



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

EFFECTO DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES SOBRE EL
FUNCIONAMIENTO BIOLÓGICO DEL SUELO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA.

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA**

PRESENTA

Eileane Pierdant Gallardo

Director de tesis: Dr. Daniel Jesús Muñoz Iniestra



Los Reyes Iztacala, Tlalnepanitla de Baz, Edo. De México, 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVO	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos particulares	3
3 MARCO TEÓRICO	
3.1 Funciones del suelo	4
3.2 Procesos biológicos del suelo	4
3.3 Calidad de suelo	7
3.3.1 Indicadores de la calidad y funcionamiento edáfico	8
3.3.2 Indicadores del funcionamiento biológico del suelo	10
3.3.2.1 Materia orgánica	10
3.3.2.2 Carbono lábil	11
3.3.2.3 Biomasa del suelo	12
3.3.2.4 Nitrógeno	12
3.3.2.5 Nitrógeno mineralizable	13
3.3.2.6 Relación carbono nitrógeno C/N	13
3.3.2.7 Respiración	14
3.3.2.8 Estabilidad de agregados	14
3.3.3 Índices de calidad de suelo	15
3.4 Zonas semiáridas	16
4 ANTECEDENTES	17
5 METODOLOGÍA	22
5.1 Área de estudio	22
5.2 Material y Método	23
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
6.1 Comportamiento de las propiedades utilizadas como indicadoras en los diferentes sitios	30
6.2 Índice calidad de suelo (ICS)	41
7 CONCLUSIONES	47
8 BIBLIOGRAFÍA	48

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural producto de una continua interacción del tiempo y factores ambientales. Es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida en el planeta ya que presta diversos servicios esenciales para la vida, en él se alberga una enorme biodiversidad la cual realiza importantes funciones (Porta *et al.*, 2019 Arias *et al.*, 2018). La biota del suelo está constituida principalmente por organismos y microorganismos, incluidas las bacterias, algas, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Ginebra *et al.*, 2015) estos a su vez desempeñan un papel importante debido a que sus interacciones son fundamentales para muchos procesos y funciones de los ecosistemas terrestres, ya que permiten la liberación de nutrientes para las plantas (Schloter *et al.*, 2003) además de mejorar la disponibilidad de agua y aire, ayudan a incrementar la fertilidad del suelo, también regulan la movilización y biorremediación de contaminantes. En conjunto estos procesos y funciones que el suelo realiza se relacionan de forma dinámica con los servicios de los ecosistemas que son esenciales para los seres humanos (Pulleman *et al.*, 2012).

Los suelos desempeñan diversas funciones que son el resultado de diversos procesos que ocurren dentro de él, estas funciones dependen de propiedades y componentes del suelo, los cuales pueden ser modificados por el uso y manejo que recibe. Entre las principales funciones que tienen los suelos destacan: la producción de alimentos (biomasa), mantener la calidad del agua, disminución de contaminantes ambientales y patógenos, regulación del clima, fijación de gases de efecto invernadero, secuestro de carbono por tiempo prolongado, transformación de la materia orgánica, hábitat biológico y reserva ecológica (Porta *et al.*, 2019; FAO, 2015; Arias *et al.*, 2018).

El equilibrio del suelo puede ser fácilmente perturbado, especialmente por intervención humana como la actividad agrícola intensa o inadecuadas prácticas de manejo (Cotler *et al.*, 2007), por lo que los microorganismos se ven afectados directamente y esto al mismo tiempo modifica las propiedades y funcionamiento de un suelo afectando con esto a su calidad (Di Ciocco *et al.*, 2014).

De acuerdo con el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (Karlen *et al.*, 1997 citado en Bautista *et al.*, 2004) la calidad de un suelo depende de la capacidad de éste para funcionar dentro de un ecosistema natural o manejado. Evaluar la actividad biológica del suelo es una labor complicada, los procesos biológicos son en extremo variables en tiempo y espacio, ya que dependen de múltiples variables tanto ambientales como inherentes al propio suelo. La manera de conocer un poco más del funcionamiento del suelo es evaluando propiedades y procesos indicadores de la actividad biológica, entre los indicadores más utilizados están: contenido de materia orgánica, carbono activo, respiración del suelo, relación C/N, nitrógeno mineralizable y actividad enzimática.

Las zonas áridas y semiáridas son consideradas aquellas áreas en donde el promedio de lluvias es menor que las pérdidas por humedad a través de la evapotranspiración (Arámbula, 2005; FAO, 2004). En México según la CONAZA (2016), las zonas áridas se definen como regiones donde las precipitaciones son de 250 mm anuales o menos, y como semiáridas donde la precipitación fluctúa entre 250 y 500 mm. Los suelos en las regiones áridas y semiáridas en donde los organismos carecen más del recurso agua, son más vulnerables y difícilmente resisten al manejo inadecuado y diferentes usos, por lo que se ven afectadas algunas de las funciones que el suelo realiza y con ello la calidad y productividad del suelo, llevándolo hasta una degradación permanente (SEMARNAT, 2002).

El municipio de Axapusco se encuentra ubicado en el estado de México, en las coordenadas 98° 47' 50" longitud oeste y 19° 43' 10" latitud norte; altitud entre 2 300 y 3 100 msnm con un clima predominante semiseco y con vegetación antropizada. Una de las actividades económicas más importantes del territorio es la agricultura, donde los principales cultivos son el nopal, maíz, avena y cebada. Las tierras agrícolas en su mayoría se observan bajos rendimientos debido a la falta de agua, pérdida de la fertilidad del suelo debido a problemas de erosión y pérdida de nutrientes, así como una baja en la calidad de los suelos. Ante esta situación surgió la pregunta ¿Cómo es el funcionamiento de la actividad biológica del suelo bajo diferentes condiciones de uso de la tierra o de tipo de vegetación? Queremos saber si el cambio de uso del suelo afecta las funciones biológicas

que el suelo realiza y si esto afecta la calidad del suelo comprometiendo con esto su fertilidad y productividad.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo general

Evaluar y comparar el funcionamiento biológico de un suelo bajo diferentes coberturas vegetales y manejos de uso a través de propiedades indicadoras en una región semiárida del Estado de México.

1.2 Objetivos particulares

- ❖ Analizar el comportamiento y tendencia de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas, relacionadas con el funcionamiento biológico del suelo, en diferentes coberturas vegetales y manejos de un mismo suelo.
- ❖ Evaluar la calidad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales y manejos a partir de la aplicación de un índice.
- ❖ Identificar si en alguno de los sitios que se evalúan, alguna función biológica puede estar afectada, reduciendo con esto la calidad del suelo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Funciones del suelo

El suelo es un sistema abierto compuesto de agua, aire, minerales y materia orgánica, en el que se producen una serie de procesos de transformación, los cuales involucran la presencia de microorganismos, donde por medio de complejas reacciones químicas, permiten la transformación de la materia orgánica y el reciclaje de nutrientes entre otras funciones (Porta *et al.*, 2019). Dentro de todos los ecosistemas, los suelos cumplen funciones esenciales, la función más conocida es la del soporte y suministro de nutrientes a las plantas, sin embargo, también permite la recarga de acuíferos mejorando la calidad del agua filtrándola y reteniendo los contaminantes (FAO, 2015). El suelo es el medio en donde se realizan los ciclos biogeoquímicos, que son necesarios para el reciclaje de nutrientes donde destaca el ciclo del carbono, se estima que después de los océanos, el suelo es donde está el principal reservorio de carbono en el planeta (García, *et al.*, 2012). Asimismo, el suelo funciona como hábitat para una amplia biodiversidad de organismos, por lo que también es un gran reservorio genético y finalmente, el suelo juega un papel importante como suministro de ciertos materiales para la construcción y de cimiento para diversas infraestructuras urbanas (Cotler *et al.*, 2007).

3.2 Procesos biológicos del suelo

La biología del suelo juega un papel fundamental en su composición y sus propiedades. La biota edáfica interactúa con restos animales y vegetales, en una red trófica compleja determinada por la actividad biológica (Robert, 2020), el resultado de esta interacción es el ciclo de nutrientes, descomposición de la materia orgánica, almacenamiento de carbono en el suelo y en la modificación de la estructura física del suelo. La actividad de los organismos del suelo determina en gran medida el estado de salud y calidad del mismo, el cambio del uso es el principal factor por el cual se deteriora la calidad y las funciones que el suelo realiza (Burbano-Orjuela, 2016).

El funcionamiento de los suelos está influenciado en gran parte por su contenido de materia orgánica. La materia orgánica es el principal detonante de la actividad biológica del suelo. La materia orgánica y la actividad biológica tienen una gran influencia tanto en las propiedades químicas como en las propiedades físicas de los suelos (Robert, M., 2020). La materia orgánica se define como el total del material originado de algunos organismos, se divide en 3 fracciones, la primera (fracción viva) incluye a todos los organismos vivos presentes en el suelo (biomasa edáfica), es decir, protozoarios, nemátodos, artrópodos, bacterias, algas, hongos, entre otros. La segunda son los residuos orgánicos frescos de vegetales, así como restos de organismos recientemente muertos, hojarasca, raíces, etc., y la tercera fracción es la materia orgánica de neosíntesis, constituida de compuestos orgánicos nuevos elaborados por los organismos del suelo, que se combinan con algunas macromoléculas de residuos originales (sustancias húmicas), estas sustancias están constituida de macromoléculas complejas muy estables y resistentes a la biotransformación también son denominadas como humus. (Gugino *et al.*, 2009). El humus es el componente más importante para mantener la calidad y salud del suelo, y se divide de acuerdo a su peso molecular y a la solubilidad a diferente pH: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas, se encuentran en el suelo formando complejos órgano-minerales manteniendo y favoreciendo las propiedades físicas del suelo: agregación, estabilidad estructural, permeabilidad, retención de agua e interaccionan con la práctica totalidad de los constituyentes de la solución del suelo, actúa en la nutrición vegetal a través de la retención y movilización de nutrientes. Por lo tanto, el humus es considerado como fuente de nutrimentos en formas de liberación retardada mejorando el balance nutricional (Meléndez, 2003). El humus participa tanto en regulación de los ciclos biogeoquímicos de todos los elementos, como en los procesos de biorremediación ambiental mediante del bloqueo de contaminantes que afectan a los seres vivos.

La cantidad de residuos que llegan a la superficie del suelo cambia a través del tiempo ya sea transformándose en nuevas formas orgánicas (sustancias húmicas) o bien llegando a formas minerales (mineralización), tanto el proceso de humificación como el de mineralización están condicionados por varios factores, la velocidad de estos procesos depende entre otras cosas, de las condiciones de temperatura, humedad y actividad

biológica. En regiones templadas frías, la descomposición del residuo es más lenta que en regiones tropicales, donde existen altas tasas de mineralización. La mineralización empobrece y degrada al suelo al dejarlo sin materiales orgánicos (Velázquez *et al.*, 2002).

La tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo, depende sobre todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno (Robert, 2002), en la mineralización se lleva a cabo la destrucción total del material orgánico, quedando sólo H₂O, CO₂ y minerales como: nitratos, fosfatos, sulfatos (Gallardo, 2001).

Por ejemplo, la mineralización del nitrógeno se lleva a cabo en dos etapas: en la primera, los microorganismos transforman el amoníaco (NH₃) en amonio (NH₄⁺) (amonificación) y a su vez este es fijado por la materia orgánica y las arcillas del suelo de donde son tomados por las bacterias, la segunda etapa consiste, en la síntesis del nitrato (NO₃⁻) a partir del amonio (nitrificación). La tasa neta de mineralización de nitrógeno y la cantidad total de nitrógeno son indicadores de calidad del suelo (Celaya *et al.*, 2011; Monsalve *et al.*, 2017).

Por otra parte, la humificación es el proceso que toma más tiempo, por el cual la materia orgánica se transforma en humus, material estable y resistente hacia el ataque de los microorganismos, se reconoce por su condición amorfa coloidal y color negruzco debido a su alto contenido de carbono. La importancia de las sustancias húmicas radica en el almacenaje de nutrientes por un largo tiempo, su capacidad de intercambio catiónico es elevada y contribuye a una mejor estabilidad en los agregados (Meléndez, 2003). El reciclaje de nutrientes es uno de los procesos biológicos más relevantes de los ecosistemas terrestres, depende de la intensidad de la actividad biológica del suelo, consta principalmente de la transferencia de un componente a otro, como es el caso del nitrógeno.

El suelo es el mayor reservorio de carbono en la naturaleza (FAO, 2004). La fijación del carbono en el suelo impide que el CO₂ vaya a la atmósfera, uno de los gases de efecto invernadero de mayor importancia que ocasiona el cambio climático. La captura de carbono en el suelo comprende la interacción entre plantas y los organismos del suelo, el carbono se transforma en materia orgánica que se acumula en el suelo por amplios

periodos de tiempo (Burbano-Orjuela, 2016). Este carbono almacenado en el planeta en el primer metro de suelo, se sabe, es una y media veces superior al acumulado en la vegetación (Robert, 2002).

Por otra parte, la respiración del suelo es un proceso que se utiliza con frecuencia para evaluar la salud del ecosistema. La respiración del suelo es la cantidad de CO₂ que se libera debido a procesos como: descomposición de la materia orgánica, la respiración de las raíces de las plantas y microorganismos asociadas (Guerrero-Ortíz *et al.*, 2012). La respiración del suelo es un indicador que se utiliza para medir indirectamente la intensidad de la actividad biológica, valores elevados de este indicador, reflejan una actividad biológica intensa, por el contrario una menor actividad biológica se ve reflejada en bajos niveles de respiración (Guerrero-Ortíz *et al.*, 2012).

3.3 Calidad de suelo

Año con año ha aumentado la preocupación por la degradación del suelo y disminución en su calidad. En comparación a la calidad del aire o del agua, la calidad del suelo es algo más complejo y no está referida únicamente al grado de contaminación. A lo largo del tiempo el concepto de calidad de suelo ha tenido enfoques diferentes poniendo más énfasis en las funciones que el suelo realiza. Inicialmente la calidad del suelo ha sido asociada con su productividad (Hornik, 1992; citado en De la Paz Jiménez *et al.*, 2002). Al parecer la definición más antigua es de Mausel (1971) quien definió la calidad del suelo como la capacidad de los suelos para producir maíz, soya y trigo bajo condiciones de gestión de alto nivel (Bünemann, *et al.*, 2018).

La calidad del suelo ha sido analizada de muchas formas, y se ha relacionado con el funcionamiento correcto del suelo, dependerán aspectos tan importantes como la fertilidad, productividad, sostenibilidad, calidad ambiental y salud del mismo (Bautista *et al.*, 2004). Los conceptos de calidad de suelo han cambiado a medida que se ha reconocido la importancia de las funciones del mismo. Doran (1994) menciona que ya desde finales de los setenta Warketin y Fletcher (1977) discutieron la evolución del concepto de calidad de suelo en la agricultura intensiva (Pankhurst, 1997). En 1994 Gregorich y colaboradores,

definieron este concepto como una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación al uso específico, por otro lado Arshad y Coen en 1992 la definieron como la capacidad de aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos dándole así una connotación más ecológica (Bautista *et al.*, 2004).

Doran y Parkin en 1994 observaron que el concepto incluía la capacidad del suelo para funcionar de una manera sostenible, pero consideraban que este enfoque era muy limitado, por ello incluyeron la capacidad de los suelos para contribuir a la calidad ambiental y mejorar la salud humana y vegetal. Actualmente, y de acuerdo al Comité para la salud del suelo de la Soil Science Society of America (1997), la definición de la calidad de suelo se sintetiza en *la capacidad específica para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte, sostener la productividad de plantas y animales, igualmente de mantener y mejorar la calidad de agua y aire, y soportar la salud humana y el hábitat* (García *et al.* 2012; Bautista *et al.*, 2004).

La calidad depende de las funciones que el suelo realiza, las cuales dependen de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el suelo, estos procesos están controlados por la sinergia de propiedades físicas, químicas y biológicas que hacen que el suelo cumpla con las funciones de: 1) proveer un medio para el crecimiento de las plantas y la actividad biológica; 2) permitir regular y dividir flujo de agua y almacenamiento en el medio ambiente; y 3) servir como un medio ambiente amortiguador en la formación y destrucción de compuestos peligrosos para el medio ambiente (Pankhurst, 1997; Porta *et al.*, 2019).

3.3.1 Indicadores de la calidad y funcionamiento edáfico.

Como ya se mencionó anteriormente, la calidad del suelo depende tanto de propiedades químicas, físicas y biológicas, por lo que para evaluar la calidad del suelo (su funcionamiento) se requiere de una adecuada elección de propiedades (indicadores) involucradas en el funcionamiento del suelo, sensibles a los cambios en corto tiempo. Aunque actualmente existe y ha aumentado la preocupación ante la degradación del suelo, la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, no existen criterios universales que permitan evaluar los cambios en la calidad y

condición del suelo, por lo cual es necesario contar con variables conocidas como indicadores (Bautista *et al.*, 2004).

Un indicador es una variable que permite medir o evaluar un determinado proceso o condición ya que resume, simplifica, cuantifica y comunica de manera comprensible cierta información relevante de dicha condición. Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas (Bautista *et al.*, 2004).

Dentro de las funciones principales de los indicadores destaca el hecho que permiten dar seguimientos a procesos a través del tiempo, además ayudan a conocer tendencias de eventos, además de comparar transversalmente sitios o situaciones. Son útiles porque proveen información preventiva temprana y sirven para anticipar condiciones y tendencias futuras (Cantú *et al.*, 2007). Un indicador debe cumplir con ciertas características para poder ser seleccionado, entre otras cosas deben ser fáciles de medir por diferentes usuarios, limitados en número, reproducibles, además de resumir o conjuntar información o cualidades de otras propiedades, asimismo es necesario que presenten una rápida respuesta en el tiempo para que sea posible dar un seguimiento continuo, es decir, que sean sensibles a cambios del funcionamiento del suelo (García, *et al.*, 2012; Vargas-Macucha, 2010).

Particularmente si lo que se pretende es saber si un determinado suelo presenta un buen funcionamiento biológico, lo primero que se tiene hacer es definir *¿Qué se entiende por un buen funcionamiento biológico?*, si se considera como referente la relación suelo planta, entonces esto significaría que cuando hay un buen funcionamiento la actividad biológica de suelo se realiza con toda normalidad, lo que implica que el ciclo de carbono y de otros nutrientes se encuentra en equilibrio entre las entradas y salidas, significa que el suelo presentan buenas reservas de carbono estable y una buena proporción de carbono activo, también que el suelo tendría agregados estables como resultado de la actividad biológica y una tasa estable de suministro de nitrógeno. Si estas son las preguntas que se quieren contestar, entonces es necesario identificar los procesos involucrados en dichas funciones y las propiedades que regulan dichos procesos (USDA, 1999). En este sentido entre las propiedades que más se han utilizado como propiedades indicadoras del funcionamiento

biológico del suelo están: el contenido de materia orgánica, carbón oxidable, nitrógeno mineralizable, respiración del suelo, actividad enzimática y la relación C/N entre otras.

3.3.2 Indicadores del funcionamiento biológico del suelo.

3.3.2.1 Materia orgánica

La materia orgánica (MO) es tal vez la propiedad edáfica más importante y utilizada para evaluar el funcionamiento biológico y calidad del suelo, también es reconocida como un indicador universal para realizar estudios de diagnóstico de fertilidad, degradación y productividad del suelo (Gallardo, 2001). La MO es una propiedad fundamental ya que de ella dependen varios procesos físicos y químicos, responsables de las funciones esenciales que los suelos realizan: dar soporte a las plantas, ser hábitat para mantener la biodiversidad del suelo, resguardar y proporcionar nutrientes para plantas y diversos organismos, almacenar agua, depurar al suelo, etc.

La MO incluye residuos de plantas, animales en distintas etapas de descomposición, así como organismos vivos (Vargas, 2009), está compuesta principalmente de H, C, O y N además de fósforo, magnesio, calcio, azufre y otros micronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (Julca, *et al.*, 2006), por esta razón esta propiedad es reconocida como una gran fuente de nutrientes, por lo que la MO es la principal fuente de energía para los organismos del suelo.

Por otra parte, también influye en el funcionamiento físico del suelo al contribuir a la formación de agregados estables favoreciendo así la presencia de estructuras que permiten un buen intercambio gaseoso y una mayor infiltración, por otra parte, incrementan la retención de humedad, además de proteger al suelo ante la erosión. (De la Paz Jiménez *et al.*, 2002; Julca *et al.*, 2006). La materia orgánica varía significativamente en los distintos ecosistemas, por lo común los suelos de las regiones áridas, semiáridas y cálidas comúnmente tienen menor cantidad de materia orgánica que el suelo de otros ambientes (USDA, 1999).

3.3.2.2 Carbono lábil

El carbono del suelo se puede encontrar como carbono elemental, inorgánico y orgánico, este último es aquel que forma la mayor parte de la materia orgánica, es incorporado al suelo mediante el aporte continuo de material vegetal principalmente y material animal (Martínez, *et al.*, 2008).

No obstante que grandes cantidades de carbono orgánico están presentes en los suelos, la mayoría de este es relativamente inerte o poco utilizable. La materia orgánica del suelo se compone de diferentes componentes que varían en su tiempo o velocidad de descomposición. La MO lábil es la que se recicla de manera relativamente rápida, es transformada fácilmente por los organismos del suelo y aprovechada como fuente de energía, representa del 7 al 21% de la materia orgánica total, con una vida útil de 5 a 10 años, es el resultado de la adición de residuos frescos tales como hojas y raíces pequeñas de las plantas, así como los organismos vivos, mientras que los residuos resistentes o poco lábiles son los que se encuentran en mayores cantidades, presentan estructuras complejas difíciles de degradar o bien se encuentran protegidos física o químicamente por lo que su tasa de reciclaje es muy lenta (20-40) años. Gran parte de esta materia orgánica resistente está constituida por materia orgánica biotransformada y neosintetizada (sustancias húmicas), presenta una condición coloidal caracterizada por su estabilidad y gran actividad química, constituye del 33 al 65% de la materia orgánica total (Celaya *et al.*, 2011) esta fracción es la más resistente a la transformación por lo que requiere un mayor tiempo para su mineralización y aprovechamiento.

El contenido de carbono de la fracción activa o lábil, es un indicador a corto plazo de los cambios de calidad del suelo (Weil *et al.*, 2003). Las fracciones lábiles corresponden a aquellos componentes más activos de la MOS (materia orgánica del suelo), y participan en la liberación de nutrientes, estos a su vez son afectados directamente por el manejo agronómico, por otro lado, la materia orgánica estable es aquella de menor reacción en el suelo. Un manejo agrícola intenso, acelera la degradación de los suelos y a su vez intensifica la liberación del carbono hacia la atmósfera (Zagal y Córdova, 2005).

3.3.2.3 Biomasa del suelo

La biomasa microbiana es el conjunto de organismos que habitan en el suelo, es una de las fracciones de la MO de mayor significancia biológica en el suelo, constituye del 1 a 5%, del total la MO y es una fracción que aporta cantidades sustanciales de N y P (Acosta y Paolini, 2006). Está compuesta principalmente de bacterias y hongos y su función principal es actuar como agente degradador de los residuos de las plantas, este proceso contribuye a la liberación de nutrientes y formación de CO₂.

La biomasa es un indicador sensible a los cambios en el carbono orgánico total del suelo. Se relaciona estrechamente con el contenido de carbono lábil en el suelo, ya que este proporciona una fuente de energía disponible para la descomposición microbiana (Martínez, *et al.*, 2008). Además, participa en el reciclaje de nutrientes y resulta ser importante en la agregación del suelo. La biomasa del suelo es afectada por factores que modifican el contenido de agua o carbono presentes en el suelo, tales como el tipo de suelo (textura), clima y el manejo. En suelos con mayor contenido de arcilla, la biomasa microbiana aumenta debido a que se retiene más agua y a menudo contiene más carbono orgánico, otra propiedad importante para que exista una buena biomasa es el pH, ya que valores cercanos a 7.0 son óptimos para su desarrollo (Gonzalez-Quiñones *et al.*, 2011).

La descomposición es un proceso en el cual la biomasa microbiana actúa directamente, los compuestos orgánicos se fragmentan en otros más pequeños, éste depende principalmente de la temperatura y la humedad, de la composición química de los restos animales y vegetales y de la actividad de los microorganismos, aunque otro factor importante es la radiación UV ya que en periodos de sequía ayuda a la degradación de los compuestos a través de oxidación fotoquímica (Gonzalez-Quiñones *et al.*, 2011).

3.3.2.4 Nitrógeno

El nitrógeno en forma gaseosa (N₂) representa el 79 % de la composición de la atmósfera y es la fuente principal de suministro para los ecosistemas. Dentro de los ecosistemas áridos y semiáridos, el nitrógeno es el nutriente más limitante para el desarrollo de las plantas (Celaya *et al.*, 2011). La mayor parte del nitrógeno contenido en el suelo forma parte de la materia orgánica de los animales, plantas, hongos, bacterias y otros organismos muertos y

sólo mediante procesos de descomposición y mineralización es que este elemento pueda estar disponible para las plantas, ambos procesos son llevados a cabo por una comunidad de microorganismos que habitan en el suelo, a través del proceso de mineralización el nitrógeno orgánico es transformado por los microorganismos a su forma inorgánica: amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) ambos nutrientes si están disponibles para las plantas y son aprovechados (Celaya, *et al.*, 2015; Philippot y Germon, 2005).

3.3.2.5 Nitrógeno mineralizable

El nitrógeno potencialmente mineralizable (N) se refiere a la cantidad del N orgánico edáfico contenido en los residuos orgánicos que puede ser convertido rápidamente por la actividad de la biomasa microbiana aerobia heterótrofa a formas inorgánicas solubles principalmente en amonio y nitrato (Galvís-Spinola y Hernández-Mendoza, 2004). El nitrógeno mineralizable se calcula mediante el ajuste de uno o más modelos de regresión a la tendencia del N mineralizado acumulado durante un proceso de incubación, ya sea considerando todas las semanas o un sólo periodo. El nitrógeno potencialmente mineralizable (N) se emplea como indicador de la capacidad del suelo para sustentar la producción agrícola o como indicador del aporte nitrogenado del suelo (Galvís-Spinola y Hernández-Mendoza, 2004; Gugino *et al.*, 2009).

3.3.2.6 Relación carbono nitrógeno C/N

La materia orgánica del suelo está constantemente bajo procesos de humificación y mineralización, ambos son procesos fundamentales para mantener el reciclaje de nutrientes, la calidad y fertilidad del suelo. La relación C/N es un indicador que proporciona información sobre la susceptibilidad de los residuos orgánicos a ser biotransformados, así como la velocidad de movilización y disponibilidad del nitrógeno para las plantas, (Soto-Mora, *et al.*, 2016).

Valores altos de carbono/nitrógeno, indica acumulación de carbono en el suelo, lo que significa que la materia orgánica presente, está constituida de compuestos que son muy resistentes a la descomposición, por lo que su velocidad de transformación es lenta; por el

contrario valores bajos indican que la biotransformación de la materia orgánica es rápida, por lo tanto el desprendimiento de nitrógeno es elevado, esto se debe a que los residuos orgánicos del suelo están integrados por componentes pocos resistentes a la degradación, por lo que las tasas de humificación y mineralización son rápidas, también indica que las condiciones climáticas son favorables para acelerar la descomposición orgánica (Ribeiro,2012). Valores entre 10 y 14 indican que la mineralización de la MO no es tan rápida ni tan lenta sino apropiada debido a una buena actividad microbiana en donde el suelo tiene los nutrientes necesarios para llevar a cabo dicho proceso (Gamarra, *et al.*, 2018).

3.3.2.7 Respiración

El suelo es considerado la principal reserva del carbono, al mismo tiempo representa uno de los mayores flujos de CO₂ en la atmósfera, llevado a cabo mediante el proceso de la respiración edáfica (Guillen, 2018). La respiración edáfica es un proceso metabólico generado por los organismos del suelo, que se define como la suma de la respiración de raíces y micorrizas (respiración autótrofa) y la respiración heterótrofa, producida por los organismos del suelo al descomponer la materia orgánica (Cueva *et al.*, 2012) dicho proceso consiste principalmente en la producción total de CO₂, por unidad de área y tiempo (Vásquez *et al.*, 2013).

La mayor parte del carbono lábil del suelo resultante de la descomposición de la materia orgánica realizado por los microorganismos, en muchas ocasiones es reincorporado a la atmósfera a través de la respiración, por ello que la medición de dióxido de carbono es una estimación de la actividad microbiana del suelo (Mora, 2006). Tal actividad puede verse afectada tanto por el uso del suelo, como el tipo de cobertura vegetal, el clima y las prácticas de manejo (Guerrero *et al.*, 2012).

3.3.2.8 Estabilidad de agregados

La agregación del suelo es un proceso natural mediante el cual las partículas primarias que lo componen (arcillas, arenas y limos) se unen para formar partículas más grandes

denominados agregados o terrones, estos agregados pueden ser micro (< de 0.25 mm) o macro (> de 0.25 mm).

La estabilidad de agregados es una estimación de la capacidad de resistencia que tienen los terrones a ser desintegrados al someterse a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o una solución dispersante (USDA, 1999). Esta propiedad es una característica dinámica y resulta ser un indicador sensible a tendencias de recuperación o degradación de los suelos y se encuentra relacionada principalmente con la actividad de los coloides, el contenido orgánico y la actividad microbiana, que por medio de la producción de compuestos aglutinantes (mucopolisacáridos, gomas bacterianas, etc.) permite adherir y estabilizar las partículas minerales evitando así su desintegración, en diversas investigaciones se ha demostrado que al disminuir los contenidos de materia orgánica se reduce la estabilidad de los agregados (Cabria *et al.*, 2002; Gabioud *et al.*, 2011;). El contar con una estructura estable es esencial para un buen funcionamiento físico del suelo, ya que permite tener un balance adecuado de macro y microporos, lo que favorece la relación agua-aire dentro del suelo, además hace más resistente el suelo ante la erosión (USDA, 1999; Cabria *et al.*, 2002).

3.3.3 Índices de calidad de suelo

Se ha sugerido que una manera más apropiada para evaluar la calidad del suelo es utilizando índices, los cuales integren a las propiedades indicadoras más determinantes en el funcionamiento físico, químico y biológico del suelo. Los índices de calidad del suelo se han ido posicionando como herramientas de medición que ofrecen y combinan una variedad de información sobre las propiedades, procesos y características del suelo, son de gran utilidad para la toma de decisiones futuras (Andrews, *et al.*, 2002; Estrada, *et al.*, 2017), es decir, estos índices deben estar conformados por un conjunto mínimo de datos que reflejen un proceso y funcionamiento importante del suelo e indiquen si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Ghaemi *et al.*, 2014). Sin embargo, no hay índices de calidad de suelo que sean universales y apliquen para todos los propósitos y contextos (Cantú *et al.*, 2007).

Dado que ninguna propiedad es permanente se debe tener en cuenta dimensiones espaciales y temporales, la primera puede ser un área específica y el tiempo será el necesario en el cual un indicador cambie. Por lo regular estos cuantifican la calidad del suelo por medio de una escala numérica cuyo rango fluctúa entre 0 y 1 en donde el cero representa la peor condición y el uno la mejor, es así como el valor del índice evalúa la calidad de un suelo para cumplir ciertas funciones dentro un ecosistema (Guiño *et al.*, 2009).

4. ANTECEDENTES

Campitelli *et al.*, 2010, seleccionaron algunas propiedades como indicadores para evaluar la calidad del suelo en una provincia de Córdoba, Argentina. Se estudiaron 6 áreas con distintas condiciones de uso y las compararon contra tres sitios modelo, en cada lugar de muestreo se midió carbono orgánico, nitrógeno total, pH, fósforo extractable, conductividad eléctrica, carbono liviano, carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos, densidad aparente, cambio en el diámetro medio ponderado de agregado, espesor del horizonte superficial y profundidad y carbonato de calcio. Para evaluar la relación existente entre las propiedades del suelo y las distintas condiciones utilizaron un análisis de componentes principales. Los resultados obtenidos muestran que las propiedades más sensibles a los cambios son aquellas que están relacionadas a la fertilidad como la materia orgánica y el nitrógeno.

Prieto y colaboradores en el 2013, establecieron indicadores e índices para evaluar la calidad del suelo en parcelas de cebada ubicadas al sur del estado de Hidalgo, México. A partir de 8 indicadores, crearon un índice basado en los criterios propuestos por Cantú, *et al.*, 2009, en el que los valores fueron normalizados en una escala de 0 a 1. El valor obtenido para el índice fue 0.48 lo cual ubica al suelo dentro de la clase de calidad moderada, los autores concluyen que el resultado fue influenciado por los bajos valores de carbono orgánico lo cual influyo en modificar otras propiedades tales como la estabilidad de agregados, la infiltración de agua y la densidad aparente y que al verse afectadas se incrementó el riesgo de erosión tal y como se observó en el espesor del horizonte superficial uno de los 8 indicadores evaluados.

Cantú *et al.* 2007, evaluaron la calidad de un suelo ubicado en la cuenca del arroyo La Colacha en la provincia de Córdoba, Argentina bajo un uso principalmente agrícola-ganadero con tres sistemas de manejo agrícola, evaluaron un mínimo de 7 indicadores los, Como resultado obtuvieron un valor de 0.47 en el índice ubicando la calidad del suelo en una clase de moderada calidad, esto debido a un bajo contenido de carbono orgánico. Los autores confirmaron que la materia orgánica la propiedad que más influye en otras propiedades ya que fue la causa de que los valores de la estabilidad de agregados, infiltración y densidad aparente disminuyeran, afectando con esto la calidad del suelo.

Muñoz y colaboradores en el 2013, evaluaron la degradación física y biológica del suelo de una terraza fluvial localizada en Zapotitlán de la Salinas en el estado de Puebla, México. El objetivo del trabajo fue conocer si existe relación entre la cobertura vegetal y la degradación del suelo, para ello fue necesario medir 17 propiedades y a partir de los resultados construyeron un índice de degradación física como de degradación biológica. Los resultados obtenidos indicaron que ambos tipos de degradación del suelo están relacionados significativamente con la pérdida de cobertura vegetal debido a que hay un impacto en la disminución de la materia orgánica por el poco aporte de residuos vegetales y esto a su vez provocó una reducción en el espacio poroso, la estabilidad de los agregados, la formación de costras biológicas y el aumento en la densidad aparente.

Hernández et al. 2018 evaluaron el impacto de las diferentes coberturas vegetales y usos del suelo sobre su calidad, el estudio se realizó en la localidad “El Durazno” del Valle Mezquital, en el estado de Hidalgo, México. La investigación consistió en evaluar 10 propiedades tanto físicas como químicas, con los resultados se construyeron dos índices propuestos por autores diferentes que permitieran evaluar la calidad del suelo de los diferentes sitios, los valores fueron normalizados en una escala de 0 a 1 y el valor obtenido fue interpretado en las diferentes clases de calidad, finalmente aplicaron un análisis de correlación para conocer qué propiedades tienen mayor relación con el aumento o disminución de la calidad de suelo. Los resultados obtenidos mostraron que el suelo del pastizal fue el más elevado en calidad en ambos índices propuestos y concluyeron que las propiedades que más influyeron sobre este resultado fueron la materia orgánica, nitrógeno, infiltración y la estabilidad de agregados.

Rojas *et al.* 2017, seleccionaron un conjunto mínimo de indicadores para evaluar la calidad del suelo bajo una producción intensiva de cucurbitáceas en la provincia del Chaco, Argentina. Estudiaron 4 sitios dentro de la zona, algunas de las propiedades evaluadas fueron: densidad aparente, carbono orgánico total, carbono orgánico, nitrógeno total, pH y fracción erosionable por el viento. Los resultados obtenidos mostraron que los indicadores fueron sensibles para describir la calidad del suelo que resultó ser de moderada a baja calidad, debido al bajo contenido de materia orgánica y un nivel de degradación física.

Andrews y colaboradores en 2002, compararon la eficacia de distintos índices de calidad de suelo en suelo de uso agrícola. Los autores compararon los índices propuestos a través de las diferentes propiedades indicadoras, para ello mencionan que es importante que la selección de las variables sea bajo la opinión de expertos o mediante análisis de componentes principales. Concluyen que los índices de calidad de suelo son herramientas muy valiosas y en ellos se deben seleccionar de manera minuciosa las propiedades indicadoras, estos a su vez proporcionarían de manera adecuada y eficaz la información para evaluar dicha calidad y con ello la toma de decisiones.

De la Paz Jiménez y colaboradores en el 2002, valoraron diferentes propiedades (químicas, físicas, biológicas y bioquímicas) determinando un conjunto mínimo de datos con la finalidad de establecer un índice de calidad de suelo. Se compararon cuatro tipos de coberturas. Como resultado obtuvieron que los valores de las diferentes propiedades medidas son mayormente significativas en los sitios de parcelas no perturbadas.

Jaurixje y colaboradores en 2013, evaluaron los cambios en las propiedades físicas y químicas y el impacto de las mismas sobre el comportamiento biológico del suelo cultivado bajo diferentes intensidades. El estudio se llevó a cabo en un sitio ubicado en el municipio Jiménez del estado Lara, Venezuela. Las propiedades evaluadas fueron densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo y potasio, respiración basal y biomasa microbiana, estas últimas obtuvieron valores más elevados en suelos sin ningún tipo de manejo, por el contrario los valores más bajos se encontraron en suelos manejados, también obtuvieron como resultado que la biomasa microbiana está estrechamente relacionada con los macroporos y la conductividad hidráulica, afectando de manera positiva a las condiciones físicas del suelo y por ende existe una mayor actividad biológica de los microorganismos.

Castillo *et al.*, en 2021 evaluaron la calidad del suelo de cuatro ejidos agrícolas en el estado de Puebla, México. Se midieron propiedades químicas, físicas y biológicas tales como pH, conductividad eléctrica materia orgánica del suelo, estabilidad de agregados en

húmedo, fósforo extraíble Olsen, hierro extraíble con DTPA, densidad de lombrices. Los suelos se compararon con sitios sin alterar (no cultivados) y finalmente construyeron un índice de calidad de suelo, por lo que concluyeron que las propiedades indicadoras fueron eficaces para evaluar la calidad de suelo, además de que los suelos sin manejo presentaron el mayor promedio de ICS, al presentar diferencias con los suelos cultivados en sus valores de pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y diámetro medio ponderado.

Benintende y colaboradores en 2017, seleccionaron y analizaron variables biológicas y bioquímicas para la construcción de un índice que permitió evaluar la calidad biológica de suelos bajo diferentes manejos, áreas con suelo poco disturbado (PD), suelo degradado (D) y área con grado intermedio de degradación con aplicación de prácticas agrícolas (I) en dos diferentes tipos de suelos; Molisoles y Vertisoles. Las propiedades analizadas principalmente fueron C y N de la biomasa microbiana, potencial de mineralización de N, C orgánico y N total. Finalmente concluyeron que el índice utilizado, resultó ser el adecuado, además que las variables son potencialmente útiles al integrar el set mínimo de datos de indicadores para evaluar la calidad de suelos en esa provincia.

Gili *et al.*, en 2007 determinaron los efectos de las diferentes coberturas vegetales aplicadas, sobre la actividad de los microorganismos del suelo, a través de la medición de número de bacterias heterótrofas aerobias, C de la biomasa microbiana, la actividad enzimática y algunas propiedades edáficas relacionadas tales como nitrógeno total y carbono orgánico, además se hizo un cálculo de la mineralización del carbono (respiración/materia orgánica). Los resultados indicaron que la utilización de coberturas vegetales perennes en particular, trébol frutilla, incrementa la concentración de carbono orgánico y nitrógeno total y a su vez estas variables fueron determinantes en la actividad microbiana del suelo.

Di Ciocco y colaboradores en 2014, determinaron si la actividad biológica es un buen indicador de la intensidad de uso de suelo (agricultura intensiva continua, agricultura reciente, y pastizales naturalizados) para ello, estimaron la respiración edáfica y la actividad enzimática; además de otras variables físicas y químicas. Los resultados indicaron diferencias significativas entre los diferentes usos de suelo, siendo los pastizales naturales los que presentaron una mayor respiración edáfica así como también una elevada

actividad enzimática por lo que estos sitios tuvieron una actividad microbiológica mayor, lo que les permite mantener una elevada capacidad para descomponer residuos vegetales, animales y fijar nitrógeno de la atmósfera (mejor funcionamiento biológico). Finalmente concluyeron que los resultados muestran que la actividad microbiológica puede resultar útil para diferenciar intensidades de usos de suelo a comparación de la medición de algunas variables físico- químicas.

5. METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

5.1.1 Localización

El área donde se llevó a cabo el presente estudio se encuentra en el municipio de Axapusco Estado de México, (Fig.1). Limita al norte con el Estado de Hidalgo y el municipio de Nopaltepec; al sur con el municipio de Otumba; al este, con el Estado de Hidalgo y al oeste, con los municipios de Temascalapa y San Martín de las Pirámides. El Municipio posee una extensión territorial de 230.94 kilómetros cuadrados, representando el 1.03 % de la superficie total del estado y está ubicado dentro del Eje Neovolcánico (INEGI, 2009).

Este municipio está conformado por 45 localidades con una población total de 21,915 habitantes. La cobertura del suelo del municipio se compone de: pastizales inducidos (5.95%), matorral (5.76%), bosque (2.99%), el 82 % áreas agrícolas y el resto de asentamientos humanos. La vegetación natural prácticamente desapareció quedando pequeños remanentes de matorrales crasicaules, nopaleras, isotales y espinosos, los cuáles se distribuyen principalmente en planicies, lomeríos y piedemontes: en las elevaciones dominan los bosques de encino (INEGI, 2009).



Figura 1. Ubicación del municipio de Axapusco en el Estado de México

5.1.2 Geografía

El clima que prevalece es un clima templado semiseco, con lluvias en verano. La temperatura promedio registrada oscila entre los 15 – 16 ° C. En cuanto a la precipitación anual se ha registrado un rango entre 500 y 700 mm (SEMARNAT – CONAGUA, registros meteorológicos). La estructura geológica del territorio actual está compuesta de rocas ígneas extrusivas: toba basáltica que abarca el 20% aproximadamente del territorio, brecha Volcánica que ocupa el 6% de la superficie del municipio aproximadamente y se localiza en las zonas más altas de las elevaciones montañosas; rocas sedimentarias: clásticas arenisca y toba ocupan el 60% de la superficie del municipio generalmente en la zona norte del mismo.

El suelo que predomina en el municipio es Feozem (76.0%), Durisol (17.61%), Leptosol (1.62%) y Vertisol (0.89%). El uso del suelo es principalmente agrícola en donde el 81.42% del territorio es destinado para el cultivo principalmente de nopal, maíz, y avena, las áreas con asentamientos ocupan el 3.88 % del territorio también se presentan superficies con pastizal inducido (5.95%), matorral (5.76%) y bosque (2.99%)(INEGI, 2009).

5.2 Material y Método

5.2.1 Muestreo

Los sitios de muestreo se definieron y ubicaron por medio de una imagen satelital Google Earth (Fig.2), se seleccionaron 4 patrones de cobertura vegetal para ser contrastados en cuanto a su funcionamiento biológico del suelo, todas ellas en el mismo tipo de suelo (Feozem calcárico y condición del relieve (planicie ligeramente inclinada), cada patrón contó con una réplica, por lo que el total de sitios muestreados fue de ocho, de esta manera se seleccionaron las siguientes unidades de muestreo dos sitios con vegetación cerrada (VC), otros dos con vegetación abierta (VA), dos más con agricultura temporal (AT) y otros dos con suelo desnudo (SD)(Fig.2).

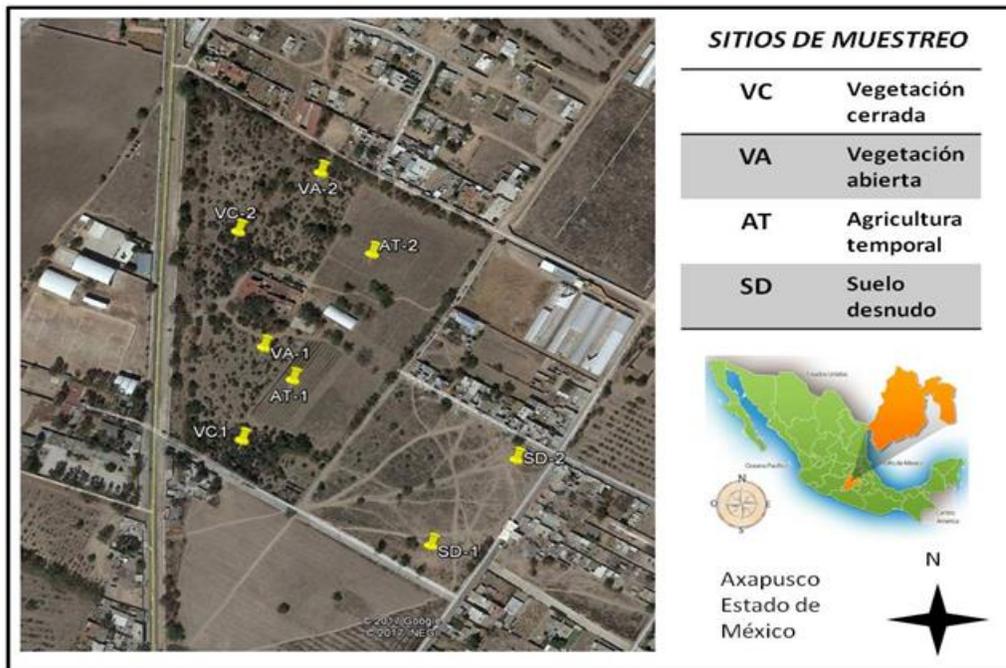


Figura 2. Ubicación los sitios donde se levantaron las muestras de suelo

Posteriormente se realizaron dos salidas al campo para conocer la zona y localizar los sitios de muestro utilizando para esto un GPS. Posteriormente, se llevó a cabo la toma de muestras (Fig.4), para lo cual se utilizó un barreno cilíndrico que se introdujo hasta una profundidad de 20 cm aproximadamente. De cada sitio y réplica se tomaron 3 sub-muestras al azar tomando la misma cantidad de suelo (1 kg aproximadamente), además se tomaron muestras adicionales para evaluar *in situ* el contenido de raíces, levantando también tres réplicas por sitio, esta evaluación se utilizó un cilindros abiertos de PVC de 1½ pulgada de diámetro y 15 cm de altura y fue así como se obtuvo un total de 48 muestras. También con un penetrómetro de presión analógico marca ELE, se midió la profundidad efectiva de suelo útil y la compactación. Por último, las muestras se colocaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas y se llevaron al laboratorio para ser analizadas.



Figura 3. Imágenes que muestran el procedimiento de muestreo



VC-1



VC-2



VA-1



VA-2



SD-1



SD-2



AT-1



AT-2

Figura 4. Panorámicas de los distintos sitios en donde se realizó el estudio, todos los sitios cuentan con el mismo tipo de suelo, tipo de relieve, litología y clima.

5.2.2 Análisis físicos, químicos, biológicos.

En el laboratorio las muestras se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se cribaron con un tamiz del n°10, separando así una fracción gruesa y otra fina la cual se utilizó para el análisis correspondiente. Las muestras de las raíces se mantuvieron en refrigeración para su preservación. Las propiedades indicadoras que evaluaron y las técnicas analíticas que se seleccionaron, para evaluar el funcionamiento biológico del suelo y su calidad se muestran en la Tabla 1.

Tabla1. Propiedades indicadoras seleccionadas y técnica analítica utilizada

Propiedad	Técnica analítica
Estabilidad de agregados	Yoder (modificado) USDA (1999)
Materia orgánica	Walkey y Black (Muñoz et al.,2013)
Nitrógeno total	Kjeldahl (Muñoz et al.,2013)
Fósforo	Bray y Kurtz (Muñoz et al.,2013)
Carbono lábil	Weile et al. 2003
Relación C/N	Calculado
Raíces	Standar Soil Methods for Long-Term Ecological Research, Robertson P. G (1999).
pH	Potenciómetro (Muñoz et al.,2013)
Capacidad de intercambio cationico total	Schollenberger y Simon (Muñoz et al.,2013)
Textura	Bouyoucos (Muñoz et al.,2013)
Profundidad útil	Gugino et al. 2009
Compactación	Gugino et al. 2009

5.2.3 Análisis de datos

Con los datos obtenidos de cada uno de los sitios se calcularon los promedios, la desviación y error estándar, posteriormente se aplicó un análisis de varianza de un factor utilizando el programa SPSS Statistics, prueba de Tukey $p_{\infty}= 0.05$ y así poder determinar

si existen diferencias significativas entre cada sitio con respecto a las propiedades analizadas. Para finalizar, con los promedios calculados de cada propiedad evaluada se construyó un índice de calidad basado en el ya propuesto por Cantú *et al.*, 2007 modificado por Muñoz *et al.*, 2017 en donde como primer punto las propiedades evaluadas del suelo se ubicaron en tres categorías, la primera es denominada “**Mayor es mejor**” que incluye aquellas propiedades donde lo más conveniente para el funcionamiento y calidad del suelo (CS) es que esas propiedades tengan un valor alto como por ejemplo la materia orgánica, en la segunda categoría denominada “**Menor es mejor**” se incluyen propiedades donde lo que conviene es que tengan un valor bajo, como es el caso de la compactación. Por último, la tercera categoría denominada “**independientes**” la cual hace referencia a propiedades en donde para la CS no es conveniente que se tengan valores altos o bajos como en el caso del pH. El siguiente paso fue normalizar cada uno de los valores en una escala que va de 0 a 1, el valor normalizado (V_n) para el caso de la primera categoría se obtuvo mediante la siguiente fórmula: $V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$, donde I_m es el valor promedio de la propiedad en cuestión, I_{min} es el valor mínimo y I_{max} el máximo. En el caso de la segunda categoría, la normalización de los datos se hizo mediante la fórmula: $V_n = 1 - (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$, donde nuevamente I_m es el valor promedio de la propiedad, I_{min} es el valor mínimo y I_{max} el máximo. Para normalizar los valores de las propiedades independientes fue necesario basarse en criterios propuestos por Muñoz (2017) como se muestra en la Tabla 2. Después de la normalización se llevó a cabo la ponderación de los valores normalizados, la cual consistió en asignar un valor entre 0 y 1 (Tabla 3), para darle un peso relativo a cada indicador en el cálculo del índice según importancia para la CS (SQI-Sol Quelite Institute, 1996). Por último los resultados obtenidos del ICS, se categorizaron en cinco clases de acuerdo a los criterios propuestos por Cantú (2007) (Tabla 4).

Tabla 2. Valores utilizados en la normalización de las propiedades denominadas independientes (Muñoz et al., 2017).

Criterios para la normalización de la textura			
Propiedad %	Valor mínimo	Valor máximo	Valor de normalización
Arena	1	10	0.00
Arena	11	20	0.25
Arena	21	30	0.5
Arena	31	40	0.75
Arena	41	50	1
Arena	51	60	0.75
Arena	61	70	0.5
Arena	71	80	0.25
Arena	81	100	0.00
Limo	1	5	0.00
Limo	6	15	0.25
Limo	16	20	0.75
Limo	21	30	1
Limo	31	40	0.5
Limo	41	60	0.25
Limo	>60		0.00
Arcilla	1	5	0.00
Arcilla	6	15	0.25
Arcilla	16	20	0.75
Arcilla	21	30	1
Arcilla	31	40	0.5
Arcilla	41	60	0.25
Arcilla	>60		0.00

Tabla 4. Clases de Calidad del suelo Cantú (2007).

Índice de calidad del suelo	Intervalos	Clases
Muy alta calidad	0,80-1,00	1
Alta calidad	0,60-0,79	2
Moderada calidad	0,40-0,59	3
Baja calidad	0,20-0,39	4
Muy baja calidad	0,00-0,19	5

Criterios para la normalización del pH		
Valor mínimo	Valor máximo	Valor de normalización
	<5	0.00
5	5.4	0.25
5.5	5.9	0.5
6	6.4	0.75
6.5	7.5	1
7.6	7.9	0.75
8	8.5	0.5
8.6	9	0.25
>9		0.00

Tabla 3. Factor de ponderación de cada propiedad evaluada.

Propiedad	Criterio
Nitrógeno	1.00
Mat. Orgánica	1.00
C. Lábil	1.00
Fósforo	1.00
Raíces	0.25
CIC	0.75
pH	0.50
Estabilidad de agregados	0.75
Profundidad	1.00
Compactación	0.50
Arenas	0.25
Limos	0.25
Arcillas	0.25
C/N	1.000

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Comportamiento de las propiedades utilizadas como indicadores en los diferentes sitios

Los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades analizadas obtenidos a partir de las tres réplicas de las muestras de suelo colectadas en las distintas unidades de muestreo, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores promedio y desviación estándar de las propiedades evaluadas en los distintos sitios.

PROPIEDAD	SITIO							
	AT-1	AT-2	VA-1	VA -2	VC-1	VC-2	SD-1	SD-2
Estabilidad agregados %	14.185±0.71	9.97± 1.31	19± 1.89	16.7±1.37	11.09± 1.82	9.56± 2.59	11.60± 1.13	11.76± 0.98
Materia orgánica %	1.85±0.23	1.69± 0.00	3.57± 0.37	3.39 ± 0.12	2.61± 0.25	2.70± 0.12	1.31 ± 0.12	0.90 ± 0.11
Nitrógeno total %	0.12±0.02	0.13±0.01	0.16±0.00	0.10±0.00	0.25±0.00	0.16±0.00	0.06±0.01	0.09±0.02
C/N	5.88±1.89	7.38±0.38	13.08±1.83	12.6±0.12	6.40±1.13	9.78±0.68	11.31±1.67	6.06±1.94
pH	7.2 ±0.00	6.4± 0.14	6.3± 0.14	5.3±0.28	7.0± 1.05	7.0± 0.07	5.4 ± 0.0	5.6 ± 0.00
CICT cmol/kg	16.82±0.96	15.77± 2.78	18.76± 1.27	12.23±1.39	22.05± 0.35	21.65± 0.06	16.11± 0.75	9.52 ± 0.30
Raíces g	0.11±0.007	0.16± 0.09	0.39± 0.10	0.40±0.26	0.58± 0.18	0.84± 0.05	0.59 ± 0.02	0.33 ± 0.12
Carbono lábil mg/kg	940.7± 19.79	807.0±10.99	651.5±59.38	976.5±35.19	821.03±21.99	716.83±90.17	373.13± 0.0	548.4± 2.19
Compactación PSI/pulgada ²	263 ±49.22	344± 46.47	147± 23.59	134±18.37	99± 31.07	117± 22.13	159± 29.98	382 ± 17.51
Profundidad cm	21.3 ±5.98	12.70± 7.91	17.73± 4.63	19.5±6.15	22.34± 10.9	28± 10.67	11.10± 5.87	7.80± 2.25
Fósforo ppm	36.62 ±4.29	37.99± 1.66	9.97± 1.80	14.96±5.54	36.82± 1.38	21.19± 4.22	25.35± 5.79	16.92± 2.05
Arenas %	54.0±0.0	62.0± 0.0	63.3± 2.31	57.0 ±1.41	43.0± 4.24	68.67± 2.31	66.67± 1.15	64.0 ± 2.0
Limos %	24.67 ±1.15	19.33± 1.15	20.0± 12.17	19.0±1.41	33.0± 7.07	20.0± 0.0	14.0 ± 2.0	20.0 ± 2.0
Arcillas %	21.33 ±1.15	18.67± 1.15	25.0± 1.41	24.0 ±0.0	24.0± 2.83	11.33± 2.31	19.33± 1.15	16.0 ± 0.0

Como se observa en la Tabla 5 el comportamiento de las propiedades analizadas en los distintos sitios es variado, algunas propiedades muestran notorias fluctuaciones y otras no tanto. La estabilidad de agregados no varió mucho prevaleciendo valores bajos para la mayoría de los suelos de los distintos sitios. La materia orgánica mostró alta variación presentando contenidos de moderados a bajos, el nitrógeno total del suelo fue bajo en todos

los casos, por otra parte, el pH presentó una amplia variación de un sitio a otro fluctuando desde fuertemente ácido hasta ligeramente alcalino, por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico fue también baja en la mayoría de los suelos de los diferentes sitios. El contenido de raíces fluctuó mucho, resultando bajo en la mitad de los sitios y altos para el resto, el contenido de carbono lábil fue relativamente alto en la mayoría de los casos, a excepción de los sitios con suelo desnudo. Respecto a la profundidad de suelo útil para las plantas, todos los sitios presentaron escaso volumen de suelo útil, ya que en la mayoría se presenta una alta compactación en el subsuelo lo que reduce el espacio interno del suelo y por ende el espacio para almacenar agua y gases. El contenido de fósforo fue una de las propiedades con mayores fluctuaciones en los suelos de los diferentes sitios, siendo los suelos con agricultura temporal (AT) los que presentaron los valores más altos. Por último en cuanto a la textura la mayoría de los suelos los suelos fue textura franco arcillo-arenoso.

Para analizar la variación de los valores de las propiedades del suelo en los diferentes sitios se aplicó un ANOVA de un factor, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6, en la cual se observa que todas las propiedades con excepción de la estabilidad de agregados y nitrógeno presentaron diferencias significativas ($\alpha < 0.05$), asimismo se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey con el fin de conocer el comportamiento de las propiedades en los diferentes sitios.

Tabla 6. Resultados de la prueba de ANOVA ($\alpha < 0.05$)

Estabilidad de agregados	2.040	.133
Materia orgánica	5.663	.002 *
Nitrógeno	3.163	0.49
C/N	25.229	.000*
pH	5.004	.004*
CICT	7.775	.002*
Raíces	9.673	.000*
Carbono lábil	5.258	.003*
Compactación	117.267	.000*
Profundidad	8.112	.000*
Fósforo	6.650	.001*
Arenas	13.897	.000*
Limos	13.365	.000*
Arcillas	4.759	.005*

La estabilidad de los agregados mostro valores muy bajos (Tabla 5) lo que indica indirectamente que en general la actividad microbiana no es muy activa, se ha demostrado que los microorganismos del suelo son de los principales promotores en la formación y estabilidad de los agregados ya que producen compuestos aglutinantes de partículas (Gabioud *et al.*, 2011) el tener agregados poco estables el suelo se hace más vulnerable al ante la erosión, además se limita el almacenaje y flujo de agua-aire, además de formarse un encantamiento en la superficie del suelo obstaculizando el desarrollo de la vegetación (Meza *et al.*, 2003). Los agregados del suelo influyen en propiedades como la porosidad, la aireación, humedad y actividad biológica del suelo (Zeng *et al.*, 2018). Barrales (2020) menciona que los cambios en la cobertura vegetal y el manejo del suelo así como los cambios en su uso, afectan los contenidos de carbono, su estructura y la estabilidad, ya que está estrechamente relacionado con las entradas de materia orgánica al suelo. En usos de suelo donde la cantidad de MO que entra es constante, el suelo tiene una mejor

estructura y mayores contenidos de C. Por ello, se considera que la agregación del suelo es un factor clave en la calidad del suelo (Meza *et al.*, 2003).

La materia orgánica presentó diferencias significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey se forman tres grupos donde el sitio SD2 se separa claramente de todos los demás presentando el valor más bajo (Tabla 5), seguido de los sitios SD1, AT1, AT2 y VC2, el tercer grupo con los valores más altos lo conforman los sitios con vegetación abierta y cerrada donde no hubo diferencias significativas entre ellos; en este tercer grupo sorprende que los sitios con vegetación abierta presenten los mayores contenidos de materia orgánica en el suelo, que los lugares con vegetación cerrada (Fig. 6) en donde se esperaría que tuvieran mayor cantidad de residuos orgánicos debido a la alta densidad de plantas y donde hay un aporte constante de residuos vegetales en comparación a suelos que han sido alterados principalmente por uso agrícola.

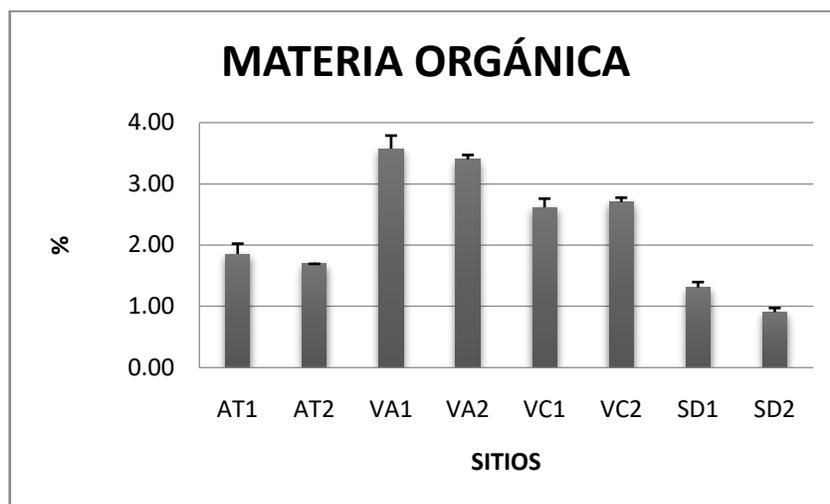


Figura 5. Variación de la materia orgánica del suelo (promedio y error estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

Con base en lo anterior se puede argumentar que el sitio VA-1 presentó mayor contenido de materia orgánica debido al tipo y patrón de vegetación que tiene, constituido de arbustos de nopales (*Opuntia sp.*) muy espaciados unos de otros, que dejan entre ellos grandes espacios o huecos los cuales son aprovechados por gramíneas que cubren la totalidad del suelo (Fig. 4), este patrón de distribución permite que las gramíneas dominen y aporten buenos contenidos de materia orgánica año con año enriqueciendo al suelo con sus restos. En cambio en la vegetación cerrada el patrón cambia ya que está constituido por parches densos o agrupaciones de arbustos los cuales ocupan la mayor superficie del terreno dejando menos espacio para las herbáceas y gramíneas, en este sentido los arbustos contribuyen con menores contenidos de residuos orgánicos en comparación con las gramíneas, porque presentan un ciclo de vida más largo que el de las gramíneas que son anuales. La materia orgánica resulta ser para muchos investigadores uno de los indicadores más eficaces para la evaluación de la actividad microbiana ya que están estrechamente relacionados (Quiroga *et al.*, 2017).

El contenido de nitrógeno, no presentó diferencias significativas (Tabla 6) entre los distintos sitios de muestreo, como se puede observar (Tabla 5) los valores fluctuaron entre contenidos bajos y moderados, el nitrógeno es un elemento fundamental para el desarrollo de las plantas y la degradación de la materia orgánica, el contenido bajo de nitrógeno indica que la tasa de descomposición de la MO es lenta, como consecuencia del tipo de clima seco y del tipo de MO, la cual está constituida por compuestos resistentes a la transformación (ligninas, celulosas, etc.), por otra parte el bajo contenido de nitrógeno es un indicador de la baja actividad microbiana, los cuales no cuentan con las condiciones ambientales adecuadas y con los nutrientes suficientes para llevar a cabo dicho proceso (Cantú y Díaz, 2018).

Madrigal *et al.*, 2019 mencionan que la concentración y almacenamiento tanto del carbono como del nitrógeno dependen de algunos factores tales como la cobertura vegetal, el relieve, el suelo, el agua, y los microorganismos. El nitrógeno total es parte de los residuos vegetales y animales depositados en el suelo, son degradados y almacenados en la MO; dependiendo de su forma química, puede desempeñar su función nutricional, promover el crecimiento y la productividad. Celaya y colaboradores (2015) en un estudio en suelos de

una zona semiárida reportaron que el contenido de nitrógeno total es mayor en parcelas con cubierta vegetal, por lo que en zonas áridas es de vital importancia las especies arbóreas como formadoras de islas de fertilidad.

La relación C/N muestra valores considerados como normales en todos los casos, los cuales presentan algunas diferencias significativas entre los distintos sitios, de acuerdo con la prueba de Tukey se forman 3 grupos en los que los sitios VA-1 y VA-2, se separan de los demás presentando los valores óptimos 13.08 y 12.6 respectivamente, por lo que ambos sitios se presenta una buena relación de carbono y nitrógeno. Por otra parte, los suelos de las parcelas agrícolas son las que tienen los valores más bajos, revelando que la materia orgánica presente ahí es de fácil degradación, lo más probable es que sean residuos de cosechas y malezas. La relación C/N es una manera rápida de evaluar la calidad de los residuos orgánicos presentes en el suelo, los cuales son esenciales para la aportación de nutrientes necesarios en el crecimiento de los cultivos y para el mantenimiento de la actividad microbiana (USDA, 2019). La relación C/N indica la dificultad o facilidad de degradación de los residuos orgánicos y así como la movilización y disponibilidad del nitrógeno para las plantas. Gamarra (2018) menciona que los valores óptimos para esta propiedad indicadora oscilan entre 10-14, Isaza-Arias en 2009 menciona que el rango óptimo C/N deben estar entre 15-20, valores por encima de los establecidos indicarían que el tipo de materia orgánica presente en el suelo es resistente a la descomposición por lo que el proceso de transformación será lento, por el contrario, valores bajos corresponden a una velocidad mayor en la mineralización.

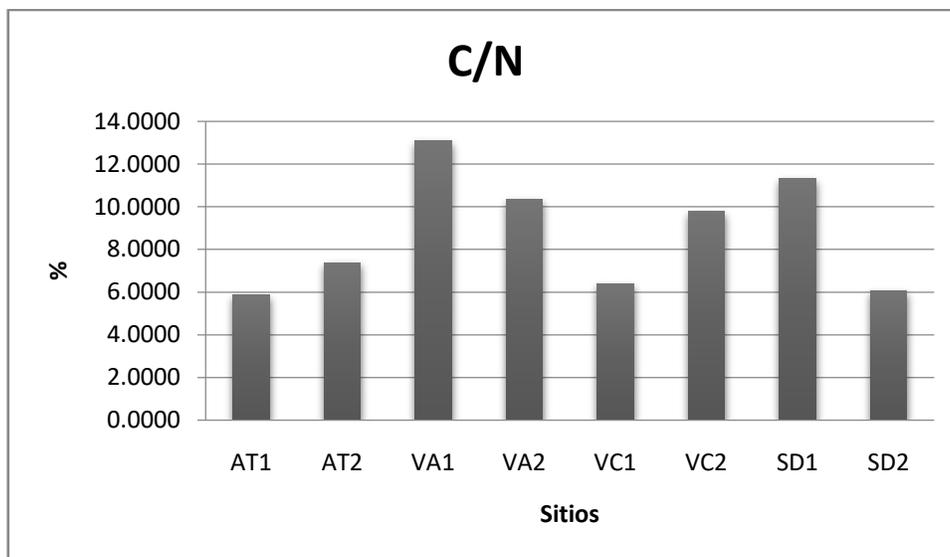


Figura 6. Variación de la relación carbono-nitrógeno del suelo (promedio y error estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

Respecto al carbono activo, oxidable o lábil, por lo regular constituye del 7-21% del total de la materia orgánica, este carbono es el que realmente es usado y transformado por microorganismos con una vida útil de 10-25 años (Gilsanz y Peralta, 2015). El carbono lábil en las muestras obtenidas, presentó diferencias significativas el valor más elevado se presentó en el sitio de vegetación abierta (VA-2) seguido del sitio AT-1, los valores más bajos se encontraron en el suelo desnudo, en este sentido Ginebra et al., (2015) menciona que estudios recientes han comprobado que el carbono lábil está muy relacionado al carbono añadido por los residuos de la cobertura vegetal y de las cosechas. En los sitios con vegetación abierta se presentó mayor contenido de materia orgánica (Fig.5), esto coincide con los contenidos de esta propiedad por lo que se puede decir que el carbón oxidable es mayor, esto indica que el tipo de materia orgánica proveniente de las gramíneas representa la mayor fuente de carbón lábil y menos resistente a la biodegradación en el suelo estudiado.

Por otra parte es importante mencionar que los microorganismos del suelo actúan principalmente sobre la materia orgánica lábil de donde obtiene el carbono de una manera más rápida. (Julca et al., 2006; USD, 1999; Martínez et al., 2008) con esto, se infiere que

existe una baja actividad biológica en los sitios con el menor contenido de carbono tal y como ocurre en los suelos desnudos.

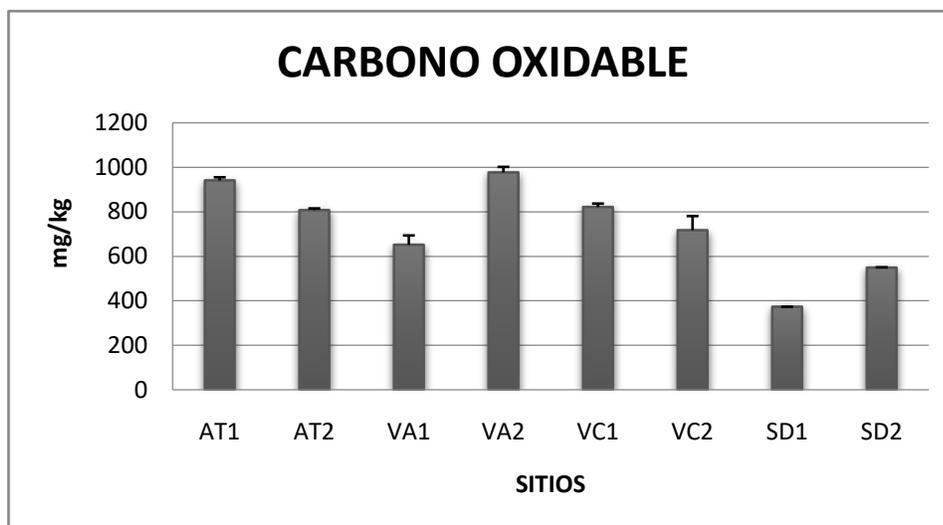


Figura 7. Porcentaje del carbono lábil (promedio y desviación estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

Los valores de pH también presentaron diferencias significativas entre el suelo de los distintos sitios, siendo los suelos desnudos (SD) y vegetación abierta-2 (VA-2) (Tabla 5), los de mayor tendencia hacia la acidez, esto puede estar relacionado con una mayor lixiviación en estos sitios lo que genera una menor concentración de bases en esos lugares. Para el caso del sitio VA-2 hay que considerar que también el valor de pH se ve afectado por el efecto acidificante que tiene la materia orgánica y a su proceso de degradación (Muñoz et. al., 2009; Martínez et al., 2008) seguido de los demás sitios que mostraron valores cercanos a la neutralidad. Quichimbo (2012) menciona que los suelos con cobertura vegetal sin alteraciones tienden a mostrar un valor de pH ligeramente más elevado que las coberturas antropizadas con pH cercanos a un valor igual a 4.94. El pH del suelo afecta al crecimiento poblacional de microorganismos, un valor de pH de 6.6 a 7.3 es propicio para las actividades microbianas que contribuyen a la disponibilidad de nitrógeno, azufre y fósforo en los suelos. De acuerdo a lo anterior y como se observa en la Fig.8, el

sitio AT1 y los de vegetación cerrada son los que presentan una condición óptima respecto al pH

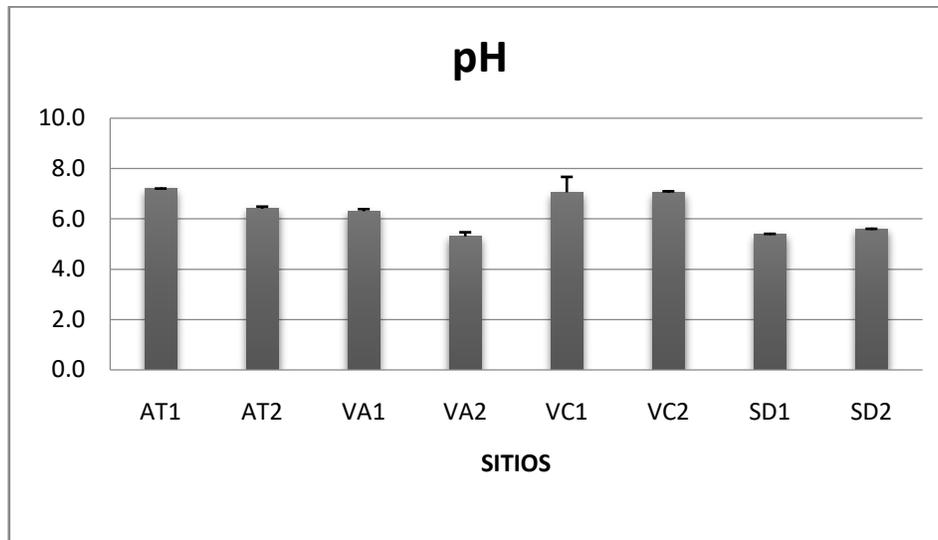


Figura 8. Variación del pH del suelo (promedio y desviación estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

El pH es una propiedad, que como ya se mencionó anteriormente es un factor importante en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, ya que influye directamente en la movilidad y el intercambio de iones en solución del suelo debido a la presencia de moléculas coloides como las arcillas y la materia orgánica (USDA,1999).

La capacidad de intercambio catiónico total (CICT) también mostró diferencias significativas en algunos de los sitios, el suelo con vegetación cerrada VC, fue el más alto en esta propiedad 8 (Fig. 9), lo que puede interpretarse en el sentido de que estos sitios cuentan con materia orgánica de mejor calidad, es decir, rica en sustancias húmicas. Se ha comprobado que las sustancias húmicas son potentes promotores del proceso de intercambio catiónico, superando con mucho a las arcillas (Martínez et al., 2008). Por otro lado, algunos estudios han demostrado que en los suelos con menor cantidad al 25% de arcilla y mayor contenido de MO, la CIC también se ve influenciada por el pH del suelo (Cruz-Macías, et al., 2020). Porta (2019) menciona que un valor de pH 7.0 en suelo es el

indicado para el intercambio de iones, por el contrario valores de pH cercanos o elevados en acidez la capacidad de intercambio catiónico disminuye, esto coincide con lo reportado anteriormente, ya que como se observa en los sitios de VC, son los que en promedio tienen un pH de 7.0 y aunque el sitio de AT-1 también maneja un valor de pH parecido (Fig.8) Tinal-Ortíz et al., 2020, menciona que propiedades químicas como CIC son afectados por la labranza manejo de suelos.

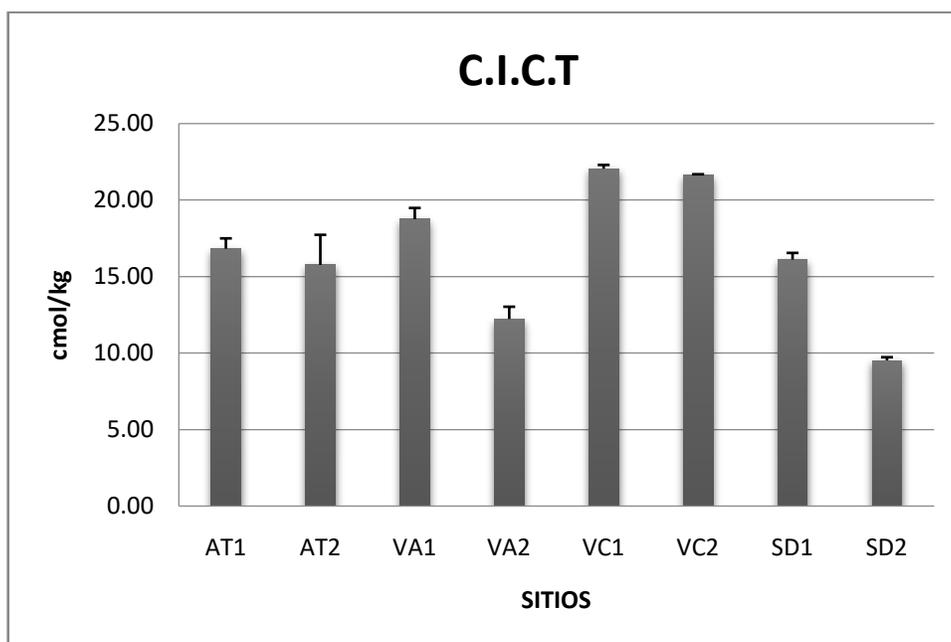


Figura 9. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico CIC (promedio y desviación estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

El sitio VA2 y los que tienen suelo desnudo son los muestran un intercambio de cationes deficiente, lo que indica que hay poca capacidad de retener cationes, muy probablemente a la escases de MO en estado coloidal.

Por otra parte, el fósforo asimilable también mostró diferencias significativas entre los sitios, resulta sorprendente los valores altos de los sitios VC1, y los AT, lo cual no es muy común que ocurra (Tabla 6), la explicación más probable al respecto está en el pasado agrícola de estos lugares, por lo que los sitios con AT son de los que presentaron los

valores más elevados (Tabla 1). Por el contrario, el sitio (VA-1) mostró valores muy bajos. Esto coincide con lo reportado por algunos autores que mencionan que el alto contenido de P en sistemas agrícolas se debe principalmente al retorno del fósforo en los residuos vegetales o bien a los fertilizantes utilizados para el mejoramiento de la fertilidad del suelo (Tinal-Ortíz et al., 2020). Cabe mencionar que el fósforo orgánico es un producto de la descomposición mineralizable de la materia orgánica; Galantini, 2007 menciona que el trabajo de labranza en suelos de uso agrícola rompe los agregados y a su vez se acelera el proceso de descomposición biótica, debido a este proceso el fósforo orgánico pasa a formas disponibles para los cultivos, esto se ve reflejado en los resultados de carbono lábil antes mencionados. Una de las propiedades que influyen directamente en la absorción de los fosfatos, es el pH del suelo. Generalmente la concentración de fosfatos es elevada en los suelos que presentan un pH óptimo lo que coincide con los valores promedios de pH 7.2, 6.4, 7.0 respectivamente para los sitios AT-1, AT-2 y VC-1.

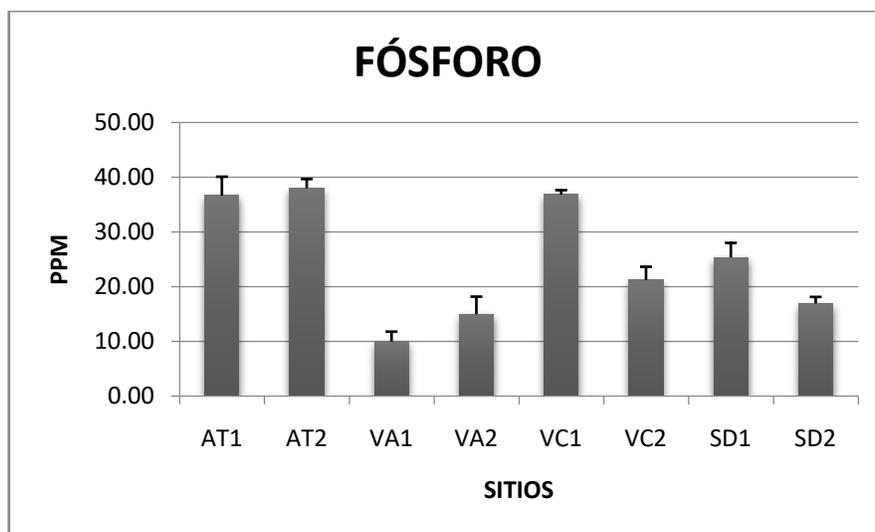


Figura 10. Resultados de la cantidad de fósforo asimilable en el suelo (promedio y desviación estándar) entre los diferentes sitios de muestreo. AT= Agricultura Temporal, VA= Vegetación Abierta, VC= Vegetación Cerrada, SD=Suelo Desnudo.

6.2. Índice calidad de suelo (ICS).

Con los promedios de cada propiedad en los diferentes sitios de muestreo se calculó un índice para evaluar la calidad o eficiencia del funcionamiento biológico del suelo, basado principalmente en el modelo propuesto por Cantú (2007) y Muñoz (2017) y ponderando los valores de cada propiedad basándose en el índice propuesto en la Universidad de Jaen, a continuación, se presentan los resultados obtenidos del ICS, de cada condición evaluada:

Tabla 8. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo al funcionamiento biológico del sitio agricultura de Temporal 1. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado

Agricultura Temporal- 1					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	1.85	0.36	1.00	0.36
C. Lábil	>Mejor	940.78	0.94	1.00	0.94
Fósforo	>Mejor	36.63	0.95	1.00	0.95
Raíces	>Mejor	0.12	0.00	0.25	0.00
CIC	>Mejor	16.82	0.58	0.75	0.44
pH	Independiente	7.2	1.00	0.50	0.50
Profundidad	>Mejor	21.30	0.93	1.00	0.93
Compactación	<Mejor	263.00	0.42	0.50	0.21
Arenas	Independiente	54.00	1.00	0.25	0.25
Limos	Independiente	24.67	0.75	0.25	0.19
Arcillas	Independiente	24.67	0.75	0.25	0.19
C/N	Independiente	5.89	0.500	1.000	0.50
			0.68		0.45
			ALTA CALIDAD		MODERADA CALIDAD

Tabla 9. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Agricultura de temporal 2. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Agricultura Temporal- 2					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	1.69	0.30	1.00	0.30
C. Lábil	>Mejor	807.03	0.72	1.00	0.72
Fósforo	>Mejor	38.00	1.00	1.00	1.00
Raíces	>Mejor	0.16	0.06	0.25	0.01
CIC	>Mejor	15.77	0.50	0.75	0.37
pH	Independiente	6.4	0.75	0.50	0.38
Profundidad	>Mejor	12.70	0.24	1.00	0.24
Compactación	<Mejor	344.00	0.13	0.50	0.07
Arenas	Independiente	62.00	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	19.33	0.25	0.25	0.06
Arcillas	Independiente	18.67	0.50	0.25	0.13
C/N	Independiente	7.390	0.75	1.000	0.75
			0.50		0.35
			MODERADA CAL		BAJA CALIDAD

Tabla 10. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Vegetación abierta 1. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Vegetación Abierta- 1					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	3.57	1.00	1.00	1.00
C. Lábil	>Mejor	651.51	0.46	1.00	0.46
Fósforo	>Mejor	9.97	0.00	1.00	0.00
Raíces	>Mejor	0.40	0.38	0.25	0.10
CIC	>Mejor	18.76	0.74	0.75	0.55
pH	Independiente	6.30	0.75	0.50	0.38
Profundidad	>Mejor	17.73	0.49	1.00	0.49
Compactación	<Mejor	147.00	0.83	0.50	0.42
Arenas	Independiente	63.33	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	14.67	0.25	0.25	0.06
Arcillas	Independiente	22.00	1.00	0.25	0.25
C/N	Independiente	13.08	0.750	1.000	0.75
		0.62		0.39	
		ALTA CALIDAD		MODERADA CALIDAD	

Tabla 11. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Vegetación abierta 2. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Vegetación Abierta- 2					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	3.40	0.94	1.00	0.94
C. Lábil	>Mejor	976.55	1.00	1.00	1.00
Fósforo	>Mejor	14.97	1.41	1.00	1.41
Raíces	>Mejor	0.40	0.39	0.25	0.10
CIC	>Mejor	12.23	0.22	0.75	0.16
pH	Independiente	5.30	0.50	0.50	0.25
Profundidad	>Mejor	19.50	2.41	1.00	2.41
Compactación	<Mejor	134.00	0.88	0.50	0.44
Arenas	Independiente	57.00	1.00	0.25	0.25
Limos	Independiente	19.00	0.25	0.25	0.06
Arcillas	Independiente	24.00	0.75	0.25	0.19
C/N	Independiente	20.61	0.75	1.00	0.75
		0.87		0.66	
		MUY ALTA CALIDAD		ALTA CALIDAD	

Tabla 12. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Vegetación cerrada 1. VR= Valor real VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Vegetación Cerrada- 1					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	2.61	0.64	1.00	0.64
C. Lábil	>Mejor	821.03	0.74	1.00	0.74
Fósforo	>Mejor	36.82	0.96	1.00	0.96
Raíces	>Mejor	0.58	0.64	0.25	0.16
CIC	>Mejor	22.05	1.00	0.75	0.75
pH	Independiente	7.05	1.00	0.50	0.50
Profundidad	>Mejor	22.34	1.00	1.00	1.00
Compactación	<Mejor	99.00	1.00	0.50	0.50
Arenas	Independiente	43.00	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	33.00	0.50	0.25	0.13
Arcillas	Independiente	24.00	0.75	0.25	0.19
C/N	Independiente	6.41	0.75	1.00	0.75
			0.81		0.54
			MUY ALTA CALIDAD		ALTA CALIDAD

Tabla 13. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Vegetación cerrada 2. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Vegetación Cerrada- 2					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	2.70	0.67	1.00	0.67
C. Lábil	>Mejor	716.83	0.57	1.00	0.57
Fósforo	>Mejor	21.19	0.40	1.00	0.40
Raíces	>Mejor	0.84	1.00	0.25	0.25
CIC	>Mejor	21.65	0.97	0.75	0.73
pH	Independiente	7.05	1.00	0.50	0.50
Profundidad	>Mejor	28.00	1.00	1.00	1.00
Compactación	<Mejor	117.00	0.94	0.50	0.47
Arenas	Independiente	68.67	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	20.00	0.75	0.25	0.19
Arcillas	Independiente	11.33	0.25	0.25	0.06
C/N	Independiente	9.79	1.00	1.00	1.00
			0.78		0.50
			ALTA CALIDAD		MODERADA CALIDAD

Tabla 14. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Suelo Desnudo 1. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Suelo Desnudo- 1					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	1.31	0.15	1.00	0.15
C. Lábil	>Mejor	373.13	0.00	1.00	0.00
Fósforo	>Mejor	25.36	0.55	1.00	0.55
Raíces	>Mejor	0.60	0.67	0.25	0.17
CIC	>Mejor	16.11	0.53	0.75	0.39
pH	Independiente	5.40	0.25	0.50	0.13
Profundidad	>Mejor	11.10	0.16	1.00	0.16
Compactación	<Mejor	159.00	0.79	0.50	0.39
Arenas	Independiente	66.67	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	14.00	0.25	0.25	0.06
Arcillas	Independiente	19.33	0.50	0.25	0.13
C/N	Independiente	11.31	1.00	1.00	1.00
			0.47		0.28
			MODERADA CALIDAD		BAJA CALIDAD

Tabla 15. Resultados del cálculo del índice de calidad del suelo de acuerdo con el funcionamiento biológico del sitio Suelo Desnudo 2. VR= Valor real, VN= Valor normalizado, VP= Valor ponderado.

Suelo Desnudo- 2					
Propiedad		VR	VN	CRITERIO	VP
Mat. Orgánica	>Mejor	0.90	0.00	1.00	0.00
C. Lábil	>Mejor	548.87	0.29	1.00	0.29
Fósforo	>Mejor	16.93	0.25	1.00	0.25
Raíces	>Mejor	0.33	0.30	0.25	0.07
CIC	>Mejor	9.52	0.00	0.75	0.00
pH	Independiente	5.60	0.50	0.50	0.25
Profundidad	>Mejor	7.80	0.00	1.00	0.00
Compactación	<Mejor	382.00	0.00	0.50	0.00
Arenas	Independiente	64.00	0.75	0.25	0.19
Limos	Independiente	20.00	0.75	0.25	0.19
Arcillas	Independiente	16.00	0.50	0.25	0.13
C/N	Independiente	6.07	0.75	1.00	0.75
			0.34		0.18
			BAJA CALIDAD		MUY BAJA CALIDAD

Los valores brutos (sin ponderar) obtenidos del índice indican que el suelo del sitio Vegetación abierta-2 fue el que tuvo el valor más alto (0.66), entrando en la categoría de “muy alta calidad”, seguido de los sitios vegetación abierta-1, vegetación cerrada-1,2 y agricultura temporal- 1 considerados como de “moderada calidad”. Los sitios con agricultura temporal -2 y suelo desnudo-1 se ubicaron en la categoría de “baja calidad”; y por último el sitio con la calidad más baja resultó ser el suelo desnudo-2 clasificado como de “muy baja calidad” (Fig.11).

Y con la ponderación de los datos, los resultados variaron un poco ya que el suelo con una mejor calidad fue el de la vegetación cerrada -1 y vegetación abierta-2, colocándose dentro de la clasificación de “muy alta calidad”, seguido de los sitios de agricultura temporal -1, vegetación abierta-1, vegetación cerrada- 2 ubicados en la clasificación de “alta calidad”. Los sitios con una “moderada calidad” son agricultura temporal- 2 y suelo desnudo- 1, por último, el suelo desnudo- 2 fue el que obtuvo el valor más bajo considerándose de “baja calidad” (Fig. 12).

Es importante señalar que la ponderación de las propiedades permite obtener resultados más reales y confiables, ya que regula el peso específico que tiene cada propiedad en el funcionamiento del suelo, dado que no todas las propiedades participan con la misma intensidad y tienen el mismo peso. En la mayoría de los casos los valores del índice estuvieron influenciados principalmente por los bajos valores de la materia orgánica, lo que a su vez influyó en otras propiedades tales como la estabilidad de agregados, valores de nitrógeno muy bajos, la relación C/N, la capacidad de intercambio catiónico y pH.

Cabe mencionar que el índice de calidad resultó ser una herramienta útil porque selecciona, sintetiza e integra solo propiedades involucradas directa o indirectamente con el funcionamiento biológico, lo que permite obtener una valoración cuantitativa, además permite identificar con claridad que propiedades y/o procesos son los responsables de los problemas de un mal funcionamiento del suelo, lo que ayuda a realizar diagnósticos más certeros, mismos que facilitaran la aplicación de las medidas correctivas. Por último, la valoración y comparación que se hace es únicamente entre los suelos de los sitios seleccionados, hay que tomar en consideración que si se pretende comparar estos resultados con otros índices de suelos obtenidos bajo otro contexto geográfico y ambiental,

los resultados podrían ser muy distintos, por lo que en definitiva, no es posible hacer este tipo de comparación.

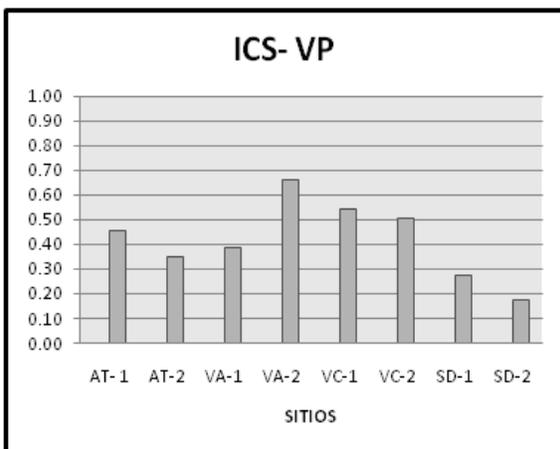


Fig.11 Índice de calidad de suelo (ICS) con los valores ponderados (VP) para cada sitio según el modelo de Cantú (2007).

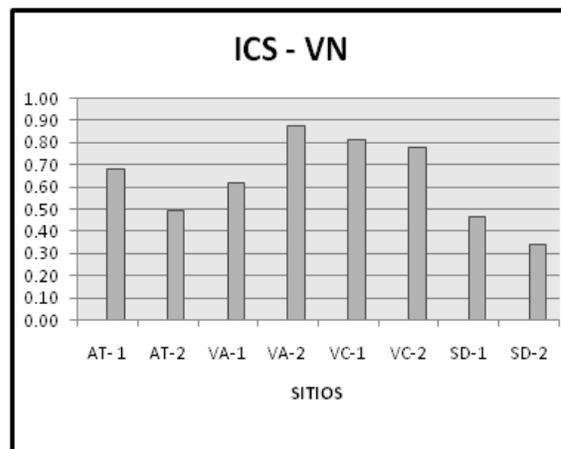


Fig.12 Índice de calidad de suelo con los valores normalizados (VN) para cada sitio según el modelo de Cantú (2007).

7. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos indican que el funcionamiento biológico del suelo estudiado en general es acorde para un suelo de una región semiárida, en lo particular, las diferencias detectadas obedecen a distintos tipos de cobertura y manejo que recibe cada uno de los sitios estudiados, todo esto condicionado por el clima de la localidad.
- Las propiedades que mejor reflejaron las diferencias en el funcionamiento biológico y calidad del suelo fueron: el contenido y tipo de materia orgánica, carbono lábil, relación C/N, profundidad del suelo, intercambio catiónico total y la compactación.
- Los principales contrastes en cuanto a los procesos y el funcionamiento biológico de cada sitio, se deben principalmente a la cantidad y calidad de los residuos orgánicos del suelo, esto determinó discrepancias de los valores de la relación C/N, carbón oxidable, materia orgánica y contenido de nitrógeno. Otros factores que también condicionan la actividad biológica del suelo son la profundidad útil y la compactación,
- Los resultados obtenidos muestran que el tipo la cobertura y uso del suelo influyeron significativamente en los valores de la mayoría de las propiedades que fueron evaluadas, lo que repercutió en los valores del índice de calidad obtenido y en el funcionamiento biológico del suelo.
- Aunque la mayoría de los sitios el ICS apenas supera el 60%, los suelos de sitios con vegetación cerrada y abierta fueron los que tuvieron los valores más altos y por ende los que mejor funcionamiento biológico y mejor calidad tienen respecto a los sitios carentes de vegetación (suelos desnudos) o a los sitios con un manejo de uso agrícola (agricultura temporal).
- El índice de calidad de suelo propuesto por Cantú (2007) modificado por Muñoz et al. (2017) y el método de ponderación por la Universidad de Jaen, resultó ser una herramienta de gran ayuda para conocer evaluar la calidad del suelo, porque si mostró las diferencias de funcionamiento del suelo en los distintos sitios evaluados.

8. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, Y., & Paolini, J. (2006). Dinámica de la biomasa microbiana (C y N) en un suelo de la Península de Paraguaná tratado con residuos orgánicos. *Multiciencias*, 6(2), 180-187.

Almendros Martín, G., González Pérez, J. A., González Vila, F. J., & Rosa Arranz, J. M. (2021). El suelo y la importancia del humus.

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems&environment*, 90(1), 25-45.

Arámbula, L. T. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.

Arias, N. M. M., Rangel, M. D. C. N., López, I. C. P., Sánchez, E. C., & de la Cruz, J. M. (2018). El suelo y su multifuncionalidad:¿ qué ocurre ahí abajo?. *CIENCIA ergo-sum*, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 25(3).

Arshad, M.A. y Coen, G.M. (1992). Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7. 25-31.

Ayala Niño, F., Maya Delgado, Y., & Troyo Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra latinoamericana*, 36(2), 93-104.

Barrales-Brito, E., Paz-Pellat, F., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C., & Velázquez-Rodríguez, A. (2020). Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 275-288.

Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2).

- Benintende, S. M., Benintende, M. C., Sterren, M. A., Saluzzio, M. F., &Barbagelta, P. A. (2017). Indicadores biológicos: selección, determinación de niveles de referencia y utilización en la construcción de índices. *Ciencia del suelo*, 35(1), 35-46.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., &Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- 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.
- Cabria, F., Calandroni, M., & Monterubbianesi, G. (2002). Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del suelo*, 20(2), 69-80.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A., & Sereno, R. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2).
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2).
- Cantú Silva, I., & 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), 122-151.
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Celaya-Michel, H.& Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.
- Celaya Michel, H., García Oliva, F., Rodríguez, J. C. & Castellanos Villegas, A. E. (2015). Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico

transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link). *Terra Latinoamericana*, 33(1), 79-93.

CONAZA (Comisión Nacional de las Zonas Áridas). 2016.

Disponible: http://www.conaza.gob.mx/transparencia/Documents/Zonas_Aridas.doc

Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones (2007). La conservación de suelos como un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* 83: 5-71.

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra latinoamericana*, 38(3), 475-480.

Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J. & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.

De la Paz Jiménez, M., de la Horra, A., Pruzzo, L. & Palma, M. R. (2002). Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 302-306.

Di Ciocco, C. A., Sandler, R. V., Falco, L. B. & Coviella, C. E. (2014). Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas.

Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, 35. Madison, Wisconsin, USA.

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2004. Carbon sequestration in drylands. Report on World Soil Resources, No.102. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. ISBN 92-5-105230-1.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. FUNCIONES DEL SUELO.

Disponible:<https://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/294325/>

Gabioud E.A., Wilson M.G. & Sasal M.C. 2001. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de le bissonnais en tres órdenes de suelos. Ciencia del Suelo (Argentina) 29(2): 129-139.

Galantini, J. A., Suñer, L.& Iglesias, J. O. (2007). Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. Revista Investigaciones Agropecuarias (RIA-INTA), 36(1), 63-81.

Gallardo, J. F. (2001). Mineralización y humificación de la materia orgánica del suelo consecuencias sobre la contaminación.

Galvis-Spinola, A.& Hernández-Mendoza, T. M. (2004). Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. Interciencia, 29(7), 377-383.

Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P.& Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. Revista mexicana de ciencias forestales, 9(46), 4-26.

García I. C, Hernández F. T.2004. Importancia de la medida de la actividad microbiana en suelos y materiales orgánicos. SoilAce I Conferencia Internacional ECO-BIOLOGÍA del SUELO y el COMPOST. P. 209,210.

García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Pastos y forrajes, 35(2), 125-138.

Ghaemi, M, Astarai, A.R, Emami, H, Nassiri Mahalati, M, &Sanaeinejad, S.H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component

analysis of astanquds- east of mashhad- Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 1005-1020.

Gili, P., Aruani, C., Maero, E., Sánchez, E.& Sagardoy, M. (2007). Cambios biológicos del suelo asociados al manejo de la cobertura vegetal en un huerto orgánico de manzano. *Terra Latinoamericana*, 25(3), 279-286.

Gilsanz, J. C.& Peralta, G. (2015). Determinación de carbono activo en suelos bajo diferentes situaciones productivas en Uruguay. In V Congreso Latinoamericano de Agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata).

Ginebra Aguilar, M., Rodríguez Alfaro, M., Calero Martin, B., Ponce de León, D.& Font Vila, L. (2015). Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*, 36(3), 64-70.

Gonzalez-Quiñones V, Stockdale EA, Banning NC, Hoyle FC, Sawada Y, Wherrett AD, Jones DL, & Murphy DV (2011) 'Soil microbial biomass: Interpretation and consideration for soil monitoring', *Australian Journal of Soil Research*, 49: 287–304.

Guerrero-Ortiz, Pilar Lourdes, Quintero-Lizaola, Roberto, Espinoza-Hernández, Vicente, Benedicto-Valdés, Gerardo Sergio& Sánchez-Colín, María de Jesús. (2012). Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de lupinus. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 355-362.

Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., van Es, H.M., Wolfe, D.W., Moebius-Clune, B.N., Thies, J.E. & Abawi, G.S. (2009). *Cornell Soil Health Assessment Training Manual*, Edition 2.0, Cornell University, Geneva, NY.

Guillen Cruz, G. (2018). Determinación de almacenes de carbono en suelos de áreas verdes urbanas en zonas áridas. Tesis de maestría en Ciencias. Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Hernández-González, D. E., Muñoz-Iniestra, D. J., López-Galindo, F.& Hernández-Moreno, M. M. (2018). Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona

semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCYT Biología Ciencia y Tecnología*, 11(41-42).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Axapusco, México Disponible: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15033.pdf

Isaza-Arias, G. C., Pérez-Méndez, M. A., Laines-Canepa, J. R. & Castañón-Nájera, G. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. *Universidad y ciencia*, 25(3), 233-243.

Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M. & Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Bioagro*, 25(1), 47-56.

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.

M. Ribeiro C. "Relation and change overtime of CN-ratios throughout Swedish peatlands and in seven fertility classes". Master's Thesis in Environmental Science. Swedish University of Agricultural Sciences. 2012, 39 p.

Madrigal Reyes, S., Cristóbal Acevedo, D., Hernández Acosta, E. & Romo Lozano, J. L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201-223.

Martínez, E., Fuentes, J. P. & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

Mausel, P. W. (1971). Soil quality in Illinois—an example of a soils geography resource analysis. *The Professional Geographer*, 23(2), 127-136.

Meléndez, G. (2003). Residuos orgánicos y materia orgánica del suelo. San José: Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. Recuperado el, 8, 57-69.

Meza Pérez, Enrique & GeissertKientz, Daniel (2003). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México . *Foresta Veracruzana*, 5(2),0

Monsalve-C, O. I., Gutiérrez-D, J. S. & Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciências Hortícolas*, 11(1), 200-209.

Muñoz Iniestra, D. J, López G. F, Soler A. A. & Hernández M. M. (2013). *Edafología: Manual de métodos de análisis del suelo*. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México.

Muñoz Iniestra, D. J., Ferreira Ramírez, M., Escalante Arriaga, I. B.& López García, J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 201-210.

Muñoz Iniestra, D. J., Chávez Mosqueda, M., Godínez Álvarez, H. O.& Cuéllar Arellano, N. A. (2017). Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 123-133.

Pankhurst, C., Doube, B.M. & Gupta, V.V.S.R. , 1997. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, Wallingford.

Philippot, L.&Germon, J. C. (2005). Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. In *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions* (pp. 159-176). Springer, Berlin, Heidelberg.

Porta, C. J., López, A. M. & Poch, R. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos* Tercera edición. España, Madrid.: Mundi-Prensa Libros.

Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O. A.& Méndez-Marzo, M. A. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agronomía mesoamericana*, 24(1), 83-91.

Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Peres, G. & Rutgers, M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services: An overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 529-538.

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, 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.

Quiroga, R. A., Galantini, J. A., & Studdert, G. A. (2017). La materia orgánica como indicador de cambios en la calidad de los suelos influenciados por el manejo. Manejo y conservación de suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas, 139-159.

Ribeiro Cabral, M. (2012). Relation and change over time of CN-ratios throughout Swedish peatlands and in seven fertility classes.

Rivera, A. V., Manuell, I., & Godínez, H. (2004). Las costras biológicas del suelo y las zonas áridas. *Ciencias*, 75, 24-27.

Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra (No. 96). Food & AgricultureOrg..

Rojas, J. M., Goytía, S. Y., Roldán, M. F., Mórtoła, N. A., Romaniuk, R. I., & Casco, N. L. (2017). Índice de calidad de suelos aplicado a la producción de Cucurbitáceas (Chaco, Argentina). *Spanish Journal of Soil Science*, 7(3).

Sánchez-Montahud, J. R., Hidalgo, J. C. G., & Abad, J. B. (1996). Efectos de la vegetación y orientación de la ladera en perfiles de humedad en el suelo de un ambiente semiárido del interior de España. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, (22), 81-96.

Schloter, M., Dilly, O., & Munch, J. C. (2003). Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1-3), 255-262.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. Suelos.

Disponible:https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf

Soto-Mora, E. S., Hernández-Vázquez, M., Luna-Zendejas, H. S., Ortiz-Ortiz, E., & García-Gallegos, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(5), 98-102.

SQI-Soil Quality Institute. (1996). Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

Tinal-Ortiz, S., LÓPEZ, D. J. P., Zavala-Cruz, J., Salgado-García, S., Palma-Cancino, D. J., & Hidalgo-Moreno, C. I. (2020). Degradación química en Acrisoles bajo diferentes usos y pendientes en la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *AgroProductividad*, 13(2).

USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. United States Dept. of Agriculture, Agricultural Research Services, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. Disponible:https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_05191.pdf

Vargas-Machuca N. R. (2010). Indicadores biológicos para la evaluación de la calidad de los suelos. XII Congreso Ecuatoriano de la ciencia del suelo. 1-8

Vargas Rojas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos (No. FAO 631.44 G943 2009). FAO, Roma (Italia).

Vásquez, José Rafael, Macías, Felipe, & Menjivar, Juan Carlos. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el Departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*, 25(3), 175-180.

Velázquez G. J. de J., Salinas G. J.R., Potter K.N., Gallardo M. V., Caballero F. H. y Díaz M.P. 2002. Cantidad, cobertura y descomposición de residuos de maíz sobre el suelo. *Terra* volumen 20: número 2.

Weil Ray R, KR Islam, MA Stine, JB Gruver & SE Samson-Liebig (2003) Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. American Journal of Alternative Agriculture Volume 18, Number 1:3-17p.

Zagal, Erick, & Córdova, Carolin. (2005). Soil Organic Matter Quality Indicators in a Cultivated Andisol. Agricultura Técnica, 65(2), 186-197.

Zeng, Q., Darboux, F., Man, C., Zhu, Z., & An, S. (2018). Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). Catena, 167, 276-283.