan-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(12), 535-542.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., y Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189-200.
- Hinostroza, A., Malca, J., y Suárez, L. (2021). Dinámica de la biomasa microbiana y su relación con la respiración y el nitrógeno del suelo en tierras agrícolas en el valle del Mantaro. *Ciencia y Desarrollo*, 24(2), 35-49.
- Iglesias, M. T., & Walter, I. (2001). Dinámica de la biomasa microbiana en un área forestal incendiada del sistema central. In *Congresos Forestales*.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala. Clave geoestadística 29010. 9 p.
- Jenkinson, D. S., y Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213.

- Jenkinson, D.S. (1988) Determination of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Soil. In: Wilson, J.B., Ed., Soil biochemistry, Marcel Dekker, New York, 415-471.
- Jost, L., & González-Oreja, J. (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta zoológica lilloana*, 3-14.
- Lilienfein, J.; Wilcke, W.; Ayarza, M. A.; Vilela, L.; do Carmo-Lima, S., & Zech, W. (2000). Soil acidificación in *Pinus caribea* forest on Brazilian savanna Oxisols. *Forest Ecology & Management*, 128, 145-157.
- Margaret (1972). Regularidades en la distribución de la diversidad del fitoplancton en un área del mar Caribe.
- Marín, C., y Rojas, C. (2022). Respuestas estacionales de condiciones del suelo relacionadas al C y N en un bosque Mediterráneo Chileno afectado por un incendio tras aplicación de enmiendas orgánicas y establecimiento de plantas. *Agro Sur*, 50(1), 31–45.
- Mataix-Solera, J., y Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*, 5-40.
- Martínez-Meyer, E., Sosa-Escalante, J. E., & Álvarez, F. (2014). El estudio de la biodiversidad en México: ¿Una ruta con dirección?. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 1-9.
- Martínez C. A., Carcaño-Montiel, M.G., y López-Reyes, L. (2002). Actividad biológica en un transecto altitudinal de suelos de La Malinche, Tlaxcala. *Terra Latinoamericana*, 20 (2), 141-146.
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Volumen 1. Manuales y tesis SEA. Zaragoza, España.
- Mostacedo, B., y Fredericksen, T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). Santa Cruz, Bolivia.
- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52.
- Noguera, M. A., y Vélez, J. A. (2011). Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 40-52.

- Notaro, K. A., E. V. de Medeiros, G. P. Duda, K. A. Moreira, J. A. de Barros, U. J. dos Santos, J. R. de S. Lima and W. da S. Moraes. 2018. Enzymatic activity microbial biomass, and organic carbono of Entisols from Brazilian tropical dry forest and anual and perennial crops. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78, 68-77.
- Ochoa (2015). Comparación de dos métodos para determinar el carbono de la biomasa microbiana en suelos provenientes del Sur del Ecuador.
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V., Guerrero, G., ... & Masera, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074-2084.
- Ortiz-Solorio, C. A. (2019). Edafología. Trillas. Ciudad de México, México. ISBN: 978-607-17-3577-5.
- Paolini Gómez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 13-22.
- Pérez, B. C., Huidobro, D. J., y Álvarez, M. D. (2020). Carbono de la biomasa microbiana de los suelos como indicador de cambios en sistemas productivos locales. EEA Salta, INTA.
- Portugal O.V., & Aguilera G. L. I. 1998. Microorganismos y biodiversidad. *Terra* 16 (3), 289-292.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Re, M. (2019). *Actividad microbiana en relación a la distribución florística en un ecosistema del Monte Austral: Parque Universitario Provincia del Monte (Neuquén)* (Bachelor's thesis, Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud.).

- Rendón-Pérez, M. A., Hernández-de la Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Alcántara-Carbajal, J. L., & Reyes-Hernández, V. J. (2021). Composición, diversidad y estructura de un bosque manejado del centro de México. *Madera y Bosques*, 27(1).
- Rodríguez, F. H., y Rodríguez A. J. (2002). Métodos de análisis de suelos y plantas. Trillas. México, D. F.
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E., & Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *REIBCI*, 2(5), 63-70.
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., y Ordóñez, H. (2019). Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur*, 47(3), 15-25.
- Ruiz, M., & Paolini, J. (2004). El cultivo y el agua de riego sobre el carbono de la biomasa microbiana. *Agronomía Tropical*, 54(2), 161-178.
- Sánchez-Corona, V. (2008). Variación de las propiedades fisicoquímicas como respuesta al establecimiento de distintas actividades agropecuarias en los luvisoles de la sierra norte de Puebla. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 259-268.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2006. El medio ambiente en México 2005. <http://www.semarnat.gob.mx>
- Silva A. S. M., y Correa R. F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13-34.
- Sugg, D. (1996). *Measuring Biodiversity*. State University of New York at Geneseo. Braak, C. J.F. 1987. Ordination. 91-173 p. En: R.H.G Jongman, C.J.F. ter Braak & O.F.R van Tongeren. Data Analysis in Community and Landcape Ecology. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Pudoc, Wageningen.
- Sonco S. R. (2013). *Estudio de la diversidad alfa (α) y beta (β) en tres localidades del bosque montano en la región de Madidi, La Paz-Bolivia* (Doctoral dissertation).
- Toledo, G., Gargaglione, V., & Peri, P. (2019). Abundancia de carbono en microorganismos en suelos de estepa de Santa Cruz. Su alteración en función a la disponibilidad de humedad. *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 11(2), 70-79.

- Toledo, D. M., Arzuaga, S. A., Galantini, J. A., y Vazquez, S. (2018). Indicadores e índices biológicos de calidad de suelo en sistemas forestales. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 01-12.
- Torrez, V., Jørgensen, P. M., y Macía, M. J. (2010). La diversidad alfa y beta en relación a variables abióticas en un bosque seco. *Análisis de Dinámicas Ecológicas y de Paisajes*, 30, 217-234.
- Trujillo-González, J. M., Mahecha, J. D., y Torres-Mora, M. (2018). El recurso suelo; un análisis de las funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 31-38
- Úbeda, X. (2001). Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal. *Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo*, 8, 41-49.
- Urrego, B. (1997). La reforestación con coníferas y sus efectos sobre la acidificación, podsolización y pérdida de fertilidad de los suelos. *Informaciones agronómicas*, Cali Colombia, 6-12.
- Vanegas-Chacón, E. A., & Méndez-Paiz, B. A. (2016). Aplicación del índice de calidad de suelos en plantaciones forestales de palo blanco (*Tabebuia donnell-smithii* Rose) y Matilisguate (*Tabebuia rosea* Bertol) en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 47.
- Vázquez, A. A. (1997). *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo* (2ª ed.). Universidad Autónoma Chapingo.
- Vela C. G., Vázquez-Martínez, E., Rodríguez-Galindo, Ma. L., & Domínguez-Rubio, I. V. (2007). Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus montezumae* Lamb. en el volcán La Malinche, Tlaxcala. *Agrociencia* 41, 371-383.
- Vega-Quintero, M. E. D. L. (2018). Factores determinantes del movimiento de polinizadores entre las inflorescencias de una planta tropical.
- Verzino, Graciela, Joseau, Jacqueline, Dorado, Mónica, Gellert, Edgardo, Rodríguez Reartes, Sandra, & Nóbile, Raúl. (2005). Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, sierras de Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, 4(1-2), 25-34.

- Wolińska, A., Kuźniar, A., Zielenkiewicz, U., Banach, A., & Błaszczuk, M. (2018). Indicators of arable soils fatigue—Bacterial families and genera: A metagenomic approach. *Ecological Indicators*, 93, 490-500.
- Zagal, E., Rodríguez, N., Vidal, I., & Quezada, L. (2002). Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Agricultura Técnica*, 62(2), 297-309.
- Zalba, P., & Peinemann, N. (1987). Efecto de algunas especies forestales sobre ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo. *Ciencia del Suelo*, 5(1), 71-76.

