



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

POSGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN ACRISOL CON DIFERENTES USOS

SANTIAGO DOMÍNGUEZ ANGULO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO

2022

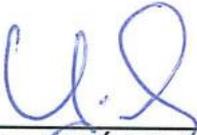
La presente tesis, titulada “**Cambios en las propiedades físicas y químicas de un Acrisol con diferentes usos**”, realizado por el alumno: “**Santiago Domínguez Angulo**”, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESOR:



DR. JOEL ZAVALA CRUZ

ASESOR:



DR. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

H. CÁRDENAS, TABASCO, 30 DE JUNIO DE 2022

CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN ACRISOL CON DIFERENTES USOS

Santiago Domínguez Angulo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El suelo es la principal base productiva de las actividades agropecuarias y forestales por lo que conservar o mejorar sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) es de sumo interés, lo que se logra a través del manejo sustentable del propio recurso. Por esta razón, la meta de este trabajo fue evaluar hasta el horizonte A, el impacto que generan los usos del suelo con pastizal (37.5 años), hule (monocultivo con 6 años), los cultivos intercalados de hule-cacao (6 y 3 años, respectivamente) y hule-caoba (6 y 12 años) con el establecimiento de parcelas de 20x20 m en un suelo ácido en la comunidad de Tecominoacán, Huimanguillo, Tabasco; dentro del área de la Sabana. Las variables evaluadas fueron: densidad aparente, porosidad total, velocidad de infiltración, textura, estabilidad de agregados, desleimiento, resistencia a la penetración, nitrógeno total (Nt % y t ha⁻¹), materia orgánica (MO), carbono orgánico (%), carbono orgánico del suelo (Mg ha⁻¹), P Olsen, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y acidez intercambiable. Por cada parcela se recolectaron cinco muestras (método de cinco de oros). Para clasificar el grupo de suelo de referencia (GSR) se realizó y describió un perfil del cual se tomaron cuatro muestras, una por cada horizonte; según su profundidad. El diseño experimental fue completamente al azar de un factor con cuatro niveles y cinco repeticiones; el análisis de varianza fue de una vía y la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para las medias estadísticamente diferentes. Se descarta la presencia de un Acrisol en el área de estudio, y se confirma la de un Ferric Lixisol (Cutanic, Endoloamic, Epiarenic, Humic, Profondic). Las condiciones del suelo hasta el horizonte A se mantienen en niveles aceptables. En la estimación de pérdida de suelo, el pastizal ha conservado más través del tiempo, por lo tanto almacena más volumen y peso por ha; en caso contrario el uso con hule (monocultivo) es el que más ha perdido suelo del horizonte A, hecho que se evidencia en la disminución de su profundidad, volumen y peso por ha.

Palabras clave: calidad del suelo, materia orgánica, erosión, trópico húmedo, agricultura tropical.

CHANGES IN THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF A ACRISOL WITH DIFFERENT USES

Santiago Domínguez Angulo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The soil is the main productive base of agricultural and forestry activities, so conserving or improving its properties (physical, chemical and biological) is of great interest, which is achieved through the sustainable management of the resource itself. For this reason, the goal of this work was to evaluate up to horizon A, the impact generated by land uses with grassland (37.5 years), rubber (monoculture with 6 years), rubber-cacao intercrops (6 and 3 years, respectively) and rubber-monoculture (6 and 12 years) with the establishment of 20x20 m plots on acid soil in the community of Tecominoacán, Huimanguillo, Tabasco; within the Sabana area. The variables evaluated were: apparent density, total porosity, infiltration rate, texture, stability of aggregates, soil slaking, resistance to penetration, total nitrogen (Nt % y t ha⁻¹), organic matter, organic carbon %, soil organic carbon (Mg ha⁻¹), P Olsen, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and exchangeable acidity. Five samples were collected from each plot (five gold method). To classify the reference soil group (GSR), a profile was made and described from which four samples were taken, one for each horizon; according to its depth. The experimental design was completely randomized with one factor with four levels and five repetitions; the analysis of variance was one way and Tukey's test ($p \leq 0.05$) for statistically different means. The presence of an Acrisol in the study area is ruled out, and a Ferric Lixisol (Cutanic, Endoloamic, Epiarenic, Humic, Profondic) is confirmed. Soil conditions remain at acceptable levels. In the estimation of soil loss, the grassland has conserved more over time, therefore it stores more volume and weight per ha; Otherwise, the use with rubber (monoculture) is the one that has lost the most soil from the A horizon, a fact that is evidenced by the decrease in its depth, volume and weight per ha.

Keywords: soil quality, organic matter, erosion, ecosystem services, tropical agriculture.

Dedicatoria

Agradezco fiel y sinceramente a Dios, primeramente, por darme el conocimiento y permitirme alcanzar esta meta. Así como a mi mamá, Sra. Alma Delia Angulo Pérez y a mis hermanas Jacquelin Domínguez Angulo y Janeth Del Carmen Domínguez Angulo por su apoyo; a mi amada esposa la Mtra. Griseida Cruz Roblero por su valiosísimo apoyo y longanimidad durante mis estudios. De igual manera al †Dr. Sergio Salgado García por el conocimiento que me transmitió, por la disposición y la paciencia que siempre nos tuvo, la amenidad de sus clases, por ser un gran científico del suelo, pero también una gran persona. Y no me olvido de todos mis otros profesores: Al Dr. David J. Palma López, al Dr. Joel Zavala Cruz, al Dr. Rufo Hernández Sánchez; a ellos también les dedico este trabajo porque gran parte de lo aprendido lo recibí de todos ustedes.

Con aprecio sincero les dedico este trabajo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero que proporcionó mediante la beca durante mis estudios de maestría, de igual manera la Colegio de Postgraduados por ser mi casa de estudios y facilitar puntualmente lo necesario para la realización de esta investigación. Así mismo a mis profesores del propio COLPOS: Dr. David J. Palma López, Dr. Joel Zavala Cruz, a la Dra. Nélida Solana Villanueva, Dr. Ángel Galmiche Tejeda, Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinosa, Dr. José Jesús Obrador Olán, Dr. Joaquín Alberto Rincón Ramírez, Dra. Rocío Acosta Pech, Dr. Lorenzo Aceves Navarro; de igual manera a la Dra. Edith Hernández Nataren por las correcciones pertinentes de este trabajo. Agradezco al Dr. Rufo Sánchez Hernández, profesor de la UJAT por fungir como asesor externo. Por otra parte, también expreso mi gratitud al Dr. Isidro Pérez Hernández, profesor de tiempo completo de la Universidad Politécnica del Golfo de México; y al M.C. Alain Lois D'Artola Barceló, (Director del programa educativo Ingeniería en Agrotecnología [IAGRO] en la misma universidad) por el acceso al Laboratorio de Ciencias Básicas 1.

Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio	16
Figura 2. Muestras de suelo de la profundidad muestreada con diferentes usos del suelo, obtenidas con barrena	17
Figura 3. Medida de la profundidad del horizonte A.....	19
Figura 4. Inserción en el suelo del cilindro	20
Figura 5. Medición de la resistencia a la penetración (MPa)	20
Figura 6. Peso del suelo más el peso del aluminio (peso de masa conocida)	21
Figura 7. Muestras de suelo secadas a 105 °C durante 24 h.....	21
Figura 8. Peso del tamiz de 0.25 mm	22
Figura 9. Peso de 10 g de suelo para ensayo de estabilidad de agregados	23
Figura 10. Humectación del suelo	23
Figura 11. Secado del suelo.....	24
Figura 12. Selección de agregados.....	24
Figura 13. Agregados sumergidos en agua purificada	25
Figura 14. Perspectiva de nivel de crecimiento del pasto	28
Figura 15. Corte de pastura.....	29
Figura 16. Compactación promedio del horizonte A por uso del suelo	13
Figura 17. Contenido promedio de fósforo según los de MO	20

Lista de cuadros

Cuadro 1. Aforo de pasto en un Lixisol con diferentes usos en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.....	29
Cuadro 2. Hoja de trabajo del cálculo de materia seca a 65 °C 24 h, en un Lixisol de La Sabana de Huimanguillo, Tabasco.....	30
Cuadro 3. Descripción del perfil de un Lixisol con diferentes usos en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.....	34
Cuadro 4. Análisis de laboratorio de un Lixisol en La Sabana, Huimanguillo, Tabasco.....	35
Cuadro 5. Cantidad de suelo por usos, en La Sabana de Huimanguillo, Tabasco.....	39
Cuadro 6. Láminas de suelo perdidas por erosión.....	40
Cuadro 7. Promedios de los indicadores de la calidad del suelo.....	43
Cuadro 8. Promedio de los indicadores químicos de la calidad del suelo.....	51

Índice

CONSEJO PARTICULAR:.....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
Lista de figuras.....	VII
Lista de cuadros.....	VIII
1. Introducción.....	1
2. Revisión de literatura.....	3
2.1 El suelo.....	3
2.1.2 Servicios ecosistémicos de los suelos.....	3
2.1.3. Degradación de suelos.....	4
2.1.4. Calidad del suelo.....	7
3. Objetivos.....	13
3.1. Objetivo general.....	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
4. Materiales y métodos.....	13
4.1 Área de estudio.....	13
4.1.2 Consideraciones de selección del sitio de estudio.....	14
4.1.3 Descripción de los sitios de muestreo.....	14
4.1.4 Ubicación de las parcelas de estudio.....	15
4.2 Muestreo del horizonte A para análisis físicos y químicos del suelo.....	16
4.2.1 Caracterización y clasificación del suelo.....	16
4.3 Análisis estadístico de varianza (ANOVA).....	30
5 Resultados y discusión.....	30
6 Conclusiones.....	23
7 Literatura citada.....	24
Anexos.....	46

1. Introducción

El uso del suelo, basado en su aptitud y el manejo dado, es clave en el mantenimiento adecuado, tanto de sus funciones y procesos, como de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Germán, 2017). Lo anterior nos remite inevitablemente hacia dos hechos reales: la conservación del suelo y de su calidad para recibir los beneficios (servicios ecosistémicos) o del fomento de procesos erosivos que conducirán hacia la degradación; y en el peor de los casos a la desertificación.

Las actividades agropecuarias y forestales, predominantemente con fines comerciales impactan negativamente el suelo, evidenciándose en el cambio adverso de las propiedades y procesos de los suelos (Klein y Libardi, 2002; Lehmann *et al.*, 2020; Tomiwa *et al.*, 2020). De aquí, se gesta la importancia de medir cualitativa y cuánticamente esas alteraciones con el fin de que proporcionen información del estado y condición del recurso edáfico; lo que se logra con los llamados indicadores de la calidad (Jiménez *et al.*, 2006).

Con relación a los suelos del Tabasco, la SEMARNAT y COLPOS (2003) reportan que el estado ocupa el tercer lugar en superficie con problemas de degradación. Y, con base en Mesa *et al.* (2015), el estado tiene 2.5 millones de ha para uso agrícola, de las cuales tiene uso 240,000 para agricultura y el resto con pastizales para ganadería bajo el sistema de producción extensivo. De manera semejante, Palma-López *et al.* (2007) concuerdan en que la actividad pecuaria predomina bajo el sistema extensivo. Por otra parte, los municipios: Balancán, Huimanguillo, Cárdenas, Macuspana, Centla y Jonuta tienen la mayor superficie de tierras para uso agropecuario y forestal (Mesa *et al.*, 2015).

El manejo del suelo y los demás recursos en el sector agropecuario no ha sido el idóneo, ya que se utilizan grandes cantidades de insumos químicos, prácticas de labranza convencional, sobre pastoreo, carga animal excesiva, malos planeamientos de desarrollo agropecuario, entre otros. De lo anterior existen antecedentes de malas gestiones en proyectos ambiciosos como lo fue el Plan Chontalpa que impactó severa y negativamente, no solo a los suelos, sino la flora, la fauna e incluso la vida social de las personas (Chávez-García *et al.*, 2012;

Trujillo-Narcía *et al.*, 2018). Es a partir de aquí que se motivó la presente investigación, con miras en evaluar el impacto real de los usos y manejos en parcelas ubicadas en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco; área que se caracteriza por sus suelos ácidos y vulnerables ante los procesos erosivos y la degradación; además de los cambios de uso del suelo en años recientes.

2. Revisión de literatura

2.1 El suelo

El «suelo» es un cuerpo natural no consolidado y heterogéneo formado naturalmente en la superficie de la corteza terrestre a partir de la meteorización de la roca madre y la edafogénesis (Buol *et al.*, 2011; Duchaufour *et al.*, 2018).

El suelo es un ente trifásico, pues se conforma por una parte sólida (representada por los minerales y la MO que incluyen la fracción biótica y abiótica), una parte líquida (el agua que junto con los iones forman la solución del suelo) y una parte gaseosa, atmósfera del suelo (Schoonover y Crim, 2015; Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2018). Gracias a que el suelo es un medio poroso, tanto el agua como el aire pueden hallarse en dichos poros (en cierta proporción), cámaras, galerías, etcétera (Porta *et al.*, 2003).

No sorprende, que Tarbuck y Lutegens (2005) conciban el suelo como «El puente entre lo vivo y lo inerte», no obstante, su definición varía según la ciencia que lo estudie, coincidiendo con el interés que se tenga o el uso que pueda sustentar (FitzPatrick, 2011; Gallardo, 2015).

2.1.2 Servicios ecosistémicos de los suelos

El suelo, considerado como recurso natural plurifuncional, provee diversos servicios ecosistémicos y ambientales, que no son más que los beneficios que recibe la humanidad directa o indirectamente por parte de los procesos y funciones que en él acaecen naturalmente; los cuales pueden categorizarse *grosso modo* de la siguiente manera: provisión, cultural, soporte o sustento y de regulación, es preciso enfatizar que actualmente se le ha dado mayor relevancia al suelo precisamente por estos beneficios y bienes que brinda y de los cuales se favorece la sociedad para su bienestar (Onaindia, 2010a; Onaindia, 2010b; Vázquez *et al.*, 2011; Zaccagnini *et al.*, 2014; Marañón y Madejón, 2017; Montañaño *et al.*, 2018; Trujillo-González *et al.*, 2018; FAO y MADS, 2018).

Los suelos, con base en la FAO (2021) proveen el 95 % de los alimentos del mundo, con esto se hace patente que su principal uso e interés general ha sido agropecuario, entendiéndose por *uso de suelo* el fin para el que se utiliza, lo que

implica actuación en él, manipulación traducida en actividades que permitan la producción o extracción de materias primas para las diferentes industrias, además de suplir la necesidad de alimentos de la humanidad (Ramos-Reyes *et al.*, 2004; López *et al.*, 2014; Trucios *et al.*, 2013).

2.1.3. Degradación de suelos

Diversos factores como los ambientales, climáticos, geológicos, edáficos, tecnológicos, económicos, sociales y políticos se conjugan, dando como resultado procesos de degradación del suelo, cuyos efectos disminuyen su calidad (Porta *et al.*, 1999; Trucios *et al.*, 2013).

Y se reflejan en hechos como lo son: el uso, las prácticas inapropiadas e intensivas de los suelos, la ampliación de la frontera agraria hacia suelos sin vocación agrícola, cambios de uso de suelos ilegales, desforestación, cultivos en suelos con pendientes pronunciadas, el crecimiento urbano hacia tierras no aptas por falta de planes de ordenamiento territorial o sin ejecutar, consecuencia de la explosión demográfica, en general la escasa consideración de los requerimientos de un uso en particular con las características y condiciones del ambiente, en conjunto con la casi inexistente planeación que hay por parte de las autoridades; hechos que en su conjunto se convierten en fuentes inductoras de cambios en las propiedades más sensibles de los suelos (Carter, 1996; Alcañiz, 2008; Díaz, 2011; Estevam-Alves *et al.*, 2016; Camargo *et al.*, 2017; Soares, 2018).

Entre los problemas principales que ocasionan todo lo anterior, se enlistan de manera general: la erosión, compactación, sellado, encostramiento superficial, anegación, salinización, disminución de la fertilidad, contaminación, disminución de la biodiversidad edáfica, pérdida de la MO; en suma, estas limitantes reflejan los tres tipos de degradación: física, química y biológica (Porta *et al.*, 2003; Mabit *et al.*, 2007; Bünemann *et al.*, 2018).

Los problemas que padecen suelos son más críticos de lo que se ve, puesto que en el Atlas de suelos de América Latina (Gardi *et al.*, 2014), se destaca que México y Centro América son las regiones más degradadas, mientras que Sudamérica goza de menos afectación, no obstante, sus suelos presentan restricciones, pese a estar en condiciones naturales; en líneas generales, América Latina posee la mayor

superficie de suelos en buenas condiciones en comparación con las otras regiones del globo.

Por otro lado, González *et al.* (2007) reportan que de los problemas del suelo, el principal es la erosión hídrica, ya que 80 % de los suelos a nivel mundial destinados para la agricultura son afectados por este proceso de degradación. McIvor *et al.* (2017), citando a la FAO (2011) menciona que el 25 % de todos los suelos del mundo están degradados, nuevamente la FAO (2017a), reconsidera que mundialmente el 33 % de todos los suelos presentan degradación moderada a alta, con pérdidas de 75 mil billones de toneladas anualmente.

Díaz (2011) observa que el 80 % de las áreas agrícolas en el mundo tienen erosión de moderada a severa, de la cual 10 % de la erosión se considera ligera a moderada, aunque menciona cuál es tipo de erosión.

Al respecto McIvor *et al.* (2017) denotan que aproximadamente el 80 % de los suelos agrícolas en los últimos 20 años, han sido reportados con erosión de moderada a severa y únicamente el 10 % ha sido de ligera a moderada.

Así mismo, Nkonya *et al.* (2011) detallan que a nivel mundial el daño entre la erosión hídrica y la eólica en conjunto suman 83.6 %, 55.7 para la primera y 27.9 % para la segunda, esto al citar resultados del estudio «Global Assessment of Human-Induced Land Degradation (GLASOD)» que fue uno de los trabajos más importantes de evaluación de la degradación del suelo realizado entre 1987-1995 comisionado por la United Nations Environment Program (UNEP) o Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, cuyos hallazgos revelaron que el 38% del área de la superficie terrestre global estaba afectada por la degradación antropogénica, siendo ligeramente degradada, donde el 46 % representa degradación moderada y 15 % está fuertemente degradada; este trabajo nos permite comparar el estado en el que estaba el suelo a finales del siglo pasado, con el actual que arrojan los estudios del presente siglo (Bai *et al.*, 2008).

Con respecto a México, Loredo-Osti *et al.* (2007) afirman que en promedio se pierden 2.75 toneladas de suelo por ha anualmente como consecuencia de la erosión hídrica y eólica, las cuales suman 158.8 millones de hectáreas afectadas. Zamudio y Méndez (2011), señalan que en México el 64 % del territorio nacional tiene algún tipo de degradación, el 23 % se encuentra estable y el 13 %

aparentemente no tiene uso. Por otra parte, Bolaños *et al.* (2016) concluyen que el 76 % del territorio nacional padece cierto grado de erosión hídrica, del cual el 6.79 % atañe algún grado de erosión extrema, el 5.79 % a erosión fuerte, 26.37 % para la erosión moderada, finalmente 37.06 % para la erosión leve. De igual manera, la SEMARNAT (2016) citan el trabajo «Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1: 1 000 000» (SEMARNAT y Universidad Autónoma Chapingo, 2003), y concluye que 42 % del país podría presentar erosión hídrica y 17 de los 32 estados podrían sufrirla en su territorio con porcentajes superiores del 50 %.

En cambio, en este mismo año SEMARNAT y COLPOS (2003) publicaron el estudio «Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250000», cuyos resultados demuestran que el 44.9 % de los suelos son afectados por algún proceso de degradación.

Añaden que, la degradación química predomina con 34 millones de ha, equivalentes al 17.8 % del territorio, detrás está la erosión hídrica con 22.7 millones de ha, representado por el 11.9 %; la erosión eólica con 18.1 millones de ha, 9.5 %, el último lugar lo ocupa la degradación física con 10.8 millones de ha, equivalente al el 5.7 % de la superficie nacional; cabe mencionar el 55.1 % (105.2 millones de ha) no presentan degradación aparentemente. Conviene subrayar que, tanto la erosión hídrica y eólica son procesos degradantes (degradación física).

A juicio de Universidad Autónoma Chapingo (2016), en los suelos agrícolas mexicanos la erosión hídrica predomina con el 23.9 % de la superficie total, donde el grado de erosión es el mayor, y corresponde al 11.3 % de la superficie o 3.6 millones de ha, estando por detrás la erosión ligera con 2 millones de hectáreas.

De igual importancia es la cifra crítica de 177, 642, 000 ha con diferentes grados de degradación, a lado de las 115,894, 600 ha que tienen algún grado de desertificación (Universidad Autónoma Chapingo, 2016). Ante todas estas cifras un tanto incongruentes entre sí, es preciso mencionar que las disimilitudes son consecuencias del uso distinto, tanto de conceptos como de metodologías (Cotler *et al.*, 2007), cuyas observaciones convergen con las de la SEMARNAT (2016), añadiendo que la disparidad de los resultados estriba en que los objetivos valorados son distintos, por lo que dichos resultados no son comparables.

El conjunto de datos sobre degradación de suelos, confirman cuál es el principal problema ecológico del suelo, cuáles son sus causas y las dimensiones que engloba. Tal vez, se comprendería mejor el porqué de estas exorbitantes cifras si se considera lo que argumentan Bautista *et al.* (2004) y Perales *et al.* (2009) acerca de que el suelo no se le ha dado «la atención necesaria» o que «merece», no obstante esta situación comenzó a cambiar desde el año 2013 cuando la FAO en su 38ª asamblea propuso la aprobación de un día en el cual se sensibilizase a la sociedad acerca de la importancia de la salud y gestión sostenible del suelo en junio de ese mismo año, lo que resultó en el Día Mundial del Suelo ratificado finalmente en la conferencia 68ª de la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2013 para que se considerase cada 05 de diciembre como Día Mundial del Suelo, siendo declarado el 2015 como Año Internacional del Suelo (FAO & NRED, 2015; FAO, 2021).

2.1.4. Calidad del suelo

Los problemas de degradación menguan claramente los servicios ecosistémicos (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Por lo que, se le ha dado mayor énfasis a la calidad del suelo, pese a que el concepto y la idea no sean nuevos (Bautista *et al.*, 2004). Pues el término «calidad del suelo» fue utilizado por vez primera en la literatura científica por Mausel (1971). Bünemann *et al.* (2018) mencionan que a partir de los 80's las organizaciones internacionales incipientemente reconocieron la relevancia del suelo, sus problemas de polución y consecuencias directas e indirectas en la salud humana.

De este antecedente pudieron asirse autores posteriores, fue hasta los años 90's cuando se definió formalmente y se integraron los indicadores que permiten su evaluación cuantitativa y cualitativa (Machado y Mielniczuk, 2009).

Alves de Araújo *et al.* (2012) aluden al reporte «Soil and water quality»– An agenda for agriculture» del Natural Research Council -NRCC, 1993- la cual es causante de que el concepto de calidad del suelo se tornase popular. Hasta aquí es preciso saber qué es la calidad del suelo, aunque no existe consenso de su definición y varía según el enfoque, varios autores (Bautista *et al.*, 2004; Alves de Araújo *et al.*, 2012; Burbano, 2017; Bünemann *et al.*, 2018, Calvaruso *et al.*, 2021). Karlen *et al.* (1997)

la definen como la 'capacidad de un tipo de suelo en particular para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado'.

La calidad del suelo es de suma importancia; Burbano (2017) y Cairo-Cairo *et al.* (2017) sostienen que la calidad del suelo es determinante para la sostenibilidad y la permanencia de los servicios ecosistémicos, más aún si se considera que promueve la calidad ambiental, la disminución de las amenazas del suelo, la seguridad alimentaria, y el incremento de interacciones ecológicas, analizando todo esto se percibe que redundante nuevamente en los servicios ecosistémicos y que son de relevancia económica, social y ambiental (Hillel *et al.*, 2005; Vallejo-Quintero, 2013), pues se incluyen atributos de la sostenibilidad como son: la productividad, estabilidad y resiliencia (Astier-Calderón *et al.*, 2002). Es preciso enfatizar, que los atributos de la calidad del suelo son la productividad, calidad ambiental y salud del suelo (Navarrete *et al.*, 2011). Para evaluarse son imprescindibles atributos, cualitativos, físicos, químicos y biológicos, además de sus procesos, cuya ponderación se realiza mediante herramientas llamadas indicadores, definidos según Calvaruso *et al.* (2021) como 'mediciones cualitativas y cuantitativas que permiten la evaluación de las funciones y procesos de los suelos en un momento y sus cambios en el tiempo'.

La conservación, decrecimiento o mejora de las propiedades edáficas, junto con la alteración de los procesos del suelo dependen del uso y manejo. La evaluación de la calidad del suelo habitualmente se efectúa al comparar sistemas de manejo con uno de referencia preferentemente donde no haya intervención antrópica y monitorear la evolución del mismo sistema en el tiempo (Astier-Calderón *et al.*, 2002; Navarrete *et al.*, 2011). Es preciso enfatizar que, los atributos de la calidad del suelo son desde el punto de vista de Navarrete *et al.* (2011), la productividad, calidad ambiental y salud del suelo.

En líneas generales, cada indicador debe elegirse con base en el contexto (agrícola, pecuario, forestal), y partiendo de la idea de que no siempre pueden seleccionarse tantos indicadores, por esta razón debe optarse por aquellos más sensibles a los cambios y los que aporten más información (Castillo-Valdez *et al.*, 2021).

Como se mencionó anteriormente, el suelo está sometido a presión y amenazas constantes que suele desembocar en la pérdida de su capacidad productiva,

alterando también las funciones y sus procesos naturales, vulnerando al mismo tiempo la seguridad alimentaria y el bienestar humano, dada la inseparable interdependencia del suelo y su papel en la biosfera con el mantenimiento de la biodiversidad, la salud y bienestar social con la conservación de los ecosistemas, de aquí emerge la relevancia y urgencia de elaborar políticas acertadas e implementar técnicas que minimicen su deterioro antes de que no se pueda remediar Gardi *et al.*, 2014; López, 2015; FAO, 2016).

2.1.5. Indicadores de la calidad del suelo

La calidad del suelo es de suma importancia en el marco del manejo sustentable de este recurso, para ello es indispensable determinar un conjunto de atributos o indicadores, a través de propiedades físicas, químicas, biológicas o procesos inclusive (Murphy, 2015).

Estos requieren ser caracterizados para cada tipo de suelo, situación y uso específico. Regularmente los atributos son propiedades críticas del suelo relacionadas con procesos (Carter, 1996). Los indicadores de la calidad del suelo son herramientas de medición y de análisis cualitativas y cuantitativas que miden la funcionalidad del suelo mediante sus propiedades, características o procesos que revelan su estado actual y tendencias causadas por los usos y manejos a los que está sometido el propio suelo (Astier-Calderón *et al.*, 2002, García *et al.*, 2012; Lehmann *et al.*, 2020, Tomiwa *et al.*, 2020).

Como se ha dicho, los indicadores pueden contemplar los procesos y las propiedades físicas, químicas y biológicas. Entre las propiedades físicas se encuentran: retención de agua, profundidad de enraizamiento, profundidad del horizonte, escorrentía, color, compactación, estabilidad de agregados, velocidad de infiltración, densidad aparente, resistencia a la penetración y distribución del tamaño de partículas, entre otras.

Respecto a las propiedades químicas pueden enlistarse: el contenido de MO, carbono orgánico del suelo, carbono orgánico total, nitrógeno total (Nt), pH, acidez intercambiable, capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} ; K^+ , Na^+), conductividad eléctrica, metales pesados.

Por otra parte, las biológicas consideradas son: la respiración del suelo, nitrógeno potencialmente mineralizable, biomasa microbiana, enzimas del suelo, estado del cultivo y crecimiento de raíz, hierbas y presión de enfermedades (Awale *et al.*, 2017; Drobnik *et al.*, 2018; Muñoz-Rojas 2018; Dai *et al.*, 2019; Lehmann *et al.*, 2020; Tomiwa *et al.*, 2020).

En consonancia con lo anterior, en este trabajo los indicadores seleccionados fueron:

velocidad de infiltración, definida como la máxima velocidad en la que el agua puede infiltrarse en el suelo en un tiempo dado expresada regularmente en pulgadas de agua por hora (inch h), milímetros por hora (mm h) (Ali 2010; Satyawan and Nimbalkar 2012), o con base en García-Hernández *et al.* (2007) en cm min^{-1} o cm ha^{-1} .

Resistencia a la penetración definida, según López (2002) como 'la capacidad del suelo, en su estado confinado, de resistir la penetración de un objeto rígido'.

Densidad aparente: entendida como una relación entre la masa o peso de una muestra de suelo inalterada secada hasta peso constante a 105 °C durante 24 h y el volumen total, que incluye el espacio poroso (Flores y Alcalá, 2010; FitzPatrick 2017).

Porosidad total: referida como la fracción de volumen total del suelo que está ocupada por el espacio vacío u ocupado por aire o agua (Ramesh *et al.*, 2019).

Estabilidad de agregados: definida por el Instituto de la Calidad del Suelo de la USDA (1999) como 'la cantidad de agregados que se mantienen estables en agua que fluye'. En este análisis se cuantifica la vulnerabilidad de los agregados ante las fuerzas destructivas externas.

Desleimiento: definido como 'la desintegración de los agregados del suelo como resultado de la humectación rápida' (Jones *et al.*, 2021). Sucede cuando los agregados del suelo son inestables para soportar el estrés que genera el agua. Las dos causas son: la expansión de las arcillas cuando adsorben agua o la presión interna de las burbujas de aire que se encuentran en los poros (Francis *et al.*, 2018).

La materia orgánica: al respecto Tan (2011) declara que la materia orgánica del suelo implica a los compuestos de residuos orgánicos muertos, MOS descompuesta,

humus, al igual que todos los productos de la humificación (ácidos húmicos y fúlvicos) y una vasta población biológica viva.

Carbono orgánico total: el carbono como tal es un elemento imprescindible en los compuestos orgánicos que se combina de múltiples maneras con elementos como: el oxígeno, fósforo, nitrógeno, entre otros (Jaramillo, 2004). El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente de la MO, lo que encierra la idea de que el COS total mide únicamente la fracción del contenido de carbono orgánico y no las otras formas, elemental e inorgánico (Bisutti *et al.*, 2004; FAO, 2017b; Laban *et al.*, 2018; Ortiz, 2019).

En general, la MO contiene entre 48 a 60 % de C (Bisutti *et al.*, 2004; Ortiz, 2019). El nitrógeno total (Nt): puede entenderse como la cuantificación de todas las formas de nitrógeno (orgánica e inorgánica) presentes en el suelo (Elizondo, 2006). Del cual entre el 90 y el 98 % del Nt se encuentra en formas orgánicas, es decir no lábil o indisponible para las plantas y microorganismos hasta su mineralización y conversión en formas inorgánicas asimilables; amonio (NO_3^-) y nitrato (NH_4^+) (Mason y Brennan, 2000).

Fósforo (P) asimilable: puede definirse como la capacidad del suelo para suplir los requerimientos adecuados de P para las plantas cuando sea necesario (Pérez *et al.*, 1991; Afif *et al.*, 2013).

La CIC: esta puede entenderse de dos maneras, como la capacidad que tiene el suelo para absorber e intercambiar cationes (Tan, 2011), y matemáticamente como la suma total de los cationes intercambiables; Calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+), sodio (Na^+), aluminio (Al^{3+}) e hidrógeno (H^+) (Mengel y Kirkby, 2000; Bohn *et al.*, 2001).

La Sabana de Huimanguillo, abarca aproximadamente 142,103 ha de las 371,1792 ha del total del municipio; cabe destacar, que Huimanguillo es el municipio con mayor extensión territorial de la entidad tabasqueña, representando el 15.1 % del estado de Tabasco (Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Tabasco, 2016; Ramos *et al.*, 2019; Tinal-Ortiz *et al.*, 2020).

El clima del Sur de la zona de estudio se considera cálido húmedo con lluvias todo el año Af(m) y temperatura media anual de 24 a 26 °C, con base en la clasificación

de Köppen, modificada por García (2004). Por otro lado, en el Centro y Norte el clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am(f) y temperatura media anual de 26 a 28 °C; la precipitación total anual es de 2000 a 3000 mm (Salgado-García *et al.*, 2010; Palma-López *et al.*, 2019).

La Sabana se ubica dentro la zona fisiográfica de lomeríos suaves e inclinado, lo que significa una repetición sistemática de formas del relieve, de lomas convexas (onduladas) o mesiformes de 10 a 60 msnm con pendientes de 1 a 10 % conformadas de una antigua terraza fluvial erosionada (Zavala-Cruz *et al.*, 2017; Tinal-Ortiz *et al.*, 2020).

La edad geológica del área es del Cuaternario Pleistoceno y Terciario Plioceno, con sedimentos de arenas, limos, areniscas y conglomerados (Palma-López *et al.*, 2008; Palma-López *et al.*, 2011; Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2017).

Dominan suelos Acrisoles, ácidos, muy desarrollados, muy intemperizados y lixiviados, se caracterizan por presentar un horizonte Bt con CIC menor de 24 cmol (+) kg⁻¹ de arcilla, saturación de bases inferior de 50 %, en alguna parte del horizonte B dentro de los primeros 125 cm; no tienen horizonte E álbico abruptamente sobrepuesto a un horizonte poco permeable, se consideran poco fértiles, además de presentar altas tasas de fijación de fósforo y abundante saturación de aluminio (Palma-López *et al.*, 2007; Salgado-García, *et al.*, 2017). Los usos del suelo que se han identificado son el pecuario, agrícola, forestal y vegetación de sabana, cuyo origen es antropomórfico y presenta pastos nativos (*Paspalum* sp) e inducidos (*Bracharia humidicola*). En el caso agrícola sobresalen cultivos de piña (*Ananas comosus* L.), limón (*Citrus* spp.), yuca (*Manihot esculenta* Crantz); en lo silvícola predominan: eucalipto (*Eucalyptus urophylla* S. T.), hule (*Hevea brasiliensis*), cedro (*Cedrela odorata* L.) y acacia (*Acacia magium* Will). También se encuentran vegetación secundaria conocida como «acahuales» (Palma-López *et al.*, 2015; Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2017; Murillo-De la Rosa *et al.*, 2019).

El objetivo este trabajo fue identificar el estado del suelo y los cambios en las propiedades físicas y químicas de un Acrisol con diferentes usos, ya que Tabasco ha sido señalado como uno de los tres estados con más degradación química y física ocasionadas por prácticas agrícolas y pecuarias insostenibles, a lo anterior se le

suma la erodabilidad de los Acrisoles, por tanto cualquier estudio que ofrezca datos concretos acerca del estado de los suelos de un agroecosistema permitirá aplicar medidas correctivas para revertir o mitigar los problemas de degradación y erosión, con miras en la sostenibilidad de su manejo (SEMARNAT y COLPOS, 2003; Palma-López *et al.*, 2007a; Zavala-Cruz *et al.*, 2011).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Evaluar los cambios en las propiedades físicas y químicas de un Acrisol bajo diferentes usos, en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

3.2. Objetivos específicos

- Comparar el efecto de los cambios de uso de suelos sobre las propiedades químicas y físicas ligadas con la calidad del suelo.
- Cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica en un Acrisol con diferentes usos.

3.3. Hipótesis

- Las propiedades físicas y químicas del Acrisol son afectadas por el uso con pastizal, mientras que los usos asociados las mejoran.
- Los procesos de degradación de los suelos son más intensos en usos con cultivos de baja cobertura en Acrisoles de Tabasco.

4. Materiales y métodos

4.1 Área de estudio

La Sabana de Huimanguillo se ubica en el suroeste del municipio de Huimanguillo, entre las coordenadas 17° 34' y 17° 56' norte, y 93° 25' y 93° 57' oeste. Colinda al norte con el Plan Chontalpa, al este con planicies del río Mezcalapa, al oeste con el estado de Veracruz, y al sur con la región Sierra.

4.1.2 Consideraciones de selección del sitio de estudio

Se consideró que tanto el grupo de suelo de referencia y la forma del terreno (relieve) fuesen el mismo, a fin de que cualquier cambio en las propiedades físicas y químicas haya sido consecuencia de los distintos usos y formas de manejo.

Se realizaron recorridos de campo para caracterizar los usos del suelo.

Las formas del terreno identificadas fueron: cima, depresión, valle y planicie. Todos los puntos de muestreo cayeron en la forma del terreno cima, ya que las condiciones de muestreo deben ser homogéneas.

4.1.3 Descripción de los sitios de muestreo

Uso con pastizal

Esta parcela cuenta con 25.5 ha, generalmente introducen tres cabezas de ganado bovino bajo el sistema semiestabulado con sistema de pastoreo rotacional alterno. El uso ha sido pecuario desde hace 37.5 años. La superficie total de la propiedad se localiza en tres formas del terreno, cima, depresión y valle.

Uso con Hule

Esta parcela, de acuerdo con el productor, está cultivada con 10 ha con aproximadamente 556 árboles por ha con seis años de establecimiento. El GSR clasificado fue un Lixisol localizado en la cima de una loma y el manejo de la plantación es convencional, puesto que se aplican agroquímicos, tanto para nutrición como fitosanitarios entre los que se encuentran el: Glifosato, Paraquat, Diuron, Cipermetrina, Yaramila, Urea, DAP, KCl, Maxigrow, Bayfolan; en el caso de los fertilizantes sólidos se registran alternativamente dos aplicaciones anuales de entre 30-50 g por cada planta para cada uno de los usos, excepto el pastizal. Se debe agregar que, la preparación de suelo previo al establecimiento de la plantación se ejecutó con labranza primaria y secundaria mecanizada (cuatro pasadas de rastra).

Uso con hule-cacao

Esta parcela cuenta con aproximadamente 4 ha, en la cual hay 2,300 árboles de hule y 1,800 de cacao por ha, cuyas edades son de seis y tres años de establecimiento respectivamente. Se localiza en la cima de una loma, GSR es el mismo que el del uso con hule; el manejo de la plantación es convencional, puesto que se aplican agroquímicos, tanto para nutrición como fitosanitarios. La preparación de suelo previo al establecimiento de la plantación se ejecutó con labranza secundaria mecanizada (cuatro pasadas de rastra).

Uso con hule-caoba

Esta parcela cuenta con 5 ha, para el hule el marco de plantación es de 3x5 lo que da 666.6 plantas por en ha. En lo que concierne a la caoba, el marco de plantación es de 2x3, es decir 1,666 árboles por cada ha. El establecimiento del hule tiene seis años y la caoba tiene doce. Se localiza en la cima de una loma, el GSR es el mismo que para los otros usos y el manejo de la plantación es convencional, puesto que se aplican agroquímicos, tanto para nutrición como fitosanitarios; el manejo es el mismo que el del hule. Se debe agregar que, la preparación de suelo previo al establecimiento de la plantación se ejecutó con labranza secundaria mecanizada (cuatro pasadas de rastra).

4.1.4 Ubicación de las parcelas de estudio

Las parcelas con cultivos de hule, hule-cacao y hule-caoba son propiedad del Sr. Wilber Pulido Izquierdo, mientras que el uso del suelo con pastizal para ganadería bajo sistema semiestabulado con sistema de pastoreo rotacional alterno pertenece al Sr. Aníbal Pulido Valencia (Figura 1). Las áreas de observación se establecieron en las propiedades de los dos productores cooperantes.

El tipo de suelo se verificó mediante barrenaciones de hasta 150 cm de profundidad; se realizaron recorridos de campo y entrevistas semiestructuradas para caracterizar el manejo del suelo y su historial de uso.

En cada uso del suelo se establecieron cuatro parcelas de 20x20 m, las cuales sirvieron como áreas de observación; en el caso de las plantaciones, el muestreo se hizo en los callejones, para el pastizal, en la parte central del área.

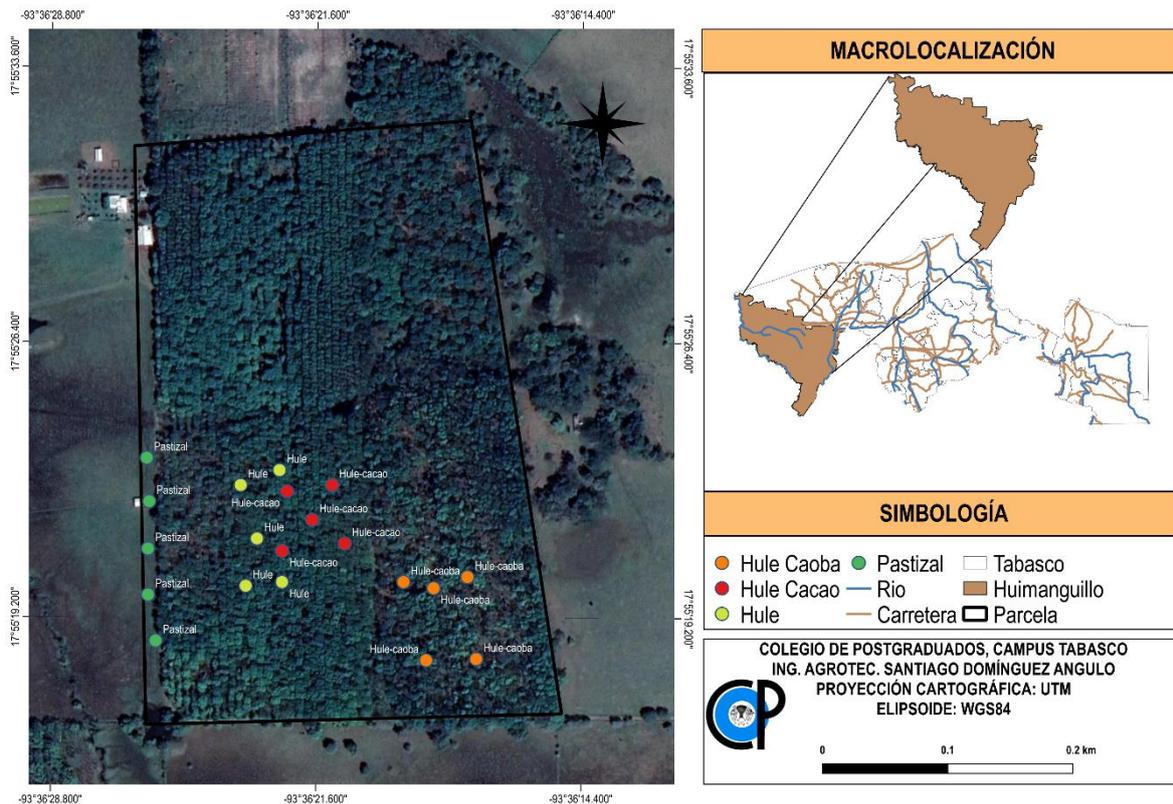


Figura 1. Localización del área de estudio

4.2 Muestreo del horizonte A para análisis físicos y químicos del suelo

De cada parcela con uso distinto se tomaron cinco muestras de suelo del horizonte A, para esto se consideraron cinco puntos: las cuatro esquinas y el centro (método de cinco de oros; con excepción del pastizal que se realizó lineal), de modo que se obtuvieron cuatro usos con cinco repeticiones para obtener 20 muestras en total, las cuales se trasladaron hasta el laboratorio para su secado y análisis nutricional (Nt, P asimilable, K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Cada punto de muestreo se georreferenció.

4.2.1 Caracterización y clasificación del suelo

Se describió un perfil de suelo representativo del sitio donde se encuentran los diferentes usos de la tierra, para determinar los horizontes, con base en el manual de Cuanalo (1990). Del perfil se tomaron cuatro muestras, una por cada horizonte en diferentes profundidades (de acuerdo en la profundidad de cada horizonte): 0-43; 43-84; 84-101 y 101-150 cm (Figura 2), con la descripción *in situ* de los perfiles y los resultados de sus análisis físicos y químicos, se clasificó la unidad de suelo con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB,

2015), usando su versión más actual en español. Las muestras por horizonte se trasladaron al laboratorio para su análisis con los métodos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) para clasificación de suelos.



Figura 2. Muestras de suelo de la profundidad muestreada con diferentes usos del suelo, obtenidas con barrena

Los métodos siguientes se encuentran señalados en la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis

Materia orgánica (MO). Mediante el método AS-07, de Walkley y Black

Textura. A través del método AS-09 por el procedimiento de Bouyoucos

Fósforo P Olsen (mg kg^{-1} de suelo). La determinación del fósforo aprovechable se realizó a través del método AS-10, por el procedimiento de Olsen y colaboradores.

Bases intercambiables (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+}) cmol (+) kg^{-1} de suelo. La determinación de la CIC y bases intercambiables del suelo se realizó a través del método AS-12, con acetato de amonio.

Color. Por el método AS-22 utilizando la carta Munsell de colores de suelos. Efectuada por comparación visual con las tablas de colores de suelos, por comparación visual con las tablas de colores (Munsell, 2000).

Nitrógeno total (Nt %). Se determinó a través del método AS-25, método de Micro Kjeldahl, por procedimientos de digestado.

Nitrógeno total (kg ha⁻¹). Se usó la siguiente fórmula que propone Marín (2011):

$$Nt \text{ t ha}^{-1} = \frac{(\text{peso del horizonte t ha}^{-1})(Nt \%)}{100}$$

Donde: Nt t ha⁻¹= nitrógeno total t ha⁻¹; Nt %= nitrógeno total %

Carbono orgánico total (%) se calculó mediante la siguiente fórmula propuesta por Vela *et al.* (2012):

$$\%CO = \%MO * (0.58)$$

Donde: % CO= carbono orgánico total (%); MO= materia orgánica (%).

Carbono orgánico del suelo (Mg C ha⁻¹) fue calculado mediante la siguiente fórmula que proponen Solís *et al.* (2014):

$$COS = (\%CO)(Dap)(p)$$

Donde: COS= carbono orgánico del suelo en Mg C ha⁻¹; % CO= carbono orgánico total %; Dap= densidad aparente; p= profundidad del horizonte.

Acidez intercambiable. La determinación de la acidez y el aluminio intercambiables por el procedimiento de cloruro de potasio, se realizará a través del método AS-33.

Evaluación de los cambios de las propiedades del suelo, con base en la *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo* del Instituto de Calidad de Suelos (USDA, 1999)

Determinación de la profundidad del horizonte A y extracción de muestra

Para esta determinación se utilizaron los siguientes materiales:

- Bolsas de polietileno transparente
- Marcador tinta indeleble
- Etiquetas
- Cinta métrica

En cada parcela de muestreo se excavó con una pala recta (marca Truper) hasta el límite del horizonte A —identificado por su color pardo-oscuro mediante la carta de colores de Munsell—, cuyo grosor se midió con una cinta métrica en cm (Figura 3). Las muestras se recolectaron en bolsas plásticas con capacidad de dos kilogramos y se etiquetaron con la información de la parcela (uso de suelo) y número (repetición).



Figura 3. Medida de la profundidad del horizonte A

Velocidad de infiltración (cmH₂O h). En la Figura 4 se precia parte de procedimiento.



Figura 4. Inserción en el suelo del cilindro

Resistencia a penetración (MPa). Se midió en campo con un penetrómetro de bolsillo AMS de pistón, marca Addag, modelo 77114 (Figura 5).



Figura 5. Medición de la resistencia a la penetración (MPa)

Determinación de la densidad aparente del horizonte A

Se realizó mediante el método del cilindro de volumen conocido, con base en la metodología propuesta en la *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo* del Instituto de Calidad de Suelos (USDA, 1999). En las figuras 6 y 7 se muestran partes del procedimiento. El cálculo de la Dap, con base en las fórmulas de Ortiz (2019).



Figura 6. Peso del suelo más el peso del aluminio (peso de masa conocida)



Figura 7. Muestras de suelo secadas a 105 °C durante 24 h

Porosidad total del horizonte. Se determinó la Dap en campo y la densidad real en laboratorio para calcular el % de porosidad con la fórmula siguiente:

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

Donde:

φ = porosidad total o espacio poroso (%)

ρ_b = densidad aparente

ρ_p = densidad real, cuyo valor promedio de referencia aceptado es de 2.65 g cm^{-3}

Estabilidad de agregados (porcentaje de agregados estables al agua [% de suelo > 0.25 mm])

Como calgón se utilizó Carbonato de sodio (Na_2CO_3) como agente dispersante en lugar del hexametáfosfato de sodio. 18 g de Na_2CO_3 por cada 1.89 l de agua. En las Figuras 8 a 12 se aprecia parte de los procedimientos.



Figura 8. Peso del tamiz de 0.25 mm



Figura 9. Peso de 10 g de suelo para ensayo de estabilidad de agregados



Figura 10. Humectación del suelo



Figura 11. Secado del suelo

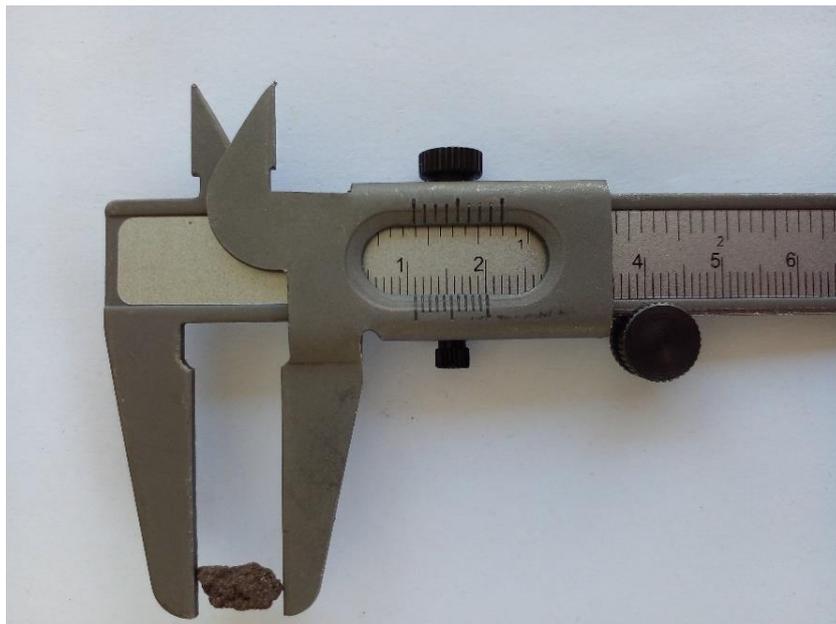


Figura 12. Selección de agregados

Desleimiento. Se realizó, con base en la metodología propuesta en la *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo del Instituto de Calidad de Suelos* (USDA, 1999). (Figura 13).



Figura 13. Agregados sumergidos en agua purificada

Estimación de láminas de suelo perdido en cada uso

Se estimó el volumen y el peso de suelo en $t\ ha^{-1}$ para cada parcela muestreada por medio del dato de la Dap del suelo y la profundidad del horizonte A.

Se compararán los datos con los de un suelo similar de referencia (Alejandro y De la Cruz, 2018; Alejandro-Martínez *et al.*, 2019) con uso de selva o acahual dentro de la zona, para estimar el suelo perdido por ha en cada uso.

Cálculo del volumen del suelo Ortiz (2019):

$$Vs = (ph)(s)$$

Donde:

Vs = volumen del suelo en $m^{-3}\ ha^{-1}$.

ph = profundidad del horizonte en metros.

s = superficie, generalmente se considera $10,000\ m^2$ o 1 ha.

Cálculo del peso del suelo Ortiz (2019):

$$Ps = (Vs)(\rho_b)$$

Donde:

P_s = peso del suelo en $t\ ha^{-1}$

V_s = volumen del suelo

ρ_b = densidad aparente

Para la estimación de la reducción de la profundidad

$$pph = ushmsp - ushmp$$

Donde:

pph = Profundidad perdida del horizonte

ushmsp = Uso del suelo con el horizonte más profundo

ushmp = Uso del suelo con el horizonte menos profundo

La estimación del aforo de pasto se realizó, con base en Michael (2010)

Materiales

- Tijera para podar
- Cuadro de madera de 0.5 m
- Bolsas grandes de polietileno
- Bolsas de papel para pan de 5 kg
- Hoja de trabajo para registro de datos
- Estufa de secado

Procedimientos

1. Se posicionó en el potrero en un lugar que permitiese apreciar toda la pastura para categorizarla a juicio del especialista: alto, medio y bajo. Después de categorizarla, según los distintos niveles de crecimiento se le asignó un porcentaje a cada nivel, es decir atendiendo a la predominancia de cada categoría (Figura 14).
2. Se eligieron tres puntos de muestreo lo más alejados uno del otro por cada nivel de crecimiento. Se eligieron tomar tres muestras por cada nivel de crecimiento, en suma seis. Lo anterior, con base en que cuando se identifican los tres niveles de crecimiento ha de elegirse tres muestras por cada uno para ser en suma nueve, sin embargo

únicamente de detectaron dos niveles de crecimiento. Todos los datos recabados de anotaron en la hoja de trabajo

3. Cuando ya se identificaron los niveles de crecimiento y los puntos de muestro, se lanza al azar el cuadro de madera tres veces para obtener las tres muestras que presentan el pasto que puede encerrar en su área. Donde se posicionó el marco de madera se delimitó el área, quitando el material vegetal que cuya raíz no se encuentre dentro del cuadro para evitar sobre estimación (Figura 15).
4. Cuando el área se delimitó (con el material vegetal dentro de los límites) se cortó casi a ras de suelo, dejando entre tres y siete centímetros de altura, todo el pasto dentro del marco de madera. El marial cortado con la tijera se metió en las bolsas de polietileno debidamente identificadas con la información: categoría y número de muestra.
5. Se pesó inmediatamente antes que perdiese agua y se registraron los datos en la hoja de trabajo para los posteriores cálculos. Como el marco de madera fue de 0.5 m² el peso de las muestras se calcula para 1 m².
6. Los cálculos que se hicieron de la materia fresca fueron: suma de los pesos de las muestras por cada nivel de crecimiento, promedio y promedio ponderado; mediante las siguientes fórmulas:

a. $\sum smc = m_1 + m_2 + m_{...}$

Donde:

Smc: Suma de los pesos de las muestras de nivel de crecimiento

m...= peso de cada muestra de la nivel de crecimiento

El promedio del peso por cada categoría se obtuvo mediante:

b. $\bar{x} = \frac{n_1+n_2+...}{N}$

Donde

\bar{x} = promedio

n= peso de cada muestra de la categoría

N = total de muestras

Para medir la pastura se utilizaron las siguientes fórmulas

Es el producto de la media aritmética de cada nivel de crecimiento por el porcentaje de dominancia o asignado:

$$c. \text{ ponderación} = (\bar{x}) \text{ (\% del nivel decrecimiento asignado)}$$

Donde:

\bar{x} = promedio de cada nivel de crecimiento

Promedio ponderado

$$d. \text{ promedio ponderado } kg \ m^2 =$$

$$\sum \text{ponderación de los niveles de crecimiento} * 1000$$

Pastura ha^{-1}

$$e. \text{ pastura } t \ ha^{-1} = \frac{(\text{promedio ponderado } kg \ m^2)(10,000 \ m^2)}{1,000}$$

Para saber cuánta pastura hay ($t \ ha^{-1}$) en cierta superficie, únicamente se realiza una regla de tres con los datos de la anterior fórmula.



Figura 14. Perspectiva de nivel de crecimiento del pasto



Figura 15. Corte de pastura

Cálculos de materia fresca

Los cálculos se presentan en el Cuadro 1.

La superficie de pasto es de aproximadamente 25.5 ha

Aforo ponderado: 1.728 kg m² (esto es el aforo promedio de toda la finca); (1.728) (10,000 m² [1 ha])= 17,280 kg ha⁻¹ o 17.28 t ha⁻¹

Producción total de forraje: (1.728 kg m²) (255,000 m²)= 440,640 kg en 255,000 m² ó 440.64 t en 25.50 ha

Producción total de forraje por ha: 440,640 kg/25.50 ha= 17,280 kg ha⁻¹

Cálculo de materia seca en laboratorio, con base en Michael (2010). Los datos se muestran en el Cuadro 2.

La materia seca calculada fue de 235.008 t en 25.50 ha⁻¹

La superficie de pastizal es de 25.5 ha⁻¹.

Aforo ponderado: 0.9216 kg m² (esto es el aforo promedio de toda la finca); (0.9216) (10,000 m² [1 ha⁻¹])= 9,216 kg ha⁻¹ ó 9.216 t ha⁻¹

Área total de la finca: (25.50 ha⁻¹) (10,000 m²)= 255,000 m²

Producción total de forraje: (0.9216 kg m²) (255,000 m²)= 235,008 kg en 255,000 m² ó 235.008 t en 25.50 ha⁻¹

Producción total de forraje por ha: 235,000 kg/25.50 ha⁻¹= 10,000 kg ha⁻¹

4.3 Análisis estadístico de varianza (ANOVA)

El diseño experimental fue completamente al azar de un factor con cuatro niveles y cinco repeticiones (cada uso de suelo se consideró un nivel del factor, por lo que es a su vez un tratamiento, siendo las repeticiones el total de muestras por cada factor).

Los datos recolectados se sometieron al análisis de varianza (ANOVA) de una vía y se aplicó la prueba de comparación múltiple medias de Tukey ($p \leq 0.05$) únicamente en los tratamientos que resultaron estadísticamente significativos, mediante el software gratuito Past 4.09 versión 2022 (Fernández *et al.*, 2020) y el complemento Real Statistics para Excel 2013.

5 Resultados y discusión

Entrevista

Tecominoacán, Huimanguillo, Tabasco 19 de marzo de 2021

Entrevistado: Wilber Pulido Izquierdo

Entrevistador: Santiago Domínguez Angulo

1. ¿Cuál es el uso actual de sus suelos?

«Sistema agroforestal, principalmente.»

2. ¿Qué cultiva actualmente?

«Achiote, piña, coco, caña de azúcar, chile habanero, yuca, camote, calabaza, plátano, sandía, cacao, café, pitahaya, hule...»

3. ¿Sus cultivos los distribuye en parcelas separadas o están intercalados?

«Hay parcelas donde únicamente tengo un monocultivo, pero hay otras donde los intercalé.»

4. ¿Aplica fertilizantes?

- a. Sí b) No

«Si la respuesta fue “sí”, diga: cuáles, cómo, cuánto, cuando y cuántas veces:»

«DAP, urea, triple 17, KCl, maxi grow, bayfolán, los aplica 2 veces al año. También aplico Yaramila, acaricidas, Pronil, fungicida cúprico, cipermetrina.»

Yo aplico de 30 a 50 g por planta, pero no sé exactamente cuánto aplicar...

5. ¿Sabe qué usos tenían sus suelos o parcelas antes de que las poseyese?

«Acahuales, selva baja»

6. ¿Qué usos contiguos o aledaños de suelos conoce?

«Pastos, ganadería, cultivos de piña y limón. Pozos petroleros, la pera de PEMEX.»

7. ¿Sabe cómo cuidar sus suelos?

a. Sí

b) No

Si la respuesta fue “sí” diga cómo los salvaguarda.

8. ¿Le interesaría saber el estado de sus suelos?

a. Sí

b) No

9. ¿Colaboraría en una investigación de degradación de suelos consecuencia de sus usos dentro de sus parcelas?

a. Sí

b) No

post scríptum: cerca del lugar se ubica un cuerpo de agua (aprox. a 20 m). Por otro lado, en lo que respecta a la pregunta cuatro y compete al historial del manejo del suelo, únicamente registré los fertilizantes que dijo utilizar el productor.»

Estimación del aforo de pasto

Se identificaron dos niveles de crecimiento de pastura: alto y medio (Cuadro 1 y 2). El área del pastizal ocupa 25.5 ha⁻¹. El cálculo de la pastura muestra que la cantidad de materia vegetal fresca para el momento del estudio era de 440.64 t en 25.50 ha⁻¹ o 17.28 t ha⁻¹. Mientras que la producción total materia seca fue de 255,000 kg/25.50 ha⁻¹= 10,000 kg ha⁻¹

Cuadro 1. Aforo de pasto en un Lixisol con diferentes usos en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

Nivel de crecimiento	Aforo	Σ	Promedio	Representación por nivel de CMTO (crecimiento)	Ponderación	Promedio ponderado por nivel de CMTO
	$g\ m^2$		Σ/n	%		$g\ m^2$
Medio	900	4490	$4,490/3=$	70	$(1,496.666) (0.70\%)=$	1,047.666
	2480		1,496.666			
	1110					
Alto	3,420	6,810	$6,810/3=$	30	$(2,270) (0.30\%)=$	681
	1,250		2,270			
	2,140					
Promedio ponderado del Aforo (peso del pasto)						1,728.666 o 1.728 kg m^2

Cuadro 2. Hoja de trabajo del cálculo de materia seca a 65 °C 24 h, en un Lixisol de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

Nivel de crecimiento	Aforo	Σ	Promedio (Σ/n)	Representación por nivel de CMTO	Ponderación	Promedio ponderado por nivel de CMTO
	$g\ m^2$			%		$g\ m^2$
Medio	460	2,250	$2,250/3=$	70	$(750) (0.70\%)=$	525
	1,200		750			
	590					
Alto	2,190	3,966	$3,966/3=$	30	$(1,322) (0.30\%)=$	396.6
	670		1,322			
	1,106					
Promedio ponderado del Aforo						921.6 g

Clasificación del suelo

No se encontró un Acrisol, ya que los análisis químicos y físicos revelan que es un Ferric Lixisol (Cutanic, Endoloamic, Epiarenic, Humic, Profondic) dadas las siguientes características y propiedades:

Corresponde a un Grupo de Suelo de Referencia denominado Lixisols, en general la diferencia entre un Acrisols y un Lixisols es, los Acrisoles son suelos muy ácidos, presentan baja saturación de bases y lixiviación de cationes básicos, debido a la meteorización, mientras que, los Lixisoles presentan arcillas de baja actividad y alta saturación de bases, meteorización avanzada sin una pérdida marcada de cationes básicos, ya que tiene presencia de arcillas de baja actividad y alta saturación de bases.

Para el presente análisis, en el Lixisol el horizonte Bt1 tiene una suma de bases en 3.75; una de CICE=3.8; PSB= 98 % y una CICE kg⁻¹ de arcilla=25. Por otro lado, el horizonte Bt2 revela una suma de bases de 2.89, una CICE=2.94, PSB= 98 % y CICE kg⁻¹ de arcilla=14, contenidos altos para este tipo de suelo. Además, presenta un calificador principal Ferric el cual, comienza a ≤ 100 cm de la superficie del suelo y contiene más del 15 % de moteado de color rojo (2.5 YR 6/8) y nódulos frecuentes de tamaño pequeños y medianos, de color pardo rojizo oscuro, con forma subangular de dureza blanda y composición de óxidos de hierro; como consecuencia de procesos de oxidación del hierro en la matriz del suelo.

Por otro lado, un calificador secundario Cutanic, dado por la existencia de un horizonte árgico Bt₁ y Bt₂, con presencia de arcilla iluvial, es decir de la migración de arcillas de los horizontes superficiales hacia los horizontes profundos, en este caso el horizonte Bt₂ presenta mayor contenido de arcilla a una profundidad que oscila de 101 a 150 cm.

Otro rasgo importante, es el subcalificador Endoloamic, compuesto por un especificador Endo, el cual se caracteriza por expresar la profundidad que oscila dentro de los 50 y 100 cm de la profundidad del suelo, la clasificación textural es franco arenosa de las profundidades de 43-84 y 84-101, por consiguiente, toma el nombre de Loamic. Epiarenic, compuesto por el especificador Epi, presente dentro de los 50 cm de la superficie del suelo, de donde resulta la clasificación textural arenosa, con un porcentaje del 85 % en el horizonte A1, distintivo del calificador Arenic, a menos de 30 cm de espesor dentro de ≤ 100 cm de la superficie del suelo. El calificador secundario Humic, cuyo análisis para el COS fue de 1.86 % en el horizonte superficial A1 y de 1.51 en el horizonte subyacente E; este calificador es característico por presentar más del 1 % de COS. Por último, el calificador

secundario Profondic, por la presencia de un horizonte árgico, característico del horizonte Bt₂ con un 21 % de arcilla a una profundidad de 101-150 cm.

Cuadro 3. Descripción del perfil de un Lixisol con diferentes usos en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

Perfil: 1
 Fecha: 18/02/2021
 Localización: 15Q 0435901, 1981698
 Localidad: parcelas de del Sr. Wilber Pulido Izquierdo, Ejido Tecominoacán, Huimanguillo, Tabasco
 Elevación: 39 msnm exactitud de +/-4
 Relieve: plano ligeramente convexo
 Drenaje superficial: Normal
 Drenaje del perfil: imperfectamente drenado
 Material parental: aluviones antiguos del Cuaternario Pleistoceno
 Flora cultivada: asociación de hule con caoba
 Flora nativa: Sabana huerto
 Fauna: comején de Tierra, terminas y bovinos
 Observaciones: lluvia hace dos días.
 Manto freático a 98 cm, suelo deficiente en N, P, K. Presencia de segregación de óxidos de hierro en los horizontes B



Perfil 1	Horizonte (cm)	Descripción del perfil
	A1 (0-43)	Transición tenue y horizontal; húmedo; color 10 YR 2/2 negro, con presencia de raíz; textura franco arenosa; sin pedregosidad; estructura fuertemente desarrollada, en bloques subangulares y grumosas, de tamaño fino y muy fino; consistencia en húmedo muy friable; consistencia en muy húmedo pegajoso y ligeramente plástico; poros numerosos, de diámetro finos y muy finos, continuos, orientación caóticos, dentro de agregados y fuera de agregados, de morfología tubular; permeabilidad muy rápida; raíces extremadamente abundantes, finas, delgadas y medias; con presencia de deyecciones de lombrices (turrículos), hormigas y comején, pH de campo 5.5
	E (43-84)	Transición tenue y horizontal; húmedo; color pardo amarillento, con moteado pardo oscuro (10 YR 3/3), de contraste marcado, abundancia comunes, tamaño finas, medias y grandes; textura franco arenosa; sin pedregosidad; estructura moderadamente desarrollada, subangular, finas y medias; consistencia en húmedo friable; consistencia en muy húmedo ligeramente pegajoso y ligeramente plástico cutanes por eluviación, continuos, en caras de agregados y poros, de minerales arcillosos y óxidos de hierro; poros numerosos, muy finos, de orientación caótica, dentro y fuera de agregados, con morfología tubular; permeabilidad muy rápida; raíces comunes, finas y delgadas; con presencia de deyecciones de lombrices (turrículos), hormigas y comején; pH de campo 5
	Bt1 (84-101)	Transición media e irregular; humedad saturado; color amarillo parduzco (10 YR 6/1), moteado color rojo (2.5 YR 6/8), tenue, pocas motas, de tamaño muy finas



Bt2 (101-1-150)

y finas; textura franco arenoso; pedregosidad muy pocas, gravas, redondeadas de cuarzo, fuertemente intemperizadas; estructura fuertemente desarrollada, en bloques subangulares, de tamaño finas, medias y muy finas; consistencia en húmedo friable; consistencia en muy húmedo ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos, de minerales arcillosos y óxidos de hierro; nódulos frecuentes de tamaño pequeños y medianos, de color pardo rojizo oscuro, con forma subangular, dureza blando, composición de óxidos de hierro; poros frecuentes, finos y gruesos, continuos, orientación caóticos, dentro y fuera de agregados, con morfología tubular; permeabilidad rápida; raíces pocas y finas; pH de campo 5

Transición media irregular; humedad saturado; color amarillo parduzco (10 YR 6/6); moteado rojo (2.5YR 6/8) y pardo pálido (10 YR 7/3), , contrastantes, muchas, tamaño finas y medias; textura franco arcillo arenoso; pocas gravas redondeadas de cuarzo intemperizado; estructura fuertemente desarrollada, en bloques subangulares, de tamaño finas, medias; consistencia en húmedo friable; consistencia en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, de minerales arcillosos y óxidos de hierro, en caras de agregados y poros; nódulos frecuentes de tamaño pequeños de color rojo, forma subangular, dureza blanda, de óxidos de hierro; poros frecuentes, diámetro finos y gruesos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, con morfología tubular; permeabilidad moderada; raíces raras y finas; pH de campo 4.2

Cuadro 4. Análisis de laboratorio de un Lixisol en La Sabana, Huimanguillo, Tabasco.

DESCRIPCIÓN	MO	Nt	P Olsen	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Acidez Intercambiable	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación
	%		mg kg ⁻¹	cmol (+) kg ⁻¹					%		Textura	
A1 (0-43 cm)	3.2	0.15	5.3	0.10	4.12	0.25	0.12	0.08	8	7	85	Arenosa
E (43-84 cm)	2.6	0.12	4.6	0.09	3.90	0.20	0.10	0.06	11	25	64	Franco arenosa
Perfil												
Bt1 (84-101 cm)	1.5	0.07	3.9	0.07	3.40	0.18	0.10	0.05	15	25	60	Franco arenosa
Bt2 (101-150 cm)	0.9	0.03	2.9	0.04	2.67	0.10	0.08	0.05	21	25	54	Franco arcillo-arenosa

Profundidad de los horizontes A

El análisis de varianza mostró que no existen diferencias significativas ($p > \alpha = 0.05$) entre las medias de las profundidades de los horizontes A de cada uso del suelo (Cuadro 5). Los valores de profundidad variaron desde 21 hasta 38 cm. Sin embargo, se percibe que la mayor profundidad promedio resultó para el uso con pastizal (30.4 cm), mientras que el uso con hule monocultivo fue el más bajo (27.6 cm); en este orden de ideas, el uso con hule-cacao obtuvo el segundo lugar con 29.2 cm y el tercero fue para el uso con hule-caoba (28.6 cm).

De manera semejante Alejandro-Martínez *et al.* (2019) no hallaron diferencias significativas entre las profundidades de los horizontes A de los usos del suelo con: acahual, piña, yuca, caña de azúcar y pastizal.

Donde el horizonte A del uso con acahual resultó más profundo (42.50 cm) gracias la cobertura vegetal del suelo que minimiza la erosión del mismo; por otra parte el uso con pastizal fue el más bajo (17.50 cm). En cambio en este trabajo la mayor profundidad fue para el uso con pastizal (30.4 cm), seguido de los usos hule-cacao (29.2 cm), hule-caoba (28.6 cm) mientras que la menor profundidad de horizonte fue para el uso con hule (27.6 cm).

Partiendo de estos datos, si se considera la profundidad mayor del horizonte A del uso con pastizal, menos la de los horizontes de los usos con hule, hule-caoba y hule-cacao, habría una reducción de 2.80, 1.80 y 1.20 cm de espesor, respectivamente.

Desde otro punto de vista, si se hace la estimación de la profundidad perdida de los horizontes A de cada uso del suelo, tomando como referencia la profundidad del acahual de Alejandro-Martínez *et al.* (2019) resulta que los usos con hule, hule-caoba, hule-cacao y pastizal, se estima que se removieron: 14.90, 13.90, 13.30 y 12.10 cm de suelo.

Al respecto Menegaz y Arellano (2016) sostienen que el uso del suelo con pastizales para ganadería impacta perjudicialmente las propiedades de este recurso lo que lo conduce a graves problemas de erosión, aunque señala que esta depende de la textura, la vegetación que cubra el suelo, etc. Agrega, además, que uno de los efectos patentes de la erosión es la reducción del espesor efectivo de los horizontes del suelo, erosión física, simultáneamente también representa la disminución del volumen de suelo en una superficie dada.

Esta pérdida de profundidad incluye igual la de nutrientes y materia orgánica, ya que es la capa superficial (horizonte A) la que más es afectada por los procesos erosivos; teniendo en cuenta que es la que mejores características y propiedades tiene, su pérdida repercutirá negativamente en otras propiedades.

Al contrario plantea que es posible prevenir la degradación de los suelos en ambientes ganaderos si se practican principios básicos de conservación y mejoramiento del suelo, por ejemplo, mantener el suelo con vegetación, pasturas bien dirigidas, carga animal idónea, entre otros. Hay que mencionar que en el uso del suelo con pastizal el sistema de producción pecuaria es semiestabulado con sistema de pastoreo rotacional alterno con una producción total de forraje de 235.008 t en las 25.50 ha. Esto le provee al suelo una buena cobertura vegetal que retiene las partículas y que no tiene los otros usos, por ejemplo, el de hule, lo que lo hace vulnerable a la erosión, principalmente hídrica lo que se acentúa con la textura gruesa del horizonte.

No obstante, en los usos del suelo con cultivos asociados, hule-cacao y hule-caoba la presencia de dos especies ayudaría a retener más el suelo en contraste con el hule monocultivo (Oficina Nacional Forestal, 2013; Ovalle *et al.*, 2020). Desde la posición de Echavarría *et al.* (2007) el uso racional de los pastizales permite la recuperación de la cobertura vegetal del suelo, este hecho previene el

desprendimiento, su posterior arrastre y depósito de las partículas edáficas (arena, limo y arcilla). De esta manera enfatiza que los sistemas de pastoreo rotacional con pequeños rumiantes (ganado menor) generan menos impactos nocivos en los suelos ganaderos.

Volumen del horizonte A

No existen diferencias significativas entre el volumen de los horizontes A de los diferentes usos del suelo ($p > \alpha = 0.05$). Los valores oscilaron entre 2100 y 3800 $m^3 ha^{-1}$. Por otro lado, el uso con pastizal obtuvo el mayor volumen de suelo (horizonte A) con 3040 $m^3 ha^{-1}$; en segundo lugar, estuvo el uso con hule-cacao con 2920 $m^3 ha^{-1}$; por otra parte, el uso con hule-caoba resultó con 2860 $m^3 ha^{-1}$, siendo el uso con hule el que menos volumen de horizonte presenta (Cuadro 5).

Cuadro 5. Cantidad de suelo por usos, en La Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

Tratamientos	Profundidad del horizonte	Volumen del horizonte	Peso del horizonte
	cm	$m^3 ha^{-1}$	(t ha^{-1})
Pastizal	30.4a	3040a	3258.39a
Hule	27.6a	2760a	2644.53a
Hule-cacao	29.2a	2920a	2943.06a
Hule-caoba	28.6a	2860a	2946.20a
Cv (%)	19.01	19.01	19.81
Probabilidad de F	0.88	0.88	0.45
Significancia	NS	NS	NS

El uso con mayor profundidad fue el pastizal, las láminas de suelo perdidas con sus respectivos volúmenes y peso se calcularon, restando del valor más alto el valor de cada uso.

De acuerdo con Alejandro y De la Cruz (2018) en sus análisis estadísticos encontraron diferencias altamente significativas, en el cual el achual presenta mayor volumen ($4250 m^3 ha^{-1}$), lo que es lógico, pues su profundidad fue la mayor. Otro aspecto de la presente investigación es la estimación del volumen de suelo perdido que fue de 280, 180 y 120 $m^3 ha^{-1}$ para el uso con hule, hule-caoba y hule-cacao respectivamente; esto fue posible gracias a que se conmisieron los datos de la profundidad del suelo perdido para este cálculo. No se calculó el del pastizal, ya que este valor más alto se utilizó para estimar el volumen de los otros usos. Así mismo se identifica que el uso con hule es el que más volumen de suelo ha perdido, detrás está el hule-caoba, finalmente quien menos desprendimiento de suelo presentó fue el uso hule-cacao; estos resultados se corresponden con los de profundidad del horizonte, puesto que al disminuir dicha profundidad

consustancialmente lo hace el volumen. Cabe agregar, que se considerando la profundidad del horizonte del suelo bajo acahual, como ecosistema mejor conservado, de la investigación de Alejandro y De la Cruz (2018) para estimar el volumen perdido, de esto deriva que: el uso del suelo con hule, hule-caoba, hule-cacao, y pastizal obtuvieron 1490, 1390, 1330 y 1210 m³ ha⁻¹ de suelo perdido (Cuadro 6). Puede notarse que el pastizal ha conservado la mayor cantidad de suelo, y que el suelo con hule presenta mayor problema de pérdida de suelo causado por la erosión hídrica.

Peso del horizonte A

El análisis de varianza muestra que no existen diferencias estadísticas significativas entre el peso del horizonte A de los usos del suelo. Los valores oscilan desde 2057.86 hasta 4217.48 t ha⁻¹. El horizonte A del suelo con pastizal obtuvo el mayor peso con 3258.39 t ha⁻¹ (Cuadro 5) mientras que el peso del horizonte A de uso con hule-caoba resultó ser el más bajo con 2644.53 t ha⁻¹, así mismo el del hule-caoba fue el segundo lugar con 1946.19 t ha⁻¹; encontrándose en tercer lugar el hule-cacao (2943.06 t ha⁻¹). Otro aspecto de lo anterior fue la estimación del peso del suelo perdido de los distintos usos del suelo (excepto en mayor representado por el pastizal), de donde se deriva que el peso del suelo perdido de los usos de hule, hule-cacao y hule-caoba fueron de 267.76, 186.06 y 212.13 t ha⁻¹; es notorio que el uso con hule ha sido afectado por la mayor pérdida de suelo (267.76 t ha⁻¹).

Al respecto, Alejandro y De la Cruz (2018) indican que no encontraron diferencias significativas al evaluar el peso del horizonte A, lo que es bueno, pues se conserva más el suelo, del suelo con usos de acahual, piña, yuca, caña de azúcar y pastizal, de entre los cuales el mayor peso fue de 4,579.50 t ha⁻¹ para el acahual, superando en 1,320.61 t ha⁻¹ a el peso del horizonte A con uso con pastizal de esta investigación.

De lo anterior, se estima el peso del suelo perdido para lo cual se consideró el valor de la profundidad del horizonte A del acahual de Alejandro y De la Cruz (2018), así es como se obtuvo que el uso con hule es el más afectado (1,424.9 t ha⁻¹); seguido del uso con hule-caoba (1,436.9 t ha⁻¹); en la tercera posición se tiene al hule-cacao

(1,342.6 t ha⁻¹); por último el uso con pastizal (1,311.6 t ha⁻¹) que representa un mejor estado de conservación (Cuadro 6).

Cuadro 6. Láminas de suelo perdidas por erosión

Tratamientos	MO	Carbono orgánico	Carbono orgánico del suelo	Nt	Nt	P asimilable	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	%		Mg C ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹ de suelo	kg ha ⁻¹		
Pastizal	4.48a	2.60a	82.80a	0.18a	5634.75a	7.36a	161.99a	3529.86	295.52a
Hule	4.4a	2.55a	67.82a	0.18a	4891.31a	6.66a	133.16a	3426.20	237.17a
Hule-cacao	5.28a	3.06a	91.53a	0.20a	6138.36a	7.14a	151.95a	3901.21	277.20a
Hule-caoba	4.82a	2.80a	83.34a	0.18a	5511.39a	6.92a	111.94a	4048.34	270.13a
CV (%)	13.804	13.80	25.53	19.79	30.50	28.44	32.48	25.37	26.60
Probabilidad de F	0.1755	0.18	0.36	0.71	0.7143	0.51	0.35	0.69	0.64
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Densidad aparente

El análisis de varianza muestra que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos; $p > \alpha = 0.05$ (Cuadro 8). Los valores varían de 0.824 a 1.255 t m⁻³. Sin embargo, en el caso del tratamiento uso de suelo como pastizal, muestra el valor más alto en su media aritmética (1.084 t m⁻³) con relación a los otros tratamientos, no obstante, los valores de densidad aparente para todos los usos se consideran ideales para el desarrollo del sistema radical.

El mayor valor de Dap se debe a la compactación originada por el pisoteo de la capa arable por parte del ganado bovino cuando deambula en la parcela de igual manera al extenso periodo practicando la misma actividad con escasos días de recuperación, ya que el productor sostiene que ha sido el mismo durante 37.5 años bajo el sistema semiestabulado. Esto coincide con lo reportado por Alejandro-Martínez *et al.* (2019) el mismo valor de 1.08 t m⁻³.

Por otro lado, Noguera y Vélez (2011) al evaluar cinco usos de suelo en tres sistemas silvopastoriles concluyen que el uso para pastizal con el pasto Kikuyo (*P. clandestinum*), no solo mostró la Dap más alta (1.17 t m⁻³), sino a la par los valores más bajos en las variables asociadas como son la porosidad y la conductividad hidráulica, por las mismas causas ya mencionadas, como son el pisoteo constante de los animales dentro de la parcela (Foloni *et al.*, 2003).

Las afirmaciones anteriores difieren con lo reportado por Sánchez *et al.* (2003) quienes al examinar la Dap de un Vertisol bajo tres agroecosistemas —caña de azúcar, pasto estrella africana (*Cynodon plectostachyus*) y selva mediana perennifolia de canacohite (*Bravasia integerrima*) — ratifican que el valor más alto fue el uso con caña de azúcar manejo mecanizado (1.29 g cm^{-3}), mientras que el uso con pasto con 1.24 g cm^{-3} y el valor más bajo fue el suelo bajo selva con 1.02 g cm^{-3} , aunque señalan que dichos valores no alcanzan el nivel crítico que limite la exploración radical.

Asimismo, estos investigadores señalan que el relicto de vegetación natural, selva, conserva mejor las propiedades del suelo, y que el pisoteo del ganado durante veinte años ha tenido poco impacto sobre la Dap, en lo que atañe al uso con caña los valores más altos son ocasionados por el paso de maquinaria pesada durante la cosecha, incrementando la Dap.

Así mismo, Echavarría *et al.* (2007) compararon dos tipos de pastoreo con ganado caprino, pastoreo rotacional (PR) y pastoreo controlado (PC), donde al inicio del experimento las medias eran idénticas ($p > 0.05$) no así para el final de la evaluación ($p < 0.05$) tres años después, incrementándose 0.12 g cm^{-3} en el PC para tener finalmente 1.52 t m^{-3} , este resultado es superior al obtenido para el pastizal de 1.08 t m^{-3} , pese a esto dichos valores no se consideran restrictivos para el crecimiento y desarrollo del sistema radicular ni limitaría la infiltración.

A diferencia de los monocultivos convencionales de pasto, los sistemas asociados tienden a tener valores de Dap más bajos, esto puede suceder por el aporte de materiales orgánicos de las especies arbóreas, la penetración profunda de sus raíces que permiten alcanzar nutrientes que el sistema radical de los pastos no logra y que reintegra en la superficie mediante la hojarasca, ramas muertas, ETC, provoca una mayor agregación del suelo e incremento de la porosidad (Navas, 2016).

Al respecto, Castellanos *et al.* (2000), sostienen que cuando el contenido de MO es alto la densidad aparente resulta ser baja, y cuando esta última tiene valores menores otras propiedades edáficas como es el caso de la porosidad y la conductividad hidráulica se acrecientan. Así lo evidencia la presente investigación, pues el porcentaje de MO se corresponde con la Dap. En razón de que Dap afecta

la funcionalidad del suelo (Alfonso *et al.*, 2000; García, 2012; Castillo-Valdez *et al.*, 2021) se ha propuesto como un buen indicador de la calidad del suelo e índice del grado de compactación y por ende, de la porosidad (Flores *et al.*, 2016).

Al respecto, Jaurixje *et al.* (2013) concluyen que el sistema de manejo cultivado con cebolla con manejo mecanizado y fertilizado químicamente, deterioran las condiciones físicas, lo se traduce en una mayor compactación y en una alta Dap (1.34 Mg m⁻³ y 1.43 Mg m⁻³ para profundidad de 0-10 y 10-20 cm) y conductividad hidráulica baja, mientras que el uso con pasto mostró mejores resultados (1.35 y 1.33 Mg m⁻³ para las mismas profundidades).

Un suelo con valores de Dap altos —por ejemplo, para suelos de textura arenoso-arenoso franco una Dap alta sería >1.80 g cm⁻³, una intermedia de 1.69 g cm⁻³, y < 1.60 g cm⁻³ representa la Dap ideal— (USDA, 1999) afectará la productividad del sistema, ante esta situación deben tenerse en cuenta prácticas que reduzcan los riesgos de la pérdida de calidad del suelo y complementen el sistema de rotación actual, por ejemplo, sistema silvopastoril.

Porosidad total

En el Cuadro 7 se muestran las medias de porosidad entre tratamientos, las cuales son estadísticamente iguales. Si se consideran los resultados promedio la porosidad más baja corresponde al tratamiento uno — uso de suelo con pasto, el cual a su vez representa el uso intensivo— con 59.09 % y los valores de porosidad más altos correspondan a los usos hule y hule-cacao (63.9 y 61.9%). Se hace énfasis en que el uso con pastizal se considera alto (50-60 %), y los demás usos entran en la categoría de porosidad muy alta (>60 %), según la clasificación de Flores y Alcalá (2010).

La menor porosidad en el pastizal se asocia a la Dap elevada y MO escasa, lo que implica problemas como la infiltración y almacenamiento de agua con la restricción del crecimiento y desarrollo de las raíces.

Al respecto Salamanca y Sadeghian (2005) evaluaron la Dap y su relación con otras propiedades físicas del suelo en cuatro agroecosistemas (cafetales convencionales, tradicionales, potreros y guaduales [ecosistemas poco perturbados

antrópicamente]), encontrando correlación significativa, entre la porosidad y su disminución con otras propiedades, por ejemplo: punto de marchitez permanente, MO, entre otras. Lo que reafirma la influencia de la porosidad sobre las propiedades físicas del suelo, el uso y sobre todo el manejo que se practique (Klein y Libardi, 2005).

Cuadro 7. Promedios de los indicadores de la calidad del suelo

Tratamientos	Velocidad de infiltración cm agua h	Resistencia a la penetración MPa	Densidad aparente t m ⁻³	Porosidad total	Estabilidad de agregados %	Desleimiento promedio del suelo
Pastizal	162.39b	0.40a	1.08a	59.09a	32.38a	5.94a
Hule	657.35c	0.29a	0.96a	63.91a	24.76a	5.75a
Hule-Cacao	1472.73a	0.29a	1.01a	61.91a	20.83a	5.82a
Hule-Caoba	1317.89a	0.27a	1.03a	60.99a	22.5a	5.77a
CV (%)	63.18	29.56	10.10	6.33	65.27	3.48
Probabilidad de F	0.008	0.13	0.30	0.30	0.70	0.49
Significancia	**	NS	NS	NS	NS	NS

Infiltración cmH₂O h

Se encontraron diferencias altamente significativas ($p < \alpha = 0.05$, Coeficiente de variación 63.181 %) en la velocidad de infiltración (Cuadro 7). La prueba de Tukey (comparación de medias $p \leq 0.05$) muestra que la media del uso del suelo con pastizal es distinta de todas las demás, lo mismo sucede bajo el uso con hule, en cambio, la media para el uso con hule-cacao y hule-caoba son similares estadísticamente (Cuadro 7).

Por otra parte, pese a que los resultados revelan que todos los tratamientos pertenecen a la clase infiltración muy rápida (USDA, 1999), el uso del suelo con pastizal tuvo la velocidad de infiltración más baja, en promedio 162.386 cmH₂O h⁻¹ (centímetros de lámina de agua por hora), mientras que se hule-caoba y hule-cacao, presentaron los mayores valores en la velocidad de infiltración (1327.886 y 1472.734 cmH₂O h⁻¹; respectivamente).

Este resultado se comprende, ya que la infiltración disminuye cuando el tamaño y la cantidad de poros decrecen (USDA, 1999), como se corrobora con el menor valor de porosidad en el pastizal del área de estudio (59.09 %).

La velocidad de infiltración escasa puede generar problemas de erosión e inundaciones en zonas bajas por el incremento de la escorrentía, que se acentúa en pendientes, al igual que la reducción en la capacidad de almacenamiento de

agua en el suelo, conllevando a la pérdida de la calidad del suelo y de su productividad, sin embargo los resultados revelan que la infiltración para los cuatro usos es adecuada, por tanto no deberían presentarse esos problemas, aunque debe tomarse en cuenta la textura gruesa (Arenoso-franco) y la posición de los suelos en el relieve que pudiesen generar erosión (Alfonso y Monedero, 2004; Salamanca y Sadeghian, 2005; Rosales-Naranjo *et al.*, 2020).

Desleimiento

El desleimiento del suelo es un proceso físico que se caracteriza por la ruptura, desintegración o fragmentación de los macroagregados del suelo secado al aire, en microagregados y partículas primarias mucho más finas cuando se humedecen drásticamente (Francis *et al.*, 2018). Es causado por dos factores principales: las fuerzas de ruptura de la compresión del aire atrapado a medida que la acción capilar conduce el agua hasta el interior de los microporos entre las partículas del suelo durante la rápida humectación, o por estrés interno de la expansión diferencial de las arcillas que generan zonas de fracturas entre los agregados (Emerson, 1964; USDA, 1999).

En la evaluación del desleimiento el análisis de varianza no fue significativo ($p > \alpha = 0.05$), con un coeficiente de variación de 3.480 % (Cuadro 7). El promedio de desleimiento de los agregados oscila desde 5.31 a 6 %, lo cual corresponde a la clase 5 y 6 como «fragmentos o agregados de suelo relativamente estables» (USDA, 1999). Los resultados obtenidos se relacionan con el buen contenido de MO, puesto que esta beneficia la estructura del suelo, ya que reduce la dilatación y la permeabilidad, al mismo tiempo que aminora las fuerzas que destruyen los agregados por estallido, justamente fueron niveles altos de MO los medidos en todos los usos (Gabioud *et al.*, 2011). Lo anterior se respalda en Jones *et al.* (2021) quienes registraron que el alto contenido de MO disminuye la susceptibilidad de desleimiento, puesto que mejora la estructura al unir las partículas del suelo en agregados estables. En la propensión al desleimiento influyen otros factores del suelo, como la tasa de humectación y el contenido de humedad previa, y también se relaciona con la textura, la composición mineral y la MO (Francis *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2021). El desleimiento ocasiona efectos adversos cuando los agregados

se descomponen en microagregados ($\emptyset < 0.25\text{mm}$), puesto que estos se desprenden y son translocados hasta los poros, lo que disminuye significativamente el volumen de los poros, cuya situación conduce a la reducción de la infiltración, la percolación y por lo tanto el incremento de la escorrentía superficial, es decir disminuyen la capacidad del suelo de ejecutar las funciones agrícolas, ambientales e hidrológicas de manera eficiente, lo que en última instancia significa pérdida de la calidad y servicios ecosistémicos (Jones *et al.*, 2020). Su importancia radica que se puede usar en el manejo de riesgo a la erosión en que el desleimiento determina si el proceso permite un ambiente favorable o no para los cultivos y el crecimiento de las plantas, además que se incluyen implicaciones para la conservación del suelo, no obstante su evaluación es escasa ocasionado por la carencia de metodologías que permitan medir y entender sus factores de control (Fajardo *et al.*, 2021).

Estabilidad de agregados

El análisis de varianza para la estabilidad de agregados demuestra que no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los usos del suelo (Cuadro 8). Los porcentajes de estabilidad de agregados ante la erosividad del agua registrados oscilaron de 0 a 75 %. Los promedios absolutos de la estabilidad de agregados demuestran que los porcentajes son bastante bajos, pues fluctúan de 20.83 hasta 32.8 %, incluso comparados con los porcentajes esperados (materia orgánica 77 y 65 %), basados en el porcentaje de arcilla (12 %) y MO (5.28 %) resultan ser menores (USDA, 1999). Bernal y Hernández, (2017) al evaluar la estabilidad de agregados en un suelo Ferralítico rojo lixiviado bajo tres usos obtuvieron los mejores valores de estabilidad (44.5 %) para los primeros 20 cm de profundidad bajo sistema de bosque, considerado satisfactorio, este resultado es superior a los obtenidos para el uso con hule-cacao (20.83 %), hule-caoba (22.5 %) y hule 24.76 (%), incluso menores para el porcentaje más bajo (32.5 %) del tratamiento Cultivos Varios, donde se práctica labranza mecanizada. Por otro lado el uso con pastizal, cuyo valor fue el más alto con 32.38 % es ligeramente superior al del uso con Cultivos varios; pese a esto no dejan de ser porcentajes inferiores, ya que cuanto más estables sean los agregados mejoran la calidad del suelo lo que puede agravarse con el uso y tipo de manejo que inducen cambios (Volverás y Amézquita,

2009). Simultáneamente, otros factores que también influyen en la estabilidad de agregados son: la textura, el contenido de MO, sodio (Na^+), de arcilla (y tipo), así mismo la abundancia y distribución de compuestos orgánicos provenientes del metabolismo de las poblaciones microbianas (*v.gr*: exopolisacaridos, lectinas...), de las misma forma las raíces de las plantas (Porta *et al.*, 2003; Armado *et al.*, 2009; Noguera y Vélez, 2011; Pereira *et al.*, 2011). También en suelos ácidos la MO tiende a acumularse (Siebe *et al.*, 1996), lo cual podría ser tóxico según Acosta *et al.* (2004) si no continúa con el proceso de humificación, esto parece confirmar que la MO en sí misma no aporta beneficios más allá de ser una cubierta protectora de la superficie del suelo ante la erosión hídrica y eólica. Por otra parte, Vallejo-Quintero (2013) reporta que los sistemas agroforestales incrementan significativamente la estabilidad de agregados y que un factor importante que la induce es un adecuado contenido de MO, aunque se reporta lo anterior y pese a que los contenidos de MO para todos los usos de suelo de este trabajo son altos, el porcentaje de estabilidad de los agregados refleja bajos porcentajes. Sin embargo, Porta *et al.* (2019) mencionan que el Fe^{3+} es clave en la estructuración del suelo y el Ca^{2+} en la estabilidad de los agregados, además que en suelos ácidos (con pH de 5 y 5.5) es posible que alcancen moderada estabilidad y que el Al^{3+} puede coadyuvar al Fe^{2+} en la estructuración por lo que se cree que el catión Ca^{2+} no es el único que realiza esta función (Porta *et al.*, 2003). Pese a que el contenido de MO para todos los tratamientos se consideran altos (desde 4.4 hasta 5.28 %), según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) el porcentaje resultó estar muy por debajo, al respecto la USDA (1999) afirma que la estabilidad de agregados es más visible cuando el porcentaje de arcilla es bajo, al menos esta condición se cumple para todos los tratamientos, a causa de que en promedio el de arcilla para el uso con pasto y hule-caoba es de 8.2 %, mientras que para el hule es de 7.2 % y para el hule-cacao es de 7 %, aunque como ya se ha mencionado, la estabilidad es poca, pero agrega que el incremento de MO por encima de 2 %, no aumenta dicha estabilidad y que el tipo y cantidad de arcilla, por ejemplo monmorillonita que tiene elevada superficie específica tienden a aumentar la estabilidad, es así que suelos ácidos con arcillas de baja superficie específica serán menos estables lo que podría explicar los resultados de este estudio. Puede decirse, que la erodabilidad

del suelo es considerable, es decir es proclive a la erosión por parte del agua; aunque ciertamente está sujeta a otras variables como lo son la textura, la mineralogía, la MO, etc. (Yang *et al.*, 2005; Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009).

Resistencia a la penetración

Los datos resultantes del ANOVA prueban que la variable resistencia a la penetración no tiene diferencias significativas entre los tratamientos ($p > \alpha = 0.05$, $CV = 29.56$), los valores varían entre 0.10 y 0.44 MPa (Cuadro 7). El promedio de resistencia a la penetración fue mayor en el uso con pasto (0.40 MPa), (Figura 16) seguido de hule y hule-cacao (0.29 MPa), y el valor más bajo fue para el hule-caoba (0.27 MPa), (Figura 16).

El efecto más evidente de cierto tipo de uso y manejo de un suelo se manifiesta en la Dap y ésta en la compactación del suelo, lo que repercute en reducción de su capacidad de producción y disminución de recarga en los mantos acuíferos por disminución de la porosidad (CIMMYT, 2013; Valenzuela *et al.*, 2015). Los resultados obtenidos lo confirman, teniendo en cuenta que el uso con pastizal obtuvo la Dap (1.08 t m^{-3}) más alta y se refleja en el bajo porcentaje de porosidad (59.09 %), al igual que en la resistencia a la penetración más alta (0.40 MPa), de manera semejante sucede con el uso de hule-caoba que al resultar como el segundo con mayor densidad (1.03 t m^{-3}) se ve reflejado en tener el porcentaje de porosidad bajo (60.99) únicamente por detrás del uso con pastizal (60.99 %).

Sin embargo la resistencia a la penetración (0.27 MPa) fue ligeramente por debajo de los usos con hule y hule-cacao, quienes obtuvieron (0.29 MPa). Un estudio semejante fue efectuado por Noguera y Vélez (2011), y encontraron diferencias significativas en la resistencia a la penetración entre los usos.

Por el contrario, no fue así en las distintas profundidades ni en su interacción por uso. El valor más alto de resistencia a la penetración fue para el uso con pasto con 3 MPa (30.60 kgf cm^2) en los primeros cinco centímetros, lo cual es alto comparado con el encontrado para el pastizal evaluado (0.40 MPa), situación que revela un problema de degradación física; al respecto López (2002) sugiere que a partir de 2 MPa (20.40 kgf cm^2) el suelo puede enfrentar restricción significativa para el desarrollo de raíces.

Por otra parte, reportan que la resistencia a la penetración para bosque fue de 1 MPa (10.20 Kgf cm²), dato superior al por lo que representan poca restricción para las raíces ya que son valores por debajo de 1 MPa (White, 2006; López (2002). Hay evidencias que cultivos intensivos como cebolla, ají (Jaurixje *et al.* (2013) y café (Henríquez *et al.*, 2011), provocan alta resistencia a la penetración del suelo, por encima de los valores registrados en los usos del área de estudio.

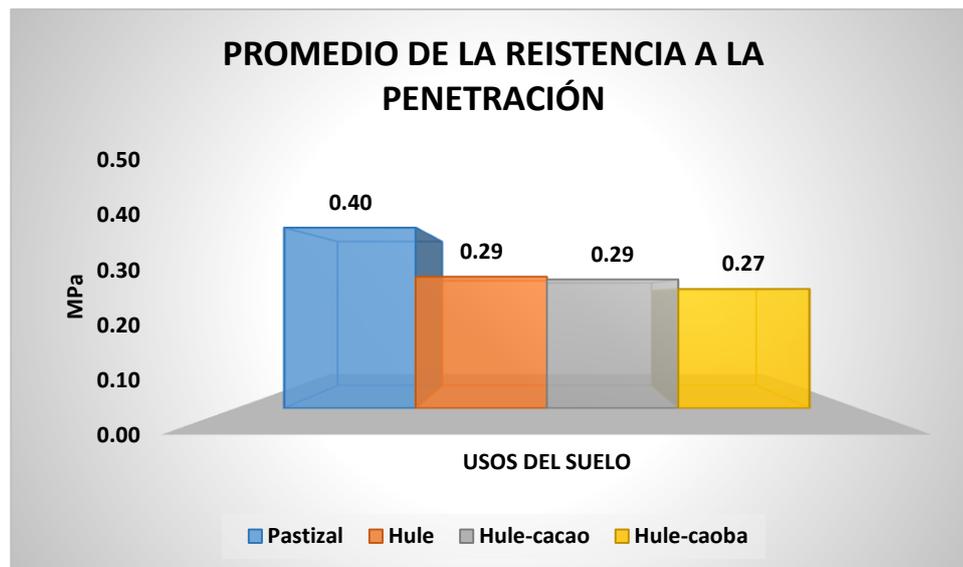


Figura 16. Compactación promedio del horizonte A por uso del suelo

Materia orgánica

El rango del contenido de materia orgánica se localizó entre 3.50 y 6 %. Para este análisis se aceptó la H₀ que no existen diferencias significativas ($p > \alpha = 0.05$, CV= 13.804 %) entre los usos del suelo (Cuadro 5). Antagónicamente, los contenidos de MO para todos los usos son altos (SEMARNAT, 2002).

Una explicación a la similaridad de los contenidos de MO entre usos, puede encontrarse en que en el uso con pastizal se práctica la ganadería semiestabulada con sistema de pastoreo rotativo, lo cual reporta múltiples beneficios, por ejemplo, mejoran la fertilidad del suelo por la incorporación de la micción de los animales y el aporte de materiales orgánicos en el suelo provenientes de la bosta (Borrelli y Oliva, 2001; Vargas, 2019).

Estos resultados difieren de los de Alejandro-Martínez *et al.* (2019), pues reportan que el porcentaje de MO en un acahual fue el más alto con 4.10 % y el menor de 3.23 % para el uso con caña de azúcar.

Mientras que en este trabajo el contenido de MO fue más alto en todos los usos del suelo (5.28 a 4.2 %), no obstante el poco tiempo de establecimiento de las plantaciones de hule-cacao, hule-caoba y hule monocultivo, con edad de tres a nueve años, y con manejo similar de la plantación, de tipo convencional, con aplicación de agroquímicos, tanto para nutrición vegetal y fitosanitarios, de la misma forma la preparación del suelo previo al establecimiento con labranza secundaria mecanizada (cuatro pasadas de rastra).

Así mismo, el contenido de MO para el pastizal resultó con 4.48 % de MO (tercer lugar), siendo mayor a los contenidos de MO reportados por Alejandro-Martínez *et al.* (2019), pese a que este suelo ha sostenido el mismo uso durante treintaisiete años y medio. Estos resultados son congruentes con los suelos ácidos del área de estudio, suelen tener buenos contenidos de materia orgánica, observable en el color oscuro característico de su horizonte superficial (Palma *et al.*, 2007; Salgado-García *et al.*, 2017).

El alto contenido de MO del Lixisol con los usos estudiados, se puede explicar por el aporte de residuos vegetales mayor en los usos con cultivos asociados, y en el pastizal además de los restos vegetales del pasto se adiciona la bosta lo que resultaría en los mayores contenidos de MO, es decir existen más entrada de residuos orgánicos (Salamanca y Sadeghian, 2005).

Puede relacionarse, además lo que enfatiza Siebe *et al.* (1996) que la MO tiende a acumularse en suelos ácidos, al respecto Cepada (2016) destaca que son los microorganismos los encargados de la descomposición de materiales orgánicos, y según Cruz-Macías *et al.* (2020) el desarrollo de las comunidades microbianas se inhibe o reduce en suelos con pH bajo. Lo anterior se relaciona con lo que plantea Ortiz (2019) que la velocidad de descomposición de la MO es un punto clave para entender su acumulación. Esta situación puede presentarse en el área de estudio, donde la baja tasa de mineralización del humus ocasiona la acumulación en el horizonte superficial.

Carbono orgánico del suelo

No hubo diferencias significativas ($p > \alpha = 0.05$, $CV = 13.804\%$) en el COS (carbono orgánico de cada uso de suelo) (Cuadro 8). Los valores registrados varían desde 2.2 hasta 3.48 %. Sin embargo, el promedio del porcentaje de CO fue más alto para el hule-caoba (3.80 %), y el menor para el hule-cacao (2.06 %), mientras que el uso con pastizal resultó con 2.60 % y el hule con 2.55 %. Montañó *et al.* (2016) afirman que la ganancia de C un pastizal sin la introducción del ganado por 28 años perdió $25.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, por otra parte, un suelo con pastoreo moderado no ganó ni perdió C ($0.003 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), por lo que sostienen que el sobrepastoreo induce el crecimiento de la biomasa subterránea, por esta razón se considera una gran fuente de C. Por otro lado, mencionan que el almacén de C está imbuido por el uso del suelo y que pastizales no turbados pueden almacenar entre 2.8 y 80 Mg C ha^{-1} , en regiones áridas y semiáridas.

A su vez, la cuantificación promedio del carbono del suelo por ha en el presente estudio reveló que la mayor proporción lo obtuvo el uso de hule-cacao $91.53 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Por otra parte, el uso con hule fue el más bajo con $67.82 \text{ Mg C ha}^{-1}$, mientras que el hule-caoba resultó con el tercer lugar, ya que su contenido fue de $83.34 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y debajo de este se posicionó el pastizal ($82.80 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Cuadro 8. Promedio de los indicadores químicos de la calidad del suelo.

Tratamientos	MO	Carbono orgánico	Carbono orgánico del suelo	Nt	Nt	P asimilable	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	%	%	Mg C ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹ de suelo	kg ha ⁻¹		
Pastizal	4.48a	2.60a	82.80a	0.18a	5634.75a	7.36a	161.99a	3529.86	295.52a
Hule	4.4a	2.55a	67.82a	0.18a	4891.31a	6.66a	133.16a	3426.20	237.17a
Hule-cacao	5.28a	3.06a	91.53a	0.20a	6138.36a	7.14a	151.95a	3901.21	277.20a
Hule-caoba	4.82a	2.80a	83.34a	0.18a	5511.39a	6.92a	111.94a	4048.34	270.13a
CV (%)	13.804	13.80	25.53	19.79	30.50	28.44	32.48	25.37	26.60
Probabilidad de F	0.1755	0.18	0.36	0.71	0.7143	0.51	0.35	0.69	0.64
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

De acuerdo con Solís *et al.* (2014) quienes evaluaron tres calidades de sitio con tres tratamientos silvícolas en tres profundidades concluyen que la mayor concentración de COS se producen en el sitio con calidad buena ($63.12 \text{ Mg C ha}^{-1}$), en el tratamiento silvícola cortas de selección ($58.47 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y que en los

primeros 20 cm de profundidad se encuentran la mayor cantidad de COS, ya que de 0-10 el contenido promedio es de 89.14 Mg C ha⁻¹, y de 10-20 es de 58.53, decreciendo a mayor profundidad.

Sin embargo, el uso de hule-cacao fue ligeramente superior al contenido promedio de 89 Mg C ha⁻¹ hallado por los anteriores autores. Synes *et al.* (2012) sugieren que en México el contenido promedio de COS es de alrededor 68 Mg ha⁻¹. En cambio, Ortiz (2019) plantea que en Tabasco el contenido promedio es de 64.1 Mg C ha⁻¹, aunque en los usos del suelo evaluados estas cantidades son relativamente más grandes, incluso comparado con el valor más bajo del hule 67.82 Mg C ha⁻¹. Así mismo Okebalama *et al.* (2017) quienes ponderaron el COS en cuatro lugares y profundidades distintas, cuyos resultados demuestran que el COS fue mayor en todos los suelos que se ha mantenido barbechado entre 4-5 años, por otro lado los suelos cultivados muestran los contenidos promedio más bajos en 0-10 cm y en 10-20 cm, aunque el COS fue similar en la profundidad de 20-30 cm. Es así que en el sitio Nsukka II, el nivel más alto de COS registrado fue para los suelos no cultivados 6 y 2, con 805.05 y 674.2 Mg C ha⁻¹ respectivamente; valores muy por encima de los encontrados en el estudio actual, sin embargo sostiene que los suelos cultivados pueden funcionar como sumideros de CO₂ atmosférico, aunque estará en función del manejo y la influencia antrópica que haya, ideas con las que coinciden Vela *et al.* (2012) cuando sostienen que los sistemas agroforestales podrían tener capacidad para extraer cantidades grandes de carbono de la atmosfera y retenerlo por tiempo indefinido.

Nitrógeno total

El porcentaje de Nt varió entre 0.1 y 0.24 %. El uso de suelo con pastizal, hule, y hule-caoba obtuvieron el mismo valor promedio (0.18 %) considerados *Altos*, de igual manera en la situación del hule-cacao el N fue Alto con 0.20 %, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El análisis de varianza indica que no existes diferencias significativas (Cuadro 8) entre los contenidos medios de nitrógeno ($p > \alpha = 0.05$, CV= 19.79 %).

A juicio de Navarro y Navarro (2003) los suelos ricos en nitrógeno son más una excepción que una regla que se produce cuando la MO se acumula por falta de

mineralización en condiciones naturales (o por adiciones de estiércoles y fertilizantes químicos que incrementan el contenido de este elemento), y aunque el mayor contenido de nitrógeno de los suelos minerales proviene de esa reserva en la MO, no es el nitrógeno orgánico (N no lábil) el que está disponible sino el inorgánico en su forma amoniacal (NH_3^+) y nítrica (NO_3^-).

Así lo dan a conocer también el INIFAP (2005) y Cepada (2016). Cabe recalcar que la acidez del suelo induce la acumulación de la MO, ya que la humidificación disminuye, y en consecuencia se producen bajas tasas de mineralización. Fenómeno que se refleja en la formación de una capa *litter* que funciona como una cobertura permanente o acolchado natural, y aunque beneficia los altos contenidos de nitrógeno dicho elemento permanece inmovilizado en formas orgánicas (no lábil), tal cual sucede en las parcelas de estudio en los usos del suelo con hule, hule-cacao y hule-caoba.

En otras palabras, no está disponible ni para las plantas ni para los microorganismos (Bohn *et al.*, 2001; Farooq y Siddique, 2014; Hellin and López, 2016; D'Amico *et al.*, 2017). Ya que, según Bono y Romano (2012) la MO funciona como un almacén de N. Además a Tinal-Ortiz *et al.* (2020) reportaron diferencias significativas en el porcentaje de Nt y los contenidos variaron entre 0.18 y 0.32 % en Acrisoles, con diferentes usos y pendientes, valores considerados *Altos* a *Muy altos* que únicamente concuerdan con los valores *Altos* del presente trabajo.

Por otro lado, el contenido de N para el pastizal (0.22) fue ligeramente superior al uso con pastizal de este estudio (0.18 %); por consiguiente al de hule, hule-cacao lo cuales obtuvieron el mismo contenido promedio que el pastizal. Así mismo la cantidad de N para el uso con piña fue idéntica (0.18 %), la más baja que reportan. Incluso el uso con acahual resultó con el mismo contenido de N (0.24) que el hule-cacao, cuyo uso fue el que más N tiene. Con relación al uso con limón fue *Muy alto* (0.42), por encima de los de este estudio.

Nitrógeno total (kg ha^{-1})

En el análisis estadístico no se identificaron diferencias significativas entre los usos del suelo (Cuadro 8). El valor extremo registrado fue de $8694.47 \text{ kg ha}^{-1}$ y el

mínimo 3388.310 kg ha⁻¹, mientras que en promedio la mayor cantidad de Nt fue para el uso con pastizal (5634.75kg ha⁻¹), en segundo lugar, lo obtuvo el tratamiento cuatro, es decir el uso con hule-caoba, pues su contenido fue de 5511.39kg ha⁻¹, el contenido más bajo lo obtuvo el uso con hule-cacao.

En general, los contenidos de nitrógeno en el suelo son adecuados, ya que la disponibilidad de nitrógeno está condicionada por la baja mineralización de la materia orgánica debido a la acidez del suelo, (INIFAP, 2005).

Al respecto hay quienes sostienen que el contenido de nitrógeno no es afectado por el manejo del suelo, ya sea convencional u orgánico. Al menos Derrick y Dumaresq (1999) no encontraron diferencias significativas entre un manejo convencional contra uno orgánico, esto parece confirmarse en el estudio actual, ya que tampoco se encontraron diferencias significativas para ninguno de los usos.

Sin embargo, en los datos promedio se aprecia que una proporción entre el contenido más alto para uso con pastizal (563.75 t ha⁻¹) y el más bajo con hule-cacao (4703.07 t ha⁻¹) de 931.68 kg N t ha⁻¹. A su vez Benintende *et al.* (2008) encontraron que el nitrógeno total decrece a mayor profundidad hasta 80 % sin importar cuál manejo se tenga, pues se comprende que en la superficie el mayor contenido deriva de la descomposición de los residuos orgánicos suplidos o de la fertilización química.

Por su parte, Cristóbal-Acevedo *et al.* (2011) al evaluar un uso del suelo con dos manejos, cultivo de maíz con manejo orgánico y convencional, concluyen que después de ocho ciclos de cultivos se benefician las propiedades y los contenidos de nitrógeno en la superficie del suelo (0-3 cm), gracias al mayor contenido de materia orgánica, que a su vez incrementa el nitrógeno total y orgánico, aunque esto parece que sucede entre el uso con pastizal (tratamiento 1 con el contenido más alto) y el de hule-caoba (tratamiento 4, en segundo lugar), donde la proporción de Nt fue de 123 kg ha⁻¹; y el uso de hule (tratamiento 2), y hule-cacao (tratamiento 3 con el contenido más bajo, 4703.07 kg ha⁻¹) en los cuales la proporción es de 188.28 kg ha⁻¹.

Al respecto, la Comisión para la Cooperación ambiental (2001) menciona que los sistemas agroforestales tienen potencial a largo plazo para secuestrar CO₂ entre 43 y 74 Mg C ha⁻¹ y que suponen un incremento del 50 % en el contenido de COS, pues

como representación se afirma que para los sistemas de cacao se estima entre 8.4 y 10 t ha⁻¹ año de biomasa seca aéreas.

Fósforo asimilable

De acuerdo con el análisis de varianza no existen diferencias significativas en el contenido de fósforo asimilable entre cada uso del suelo (Cuadro 8). Es así que, los contenidos promedios oscilaron entre 7.36 mg kg⁻¹ y 6.66 mg kg⁻¹; ambos considerados como contenidos medios, con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Contenidos similares se reportan Tinal-Ortiz *et al.* (2020) en un Acrisol con cuatro usos: acahual, pastizal dominado por *Brachiaria humidicola* y pastos nativos y cultivo de piña (con fertilización química con edades desde seis y quince años) y tres niveles de pendiente (0-3%, 3-6% y 10-20 %) y Alejandro-Martínez *et al.* (2019) también en un Acrisol con cinco usos: acahual, pastizal, caña de azúcar, piña y yuca. Otro aspecto de esto es que el contenido de fósforo proyectado en una ha en el uso con pastizal resultó con 23.68 kg ha⁻¹, siendo el más alto, mientras que para el hule-cacao fue el más bajo con 17.80 kg ha⁻¹.

Es sabido que los suelos ácidos, particularmente los Acrisoles tienen deficiencias de bases cambiables y alta fijación de fósforo lo que se traduce en su baja fertilidad natural (Palma-López *et al.*, 2008), por lo que es necesario que en el manejo agronómico se auxilien con la aplicación de fertilizantes químicos (Palma-López *et al.*, 2007), situación que sustenta el productor, puesto que afirma la realizar dos fertilizaciones anuales en los usos con hule, hule-cacao y hule-caoba con aproximadamente entre 30 y 50 gramos de Yaramil, Urea, DAP y KCl.

También se explica que el contenido medio del fósforo en el horizonte superficial se relaciona con el contenido de MO ponderada que se almacena por causa del pH bajo, lo que para suelos en zonas tropicales hace que predominen los fosfatos orgánicos (Fassbender y Bormemisza, 1987; Alejandro-Martínez *et al.*, 2019). Y como señala Mengel y Kirkby (2000) que gran parte del fósforo está asociado a la MO.

Así refiere Fassbender y Bormemisza (1987), agregando igualmente que el fósforo se reduce a mayor profundidad, puesto que la MO también decrece, por lo que a

mayores contenidos de MO igualmente lo será el fósforo. Lo anterior encuentra sustento en los contenidos de MO y fósforo en la profundidad de cada horizonte, en vista de que la MO fue de 3.2 % y el fósforo de 5.3 mg kg⁻¹ en el horizonte superficial (0-20 cm) y en el último horizonte muestreado (100-120 cm) el contenido de MO fue de 0.9 % y del fósforo 2.9 mg ka⁻¹ (Figura 17).

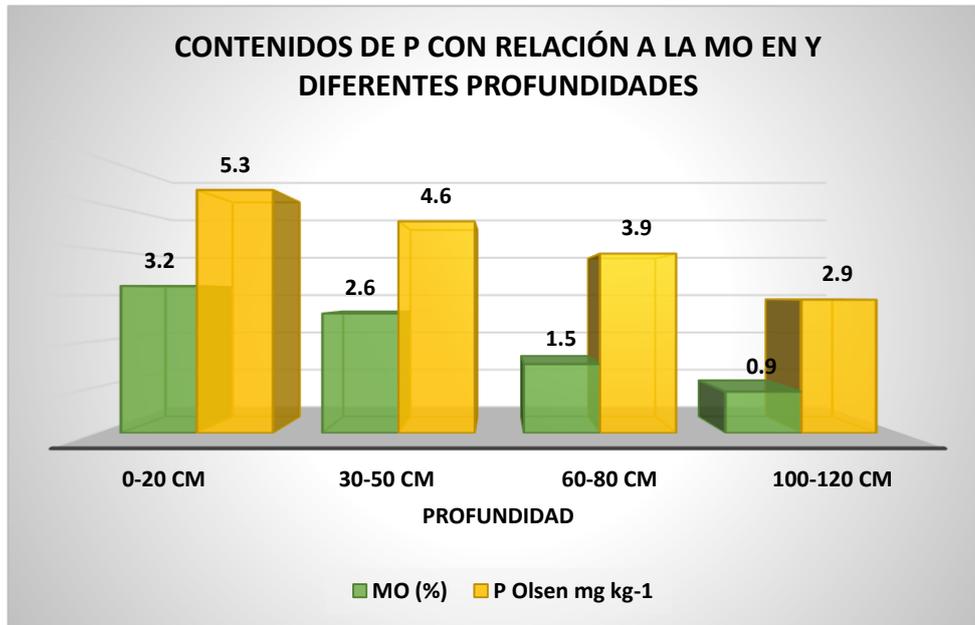


Figura 17. Contenido promedio de fósforo según los de MO

Ca²⁺ intercambiable

El análisis de varianza demuestra que no existen diferencias significativas entre los usos del suelo (Cuadro 8). Los valores oscilan entre 2.67 y 9.88 cmol (+) kg⁻¹. En lo que toca a los valores promedios el mayor resultó ser para el uso de suelo con hule-cacao 7.80 cmol (+) kg⁻¹ y el más bajo para el pasto con 5.51 cmol (+) kg⁻¹, todos los contenidos se categorizan como medios, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Aunque, proyectando los contenidos anteriores en kg ha⁻¹ resulta ser el nutriente más abundante en comparación con los otros, donde el mayor contenido promedio le corresponde al uso con hule-caoba con 4,048.34 kg ha⁻¹, y el menor le pertenece al uso con hule con 3426.20 kg ha⁻¹.

Basándonos en lo anterior, y retomando lo expresado con relación a que el contenido más bajo de Ca²⁺ en kg ha⁻¹, fue para el uso con hule, esto podría deberse a que, por ejemplo, según Borrelli y Oliva (2020) el calcio y otros elementos retorna

al suelo mediante la bosta y la orina (esto para la situación del uso como pastizal), a su vez los usos en los cuales hay cultivos intercalados la fertilización es mayor que en el monocultivo con hule, ya que hay establecidas dos especies.

Los fertilizantes que se usan son: Yaramila, Urea, DAP, KCl, Maxigrow, Bayfolan; en el caso de los fertilizantes sólidos se registran alternativamente dos aplicaciones anuales de entre 30-50 g por cada planta para cada uno de los usos, excepto el pastizal. Conviene subrayar que los suelos ácidos tienen problemas de CIC baja, ya que al ser suelos muy desarrollados han perdido las bases por proceso de lixiviación, predominantemente, por esta razón es necesario la aplicación de fertilizante (Quiroga y Romano, 2012).

En esto concuerdan Navarro y Navarro (2003) cuando mencionan que, en los suelos de textura gruesa, como en este caso es el Lixisol, la retención de Ca^{2+} es pobre, consecuencia directa de la abundante pluviometría que lo disuelve y lo extrae de la matriz edáfica o lo deposita en estratos donde no lo alcanzan las raíces, ya sea de los cultivos o la vegetación natural. Agregan que otra causa por la que las cantidades de Ca^{2+} habitualmente son escasas es que se enfrenta al desplazamiento del complejo adsorbente por el H^+ , por procesos erosivos o bien porque lo captan las plantas.

En el trópico húmedo de Tabasco la precipitación anual reportada, al menos para el 2020 fue de 3,017.9 mm, siendo el estado donde más llovió (Pascual *et al.*, 2021), por lo antes dicho, la naturaleza de los suelos y la geomorfología del área de estudio nos aportan evidencia suficiente de por qué las bases cambiables son bajas en estos suelos; a no ser que se aporten con fertilización principalmente química o aplicaciones de cal agrícola.

Mg²⁺ intercambiable

No hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > \alpha = 0.05$, $\text{CV} = 26.660\%$). Los valores hallados varían desde 0.50 a 0.98 $\text{cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$ (Cuadro 8) considerados bajos según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

El uso con pastizal resultó con el mayor contenido (0.77 $\text{cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$; 295.52 kg ha^{-1}), mientras que el contenido medio resultó para el hule-caoba (0.732 $\text{cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$; 277.20 kg ha^{-1}), de entre los cuales el tercer lugar lo ocupa el hule-caoba (0.74 cmol

(+) kg⁻¹; 270.13 kg ha⁻¹), siendo el más bajo para el uso con hule (0.73 cmol (+) kg⁻¹; 237.17 kg ha⁻¹).

Al respecto Palma-López y Triano (2007) sostienen que los suelos ácidos tienen problemas en el suministro de Mg²⁺, en seis agroecosistemas, uno con hule, establecidos en suelos Acrisoles, además reportan un contenido de Mg²⁺ de 0.90 cmol (+) kg⁻¹. Se debe tener en cuenta que la textura influye en la fertilidad de los suelos, tal y como se presenta en el GSR, en este caso un Lixisol que se caracterizan por tener texturas gruesas, resultado de su extrema intemperización y lixiviación de cationes básicos (Pereira *et al.*, 2011; Hernández-Hernández *et.*, 2020), por lo cual es lógico, dada las poca arcilla, su baja capacidad para retener nutrientes; natural en suelos muy desarrollados (Cosentino, 2007; Novillo *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020).

Cabe enfatizar, que el análisis granulométrico reveló que el horizonte A donde se muestreó es arenoso/franco, que pertenece a un GRS Ferric Lixisol (Cutanic, Endoloamic, Epiarenic, Humic, Profondic), como es sabido predominan la arena, partícula con menos superficie específica.

K⁺ intercambiable

No se demostraron diferencias significativas en el contenido de K⁺ entre los tratamientos ($p > \alpha = 0.05$, CV=32.479 %). Los contenidos promedio varían desde 0.10 a 0.13 cmol (+) kg⁻¹ suelo, son considerados muy bajos, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), sin embargo, el contenido promedio más alto de este elemento fue para el uso bajo pastizal (0.13 mg kg⁻¹; 161.99 kg ha⁻¹) (Cuadro 8) y el más bajo para el hule-caoba (0.10 mg kg⁻¹; 111.94 kg ha⁻¹).

Aunque comparados con otros estudios están ligeramente por encima, por ejemplo Tinal-Ortiz *et al.* (2020) quienes evaluaron la degradación química en Acrisols con cuatro usos y tres niveles de pendiente (0-3 %, 3-6 % y 10-20 %); en el pastizal dominado por *Brachiaria humidicola* y pastos nativos obtuvieron 0.068 cmol (+) kg⁻¹ lo que en el uso con pastizal en el estudio presente fue de 0.13 cmol (+) kg⁻¹ (en un Lixisol). Incluso, si se considera el acahual que evaluaron y que representa el uso con menos perturbación obtuvo 0.001 cmol (+) kg⁻¹, siendo el menor de todos, y el equivalente para el uso con hule-caoba con 0.10 cmol (+) kg⁻¹; aunque ambos

contenidos para todos los usos en los dos estudios caen dentro de la categoría de *Muy baja* en la citada norma.

Por su parte, Alejandro-Martínez *et al.* (2019) en el acahual registran $0.10 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$, contenido similar para el con hule-caoba (el más bajo), sin embargo, en el uso con piña reporta $0.14 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$, de cualquier forma, se evidencian los bajo contenidos de K^+ en suelos ácidos, pues las cantidades halladas son escasas. En cambio, Pascual-Córdova *et al.* (2017) aseguran que en su análisis del K^+ en un sistema agroforestal (que incluye cacao) mostraron diferencias significativas en distintas profundidades y estaciones, cuyos contenidos se identifican de muy bajos a bajos.

Destaca igualmente que el cacaotero extrae altas cantidades de K^+ y afirma que 1 ton de cacao extrae 80 kg ha^{-1} . Por su parte, López *et al.* (2015) agregan que en promedio 1 ton de semillas extrae 50 kg de K_2O , más los considerable contenidos de K^+ que se almacenan en la cascara (drupa). Añade que en suelos ácidos las bases intercambiables son bajas.

Sin embargo, la evaluación del contenido del K^+ demuestra el bajo contenido en el que se encuentra, pese a que el productor reporta la realización de dos aplicaciones (de aproximadamente 30 a 50 gramos por planta) alternadas anualmente de Dap y KCl. Al respecto Navarro y Navarro (2003) menciona que cuando se aplican fertilizantes potásicos en suelos de texturas gruesas (arenosos) el K^+ se pierde por lixiviación, en cantidades similares al absorbido por los cultivos hasta de 20 y 25 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ en regiones muy húmedas. Esto puede deberse al suministro excesivo de fertilizantes consecuencia del desconocimiento de las dosis adecuadas por parte del productor. Por lo que la fertilización podría ser deficiente al no estar considerando la dinámica del potasio.

6 Conclusiones

- El GSR identificado fue un Ferric Lixisol (Cutanic, Endoloamic, Epiarenic, Humic, Profondic). Se descarta la presencia de un Acrisol en el área de estudio, en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco.

- La producción de materia fresca fue 17,280 kg ha⁻¹. Producción total de materia seca del pastizal fue de 235.008 t en 25.50 ha⁻¹ o 10 t ha⁻¹;
- La producción de materia fresca fue de 440.64 t en 25.50 ha⁻¹ o 17,280 kg ha⁻¹
- Las condiciones del suelo hasta el horizonte A resultan ser favorables en todos los usos, sin embargo el uso con pastizal las variables: velocidad de infiltración, resistencia a la penetración, muestras valores bajos, aunque no suponen limitación para el crecimiento y desarrollo de las plantaciones, por su parte la Dap obtuvo el valor más alto lo que se refleja en la porosidad baja en comparación con los otros usos; reiterando que está dentro de lo aceptable.
- El contenido de MO no se mostró afectado con los usos; y en todos se consideran altos, causa de la poca mineralización de esta en suelos ácidos.
- El uso con hule-cacao muestra mayor capacidad de almacenamiento de COS, mientras que el uso con hule (monocultivo) tiene menos capacidad para esto.
- Los contenidos de P asimilable, Ca²⁺, Mg² se categorizan medios, por otro lado, el K⁺ fue muy bajo.
- La reducción de la profundidad del suelo es mayor en el uso con hule monocultivo, de igual manera fue la estimación del volumen y peso del suelo perdido por erosión. El uso con pastizal ha retenido más el suelo, pese a sus treintaisiete años con el mismo uso y manejo. La cobertura de vegetación sobre el suelo ayuda a reducir los procesos erosivos.
- La edad de los cultivos es insuficiente para inducir cambios en las propiedades físicas y químicas.

7 Literatura citada

Acosta Y, J Paolini, y E Benítez. 2004. Índice de humificación y prueba de toxicidad de uso agrícola potencial. Revista de la Facultad de Agronomía, 4: 185-194.

Afif E, P Valencia, y J A Oliveira. 2013. Aplicación de fuentes de fósforo al suelo en diferentes cortes de césped cultivado. *Agrociencia*, 47: 553-566.

Aguilar-Rodríguez, J R, J Zavala-Cruz, F Juárez-López, D J Palma-López, O Castillo-Acosta, y E. Shirma-Torres. 2017. Aptitud edáfica de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en la Terraza de Huimanguillo, Tabasco. *Agroproductividad*, 10: 79-84.

Alfonso C, A, M Monedero, S Hernández, V Somoza, y L Sánchez. 2000. Efecto de la compactación del suelo en la producción de frijol. *Agronomía Mesoamericana*, 11: 53-57.

Alfonso L, C A, M Monedero G. 2004. Uso, manejo y conservación de suelos. Asociación Cubana de técnicos Agrícolas y Forestales. Nuevo Vedado, Plaza, La Habana, Cuba. 71 p.

Alcañiz M, J. 2008. Erosión del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo. *In: Andrés P., y R. Rodríguez. (comps). Evaluación y prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica. Documenta Universitaria. Girona, España. 400 p.*

Alejandro M, P, y M De la Cruz M. 2018. Efecto del cambio de uso de suelo en las características edáficas en el ejido la esperanza municipio de Huimanguillo, Tabasco. Tesis. División de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico Superior de Villa la Venta. 56 p.

Alejandro-Martínez, P, M. De la Cruz-Morales, D. J. Palma-López, H Megia-Vera, y D J Palma-Cancino. 2019. Efecto del cambio de uso de suelo sobre las propiedades edáficas en La Sabana, Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad*, 12: 95-100.

Ali M H. 2010. Soil: A Media for Plant Growth. *In: Ali M H. Fundamentals of irrigation and On-farm Water Management: volumen 1. Springer. New York, NY, USA. pp: 107-218.*

Alves de Araújo, E, J C Ker, J C Lima N, y J L Lani. 2012. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Pesquisa e Agrotecnologia*, 5: 187-206. Ali M H. 2010. Soil: A Media for Plant Growth. *In: Ali M H. Fundamentals of irrigation and On-farm Water Management: volumen 1.* Springer. New York, NY, USA. pp: 107-218.

Armado M, J A, F C, y P García L. 2009. Fraccionamiento químico de carbón orgánico y su relación con la actividad microbológica, biomasa microbiana y cantidad de ADN en suelos cacaoteros venezolanos. *Rev. Soc. Química Perú*, 75: 44-53.

Astier-Calderón, M, M Maass-Moreno, y J Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36: 605-620.

Awale R, S Machado, R Ghimire, and P Bista. 2017. Soil Health. *In: Yorgey G., and C. Kruger. (comps). Advances in Dryland Farming in the Inland Pacific Northwest.* Washington State University. Washington, EE.UU. pp: 47-98.

Bai Z, G, D L, Dent, L Olsson, & M E, Schaepman 2008. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24: 224-234.

Bautista C, A, J Etchevers B, R F del Castillo, y C Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13: 90-97.

Benintende M, C, J J De Battista, S M Benintende, M F Saluzzio, C Muller, y M A Sterren. 2008. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 19: 141-174.

Bernal A, y C A Hernández J. 2017. Influencia de diferentes sistemas de uso del suelo sobre su estructura. *Cultivos Tropicales*, 4: 50-57. Bisutti I, I Hilke, and M Raessle. 2004. Determination of total organic carbon: an overview of current methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 23: 716-726.

Bohn L H, B L Mcneal, and G A O'Connor. 2001. *Soil chemistry*. 3rd ed. John Wiley & Sons. New York, United States of America. 307 p.

Bolaños A, M, F Paz P, C Cruz G, J A Argumedo E, V M Romero B, y J C de la Cruz C. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34: 271-288.

Bono A, y N Romano. 2012. Nitrógeno. *In: Quiroga A, y A Bono. (comps). Manual de fertilidad y evaluación de suelos. EEA INTA. La Pampa, República Argentina. pp: 101-105.*

Borrelli P, y G Oliva. 2001. Efectos de los animales sobre los pastizales. *In: Borrelli P, y G Oliva. (comps). Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral. INTA. Patagonia del Sur, Argentina. pp: 99-128.*

Bünemann K, E, G Bongiorno, Z Bai, R E Creamer, G de Deyn, R de Gode, L Fleskens, V Geissen, T W Kuyper, P Mädera, M Pulleman, W Sukkel, J Willem van Groenigen, and L Brussaard. 2018. Soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105-125.

Buol W, S, R J Southard, R C Graham, and P A Mcdaniel. 2011. *Soil Genesis and Classification. 6th ed. Editorial Offices. 2121 State Avenue, Ames, Iowa, USA. 543 p.*

Burbano O, H. 2017. La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas*, 18: 118-126.

Cairo-Cairo, P, B Díaz-Martínez, & A Rodríguez-Urrutia. 2017. Soil quality indicators in Vertisols under sugarcane. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63: 1477-1488.

Calvaruso Ch, et A Blanchart, S Bertin, C Grand, A Pierat. 2021. Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés? *Revue de la littérature et sélection de paramètres et ateliers participatifs. Étude et Gestion des Sols*, 28: 3-29.

Camargo C, C Pacheco, y R López. 2017. Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20: 265-280.

Carter R, M. 1996. Concepts of soil quality. *In*: MacEwan J R, and Carter R M. (comps). *Soil quality is in the hands of the land manager*. Centre for Environmental Management, University of Ballarat. Ballarat, Victoria, Australia pp: 5-9.

Castellanos J, Z, J X Uvalle-Bueno, y A Aguilar-Santelises. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. 2ª ed. Editorial Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México. 201 p.

Castillo-Valdez, X, J D Etchevers, C Ma. I Hidalgo-Moreno, y A Aguirre-Gómez. 2021. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39: 1-12.

Cepeda D, J M. 2016. *Química de suelos*. Trillas. Distrito Federal, México 167 p.

Chávez-García, E, S Rist, y Á Galmiche-Tejeda. 2012. Lógica de manejo del huerto familiar en el contexto del impacto modernizado en Tabasco, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 9: 177-200.

CIMMYT. 2013. Resistencia a la penetración. Guía para comparar las prácticas de manejo del cultivo. CIMMYT, Ciudad de México, México. 7 p.

Cristóbal-Acevedo, D, M E Álvarez-Sánchez, E Hernández-Acosta, y R Améndola-Massiotti. 2011. Concentración de nitrógeno en el suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana*, 29: 325-332.

Cruz-Macías, W O, L A Rodríguez-Larramandi, M Á Salas-Marina, V Hernández-García, R A Campos-Saldaña, M H Chávez-Hernández, y A Gordillo-Curiel. 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: 475-480.

Cosentino J, D. 2007. Textura. *In*: M Conti. (comp). Principios de edafología. Con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, República Argentina. pp: 45-64.

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

Cuanalo de la C, H. 1990. Manual de descripción de perfiles de suelo en el campo. 3ª edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 75 p.

Dai Y, W Shangguan, N Wei, Q Xin, H Yuan, S Zhang, S Lium X Lu, D Wang, and F Yan. 2019. A review of the global soil property maps for Earth system models. *Soil*, 5: 137-158.

D'Amico, J P, Varela, M V Caracotche, y M C Bellacomo. 2017. ¿Cómo iniciar los cultivos hortícolas en labranza cero o siembra directa? Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 8 p.

Derrick, J W, and D C Dumaresq. 1999. Soil properties under organic and conventional management in southern New South Wales. *Australian Journal Soil Research*, 37: 1047-1055.

Díaz M, C. 2011. Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 3: 80-90.

Drobnik T, L Greiner, A Keller, and A Grêt-Regamey. 2018. Soil quality indicators-From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94: 151-160.

Duchaufour P, P Faivre, J. Poulenard, M. Gury. 2018. *Introduction à la Science du Sol*. 7e ed. Dunod Editeur. Paris, France. 442 p.

Elizondo S, J. 2006. El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. *Agronomía Mesoamericana*, 17: 69-77.

Echavarría C, F G, A Serna P, R Bañuelos V, H Salinas G, M J Flores N, R Gutiérrez L. 2007. Degradación física de los suelos de pastizal bajo pastoreo continuo en el Altiplano de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Víctor Rosales, Calera, Zacatecas, México. 36 p.

Emerson W, W. 1964. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition. *Soil Research*, 2: 211-217.

Estevam-Alves, R, L Francisca-de-Souza, V M De-Souza, T A Ferreira-Queiroz, e J Viera-Lima. 2016. A degradação e fragilidade dos solos no Sudoeste de Goiás: o caso da bacia hidrográfica do Ribeirão da Picada. *Revista Geográfica de América Central*, 1: 235-258.

Estrada-Herrera, R I, C Hidalgo-Moreno, R Guzmán-Plazola, J J Almaraz S, H Navarro-Garza, y J D Etchevers-Barra. 2017. Indicadores de la calidad del suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51: 813-851.

Fajardo M, P, F Nájera, V Pino, B Minasny, and A B McBratney. 2021. Spectral information related to soil: An example from Australia. *Geoderma Regional*, 25: 1-7.

Fassbender W, H, y Bornemisza. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. 2ª ed. IICA, San José, Costa Rica, 420 p.

FAO. 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW). Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United. Rome and Earthscan, London, 308 p.

FAO. 2016. Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Roma, Italia. 79.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) & NRED (Natural Resources and Environment Dept.). 2015. Carta Mundial del Suelo. Rome, Italy. FAODOCREP: b8d2fef4-0493-4aa9-b835-65068b9f3ccd. 12 p.

FAO. 2017a. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 16 p.

FAO. 2017b. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia. 77 p.

FAO y MADS. 2018. Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales. Food and Agriculture Organization of the United Nations y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia. 144 p.

FAO, and IUSS (International Union of Soil Sciences). 2021, 20 de November. The Magical World of Soil Biodiversity. A Collection of 10 Children's Stories From Around the World. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4185en>

FAO. 2021. *Sobre el día mundial del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/world-soil-day/about-wsd/es/>

Farooq M, & K H M Siddique. 2014. Conservation Agriculture: Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems. *In*: M Farooq & KHM Siddique. (comps). Conservation Agriculture. Springer International Publishing, Germany. pp: 3-17.

Fernández L, M I. 2020. Ventajas de R como herramienta para análisis y visualización de datos en Ciencias Sociales. *Revista Científica de la USCA*, 7:97-11.

Flores D, L, y Alcalá M J R. 2010. Manual de procedimientos Analíticos. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México, México. 56 p.

FitzPatrick E A. 2011. Introducción a la Ciencia de los Suelos. Alejandro Domínguez González. Trillas. Distrito Federal, México. 288 p.

Foloni J, J Calonego, S de Lima. 2003. Efecto de la compactación del suelo en desenvolvimiento aéreo y radical de cultivos de Brasilia. *Revista Agropecuária Brasileira*, 38: 947-953.

Francis R, M N Wuddivira, J Darsan y M Wilson. 2018. Soil slaking sensitivity as influenced by soil properties in alluvial and residual humid tropical soils. *Journal of Soils and Sediments*, 19: 1937-1947.

Gabioud A, E, M G Wilson, y C Sasal. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo*, 29: 129-139.

Gallardo L, J F. 2015. Conceptos de Suelo y Proyecciones de Líneas de Investigación Futuras. *In: Cruz F, G, y A B López L. (comps). Redescubriendo el Suelo: Importancia Ecológica y Agrícola. FES-Zaragoza, UNAM y CONACYT. Ciudad de México, México. pp: 1-4.*

García E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. 5ª ed. Instituto de Geografía-UNAM. Ciudad de México, México. 90 p. + anexos.

García-Hernández, M A, García-Hernández M A, Castellanos-Vargas I, Cano-Santana Z, y Peláez-Rocha C M. 2007. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana*, 6: 21-27.

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

Gardi C, M Angelini, S Barceló, J Comerma, G Cruz G, A Encina R, A Jones, P Krasilnikov, M de L Mendonça S Brefin, L Montanarella, O Muniz U, P Schad, M I Vara Ro, y R Vargas. 2014. (comps). Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión europea, L-2995 Luxemburgo, 176 p.

Germán W, M. 2017. Manual de indicadores del suelo para las ecorregiones de Argentina. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Entre Ríos, Argentina. 294 p.

Gómez J, J C. 2013. Manual de Prácticas de Campo del Laboratorio de Suelos. Servicio Nacional de Aprendizaje. Tolima, Colombia. 102 p.

González M, R, V Volke H, J González R, M Ocampo P, C Ortiz S, y F Ramos M. 2007. Efecto de la erosión del suelo sobre el rendimiento de Maíz de Temporal. *Terra Latinoamericana*, 25: 399-408.

Hellin J, and S López R. 2016. Soil and water conservation on Central American Hillsides: If more technologies is the answer, what is the question? *AIMS Agriculture and Food*, 1: 194–207.

Hernández-Hernández, M, D J Palma-López, S Salgado-García, D J Palma-Cancino, J A Rincón-Ramírez, C Hidalgo-Moreno, y H Cuanalo-de la Cerda. 2020. Carbón vegetal como mejorador de un Acrisol cultivado con caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agroproductividad*, 13: 35-41.

Henríquez C, O Ortiz, K Largaespada, P Portugués, M Vargas, P Villalobos, y D Gómez. 2011. Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35: 175-184.

Hillel, D, C Rosenzweig, D Powlson, K Scow, M Scow, M Singer, and D Sparks. 2005: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 1st. eds. Elsevier/Academic Press. New York, USA. 102 p.

INIFAP. 2005. La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. INIFAP. Celaya, Guanajuato, México. 44 p.

IUSS Working Group WRB. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. 3ª ed. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. FAO, Roma. 205 p.

Jaramillo J V. 2004. El ciclo global del carbono. *In*: Martínez J, y Fernández B A. (comps). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, y Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales. D.F., México. pp: 77-85.

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

Jones E J, P Filippi, R Wittig, R, M Fajardo, M, V Pino, and A B McBratney. 2021. Mapping soil slaking index and assessing the impact of management in a mixed agricultural landscape. *Soil*, 7: 33–46.

Jiménez B, R, V González-Quiñones O, y P Conde B. 2006. Calidad del suelo. *In*: Bienes R, y M J Márquez. (comps). Conservación del medio ambiente: revegetación, recuperación del suelo y empleo de residuos en el control de la erosión. Instituto Madrileño de Investigación en Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA). Madrid, España. pp: 2-24.

Karlen D L, M J Mausbach, J W Doran, R G Cline, R F Harris, and G E Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science of American Journal*, 61: 4-10.

Kiersch B, y M González. Suelos sanos para un mundo sin hambre. 2015. *In*: Flores H. (comps). Boletín de agricultura familiar para América y el Caribe. Abril-junio de 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. pp. 12: 36.

Klein V A, P L, Libardi. 2002. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26: 857-867.

Laban P, G Metternicht, y J Davies. 2018. Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas. Unión

internacional para la conservación de la naturaleza (UICN). Gland, Suiza viii + 24 p.

Lehmann J, D A Bossio, I Kögel-Knabner & M C Rillig. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 544-553.

López F, R. 2002. Degradación del suelo. Causas, procesos, evaluación e investigación. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 279 p.

López V, V H, A B Plata, M C Chávez M, J I Juan P, J G Gutiérrez C. 2014. Cambio de uso de Suelo en Implicaciones Socioeconómicas en un Área Mazahua del Altiplano Mexicano. *Ciencia ergo-sum*, 22: 136-144.

López B, O, S I Ramírez, S Espinoza Z, J L Moreno M, C Ruiz B, J M Villarreal F, y J L Rojas. 2015. Manejo agroecológico de la nutrición en el cultivo del cacao. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Estados Unidos Mexicanos. 117 + anexos.

López R. M. Servicios Ecosistémicos del Suelo. Revista [Internet]. 6 de septiembre de 2016 [citado 30 de junio de 2021]; 4(1). Disponible en: <https://revistaecuadorestabilidad.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorestabilidad/index.php/revista/article/view/52> Loredó-Ostí, C, S Beltrán L, F Moreno S, y M Casiano D. 2007. Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí. Libro Técnico núm. 3. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. San Luis Potosí, S. L. P. México. 209 p.

Mabit L, C Bernard, y R Lavedière. 2007. Étude de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant la méthode du ¹³⁷Cs. *Agrosolutions*, 18:12-16.

Machado V, F, y J Mielniczuk. 2009. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 743-755.

Mclvor I, H Youjun, L Daoping, G Eyles, and Z Pu. 2017. Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 2014, pp. 208–221.

Marañón T, y E Madejón. 2017. Funciones del suelo y servicios ecosistémicos: Importancia de la materia orgánica. *In: López N, R, y F Cabrera C. (comps). Reciclando los residuos para mejorar los suelos y el medioambiente. V Jornadas de la Red Española de Compostaje. Red Española de Compostaje. España. pp: 13-16.*

Marín, S G L. 2011. Edafología. Espacio Gráfico Comunicaciones. Caldas, Colombia. 168 p.

Mason G M, and R F Brennan. 2000. Nitrogen. *In: Anderson W K, and J R Garlinge. (comps). The Wheat book: principles and practice. Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia, Perth. Bulletin 4443. pp: 87-91.*

Mausel P W. 1971. Soil quality in Illinois—an example of a soils geography resource analysis. *The Professional Geographer* 23:127–136.

Mengel K, y E A Kirkby. 2000. Principios de nutrición vegetal. 4ª ed. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza. 608 p.

Menegaz De F P, y Arellano. 2016. Importancia de los suelos en los sistemas ganaderos. *In: Huerta C C, y Cruz R. (comps). Hacia una ganadería sustentable y amigable con la biodiversidad Estudio de caso: Xico, Veracruz. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México. pp: 55-78.*

Mesa J, M A, M A Díaz P, y C Sánchez A. 2015. Compendio de indicadores 2014. Programa de concurrencia con las Entidades Federativas. Tabasco. El Colegio de la Frontera Sur. Villahermosa, Tabasco. 72 p.

Michael R, F. 2010. ¿Cómo aforar un potrero para pastorear correctamente? 18 p. Sitio Argentino de Producción Animal. Recuperado de <https://www.produccion-animal.com.ar/>

Montaño M, N, F Ayala, S H Bullock, O Briones, F García O, R García S, Y Maya, Y Perroni, C Siebe, Y Tapia Torres, E Troyo, y E Yépez. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34: 39-59.

Montaño A, N M, M Del C R Navarro, I C Patricio L, E Chimal S, y J Miguel de la Cruz. 2018. El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? *Ciencia-ergo-sum*, 25:3.

Muñoz-Rojas, M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5: 47:52.

Murphy A E. 2015. *Building Soil. A Down-to-Earth Approach. Natural Solutions for Better Gardens & Yards.* Cool Springs Press. Minneapolis, Minnesota. 200 p.

Murillo-De la Rosa, A, J J Obrador-Olan, M Castelán-Estrada, E García-López, Eustolia, E Carrillo-Ávila, y A Guerrero-Peña. 2019. Distribución vertical de raíces en seis agroecosistemas en un Acrisol de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad*, 12: 79-85.

Navarro B, S, y G Navarro G. 2003. *Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal.* 2ª ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 487 p.

Navarrete S, A, G Vela C, J López B, y Ma. de L Rodríguez G. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80: 29-37.

Navas, Alexander. 2016. *Sistemas silvopastoriles.* Bogotá: Tropenbos Internacional, Colombia y Fondo Patrimonio Natural. Colombia. 82 p.

Nkonya E, N Gerber, P Baumgartner, Philipp, J B Von, A De Pinto, V Graw, E Kato, J Kloos, and T Walter. 2011. *The Economics of Desertification, Land Degradation, and Drought Toward an Integrated Global Assessment.* ZEF-Discussion Papers on Development Policy No. 150, Available at

SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1890668> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1890668>

Noguera J M A, y J A Vélez L. 2011. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Rev. de Ciencias Agrícolas*, 28: 40-52.

Novillo E, I D, M D Carrillo Z, J E Cargua C, Nabel M, K E Albán S, y F Morales I. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios*, 23: 177-187.

Onaindia O, M. 2010a. Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas. *In: Viota F, y M Maraña S. Servicios de los ecosistemas y bienestar humano. La contribución de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Bilbao, España. pp: 9:14.*

Onaindia O, M. 2010b. Servicios ambientales de los ecosistemas. *In: Hernando B, Z, C H Sierra H, y M Angulo T. Amazonia y agua. Desarrollo sostenible en el siglo XXI. UNESCO. España. pp: 29-38.*

Oficina Nacional Forestal. 2013. Guía técnica SAF para la implementación de sistemas agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. Oficina Nacional Forestal. San José, Costa Rica. 30 p.

Okebalama, C B, I gwe, and C C Okolo. 2017. Soil organic carbón levels in soils of contrasting land uses in Southern Nigeria. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 20: 493-504.

Ortiz S, C. 2019. Edafología. Trillas. Ciudad de México, México. 399 p.

Ovalle C, F Rodríguez, A Osman, S Espinoza, y A del Pozo. 2020. Beneficios, restricciones y limitaciones de las cubiertas vegetales. *In: Ovalle M C. (comp). Cubiertas vegetales: una herramienta fundamental del suelo en huertos frutales, viñedos y hortalizas. Instituto de investigaciones Agropecuarias. La Cruz, Región de Valparaíso, Chile. pp: 15-32.*

Palma-López, D J, J Cisneros D, E Moreno C y J A Rincón-Ramírez. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de postgraduados-

ISPROTAB-Fundación Produce Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 200 p.

Palma-López, D J, y A Triano S. (comps). 2007. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco, Vol. II. 2ª reimpresión. ed. COLEGIO DE POSTGRADUADOS-ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 180 p.

Palma-López, D J, E Moreno C, J A Rincón-Ramírez, E D Shirma T. 2008. Degradación y conservación de los suelos del estado de Tabasco. Colegio de Postgraduados, CONACYT, CCYTET. Villahermosa, Tabasco, México. 74 p. + anexos.

Palma-López, D J, D J Vázquez, N C J, Z E E Mata, C A. López, M A Morales G, P R Chablé, H J Contreras, y D Palma-Cancino. 2011. Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco. 128 p.

Palma-López, D J, S Salgado-García, G Martínez, S, J Zavala-Cruz, y L Del C Lagunez-Espinoza. 2015. Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3: 163-172.

Palma-López, D J, F Mercado-Zapata, D J Palma-Cancino, J Jasso-Mata, E Ávila-Carrillo, y S Salgado-García. 2019. Producción de biomasa y extracción de nutrientes en una plantación de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) y *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) en Ultisoles de México. *Agroproductividad*, 12: 25-30.

Pascual-Córdova, G, J J Obrador-Olan, E Carrillo-Ávila, S Sánchez-Soto, A Guerrero-Peña, F Ortiz-García. 2017. Evaluación del sistema agroforestal (*Theobroma cacao* L.), mediante indicadores de calidad de suelo en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10: 36-42.

Pascual R R, M López Q, L A Chablé P, Y Loranca D, J I Ledesma LM, A G Zavala F, y A E Martínez M. 2021. Reporte del clima en México. Reporte anual 2020. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. pp: 93.

Pedrinaci E, S Alcalde, P Alfaro, G R Almodóva R, J L Barrera, A Belmonte, D. Brusi, A Calonge... E Roquero. 2013. Alfabetización en Ciencias de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 21: 117-129.

Perales A, O Loli, J Alegre, y F Camarena. 2009. Indicadores del manejo de suelo en la producción de arveja (*Pisum Sativum* L.). Ecol. apl., 8: 47-52.

Pérez M, R Puchades P, and A Maquieira C. 1991. Determination of asimilable phosphorus in soils by reversed flow injection analysis. Soil Science, 151: 349-354.

Pereira M, C A, C Maycotte M, B E Restrepo, F Mauro, A Calle M, y M J Esther V. 2011. Edafología 1. Espacio Gráfico Comunicaciones. Caldas, Colombia. 108 p.

Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Tabasco. 2016. Plan Municipal de Desarrollo 2016-2018. Gobierno del estado de Tabasco. Huimanguillo, Tab. México. 56 p.

Porta J C, M López-Acevedo R, y C Roquero de L. 2003. Edafología para la Agricultura y el medio ambiente. 3ª ed. Mundi-Prensa. Bilbao, España. 929 p.

Porta J, M López-Acevedo, y C Roquero. 1999. Edafología para la Agricultura y el medio ambiente. 2ª ed. Mundi-Prensa. Bilbao, España. 849 p.

Porta J, M López-Acevedo, R M Poch. 2019. Edafología Uso y protección de suelos. 4ª ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 623 p.

Quiroga A, y N Romano. 2012. El sistema suelo y características del intercambio de iones. *In*: Quiroga A, y A Bono. (comps). Manual de fertilidad y evaluación de suelos. EEA INTA. La Pampa, República Argentina. pp: 11-18.

Ramírez-Ortiz, F A, Hincapié-Gómez E, y Sadeghian-Khalajabadi. 2009. Erodabilidad de los suelos en la zona central del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60: 58-71.

Ramos-Reyes, R, D J Palma-López, C A Ortiz-Solorio, C F Ortiz-García, y P Días-Padilla. 2004. Cambios de uso de suelo mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22: 267-278. Ramos R, R, M A Palomeque De la C, J C Núñez, y R Sánchez H. 2019. Análisis geomático espacial del cambio de uso del suelo en Huimanguillo, Tabasco (2000-2010-2030). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10: 118-139.

Ramesh T, N S Bolan, M B Kikham, H Wijesekara, M Kanchikerimath, C rinivasa R, S Sandeep, J Rinklebe, Y Sik O, B U Choudhury, H Wang, C Tang, X Wang, Z Song, and O W Freeman. 2019. Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. *In: Sparks L D. Advances in Agronomy. Zoe Kruze. Newark, Delaware, USA. pp: 1-107.*

Rodríguez-Eugenio, N, McLaughlin, M and Pennock, D. 2018. Soil Pollution: a hidden reality. Rome, FAO. 142 p.

Rosales-Naranjo, L, M Pérez-Rodríguez, J Herrera-Puebla, A González-Rodríguez, y G Cid-Lazo. 2020. Efecto del manejo del suelo sobre la infiltración en un suelo Ferralítico Rojo compactado. *Rev. Ingeniería Agrícola*, 10: 20-30.

Saavedra-Mora, D, V Murcia-Torrejano, L Machado-Cuellar, J Sánchez-Cerquera, L F Estrada-Quintero, y C M Ordoñez-Espinoza. 2019. Propiedades físicas y químicas de suelos y su relación con sistemas de producción en el municipio Campoalegre Departamento del Huila, Colombia. *Bioagro*, 31: 151-158.

Salgado-García, S, D J Palma-López, J Zavala-Cruz, C F Ortiz-García, M Castelán-Estrada, L C Lagunes-Espinoza, A Guerrero-Peña, A I Ortiz-Ceballos, y S Córdova-Sánchez. 2010. Sistema integrado para recomendar

dosis de fertilizantes (SIRDF): en la zona piñera de Huimanguillo, Tabasco. Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco. México. 81 p.

Salgado-García, S, D J Palma-López, J Zavala-Cruz, C F, Ortiz-García, L C Lagunes-Espinoza, A L Ortiz-Ceballos, S Córdova-Sánchez, S Salgado-Velázquez. 2017. Los suelos ácidos de La Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10: 16-21.

Salamanca J A, y Sadeghian K S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*, 56: 381-397.

Sánchez V, J J, J J Obrador O, D J Palma-López, y S Salgado G. 2003. Densidad aparente en un Vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia*, 28: 347-351.

Satyawan D, J, and P T Nimbalkar. 2012. Infiltration studies of different soils under different soil conditions and comparison of infiltration models with field data. *International Journal of Advanced Engineering Tecnology*, 3: 154-157.

Saynes S, V, J D Barra E, F Paz P, H J Bernardus De J, C O Cruz, M Carrasco, C M I Moreno H, y J Padilla. 2012. Carbono en los suelos forestales de México: revalorando nuestros almacenes. *In: F. Paz y R. Cuevas. (comps). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011. Programa Mexicano del Carbono, Universidad Autónoma del Estado de México e Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México, México. pp: 422-429.*

SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de Suelos. Estudios, muestreos y análisis NOM-021-RECNAT (-2000). Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México. 73 p.

SEMARNAT, y COLPOS. 2003. Memoria Nacional 2001-2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional. D. F. México. 67 p.

SEMARNAT. y Universidad Autónoma Chapingo. 2003. Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1: 1 000 000. Memoria 2001-2002. SEMARNAT y UACH. México. 69 p.

SEMARNAT. 2016. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. SEMARNAT. México. 500 p.

Schoonover E, J, and J F Crim. 2015. An Introduction to Soil Concepts and Role of Soil in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154: 21-47.

Siebe C, R Jahn, y K Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 57 p.

Silva P, A, B A Rodríguez R, y N Vargas A. 2020. Análisis textural en la regulación de funciones ecosistémicas en sistemas agroforestales de un Oxisol de Piedemonte Llanero en época seca, Colombia. *IDESIA*, 38: 43-51.

Soares R, R A. 2018. *Ciência do solo, morfologia e gênese*. Editora e Distribuidora Educacional, Londrina. Paraná, Brasil. 246 p.

Solís H, A, J A Nájera L, J Méndez G, B Vargas L, y M Álvarez G. 2014. Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Rev. Investigación y Ciencia*, 22: 5-11.

Tan H, K. 2011. *Principles of soil chemistry*. 5th ed. Board. Athens, Georgia, U.S.A. 362 p.

Tarbutck J E, y K Lutegens F. 2005. *Ciencias de la Tierra. Introducción a la geología física*. 5ª ed. Pearson Educación. Madrid, España. 686 p.

Tinal-Ortiz, S, D J Palma-López, J Zavala-Cruz, S Salgado-García, D J Palma-Cancino, y C Hidalgo-Moreno. 2020. Degradación química en Acrisoles bajo diferentes usos y pendientes en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad*, 13: 69-75.

Tomiwa A, A, B Ncube, R Mulidzi, F Bayo L. 2020. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil & Tillage Research*, 204: 104717.

Trucios C, R, M Rivera G, G Delgado R, J Estrada A, y J Cerano P. 2013. Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31: 339-345.

Trujillo-Narcía, A, M C Rivera-Cruz, J C Jiménez-Jiménez, y E D Cázarez-Ruíz. 2018. Estudios edafológico y de impacto ambiental en un área aluvial en Tabasco. *In: Martínez H J, M A Ramírez G, y J Cámara-Córdova. (comps). Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. pp: 609-618.*

Trujillo-González, J M, J D Machecha P, y M A Torres-Mora. 2018. El recurso suelo: un análisis de sus funciones, capacidad de usos e indicadores de calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9: 31-37. Universidad Autónoma Chapingo. 2016. Insumos para el Atlas Nacional de vulnerabilidad al cambio climático: Evaluación integrada de la sensibilidad al cambio climático sobre los suelos y el potencial productivo agrícola; e identificación de indicadores que integren la perspectiva de género. Informe final. Universidad Autónoma Chapingo. Distrito Federal, México. 197 p.

USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Instituto de Calidad de Suelos y Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Estados Unidos. 82 p.

Vallejo-Quintero, V E. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16: 83-99.

Valenzuela B, I G, R F Camarón, y E Visconti M. 2015. Efecto del uso y manejo sobre las propiedades físicas de un suelo bajo dos sistemas de cultivo en el distrito de riego del río Zulia, Norte de Santander. *Suelos Ecuatoriales*, 42: 41-47.

Vargas H. 2019. Manual de buenas prácticas para una ganadería bovina sostenible en Guatemala. Departamento de Estado de los Estados Unidos, Programa Centroamérica Resiliente (ResCA), The Nature Conservancy. Guatemala. 80 p.

Vázquez N, C, E E Mata Z, D J Palma L, A López C, y G Márquez C. 2011. Valoración económica de los bienes y servicios Ambientales en Zonas con Influencia Petrolera en Tabasco. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco, México. 100 p.

Vela C, G, J López B, y M L Rodríguez G. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, Centro de México. *Investigación Geográficas*, 77: 18-30.

Villaseñor O, D. 2016. Fundamentos y procedimientos para análisis físico morfológicos de suelos. Universidad Técnica de Machala. 76 p.

Volverás M, B, y E Amézquita C. 2009. Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 58:35-39.

White E, R. 2006. Principles and practice of soil science. The soil as a natural resource. 4th ed. Blackwell Science. EE. UU. pp: 245-246.

Yang S, L Lianyou, Y Ping, y C Tang. 2005. A review of soil erodability in water and wind erosion research. *Journal of Geographical Sciences*, 15: 167-176.

Zaccagnini E, M, N C Calamari, A Goijman, L Solari, R Suárez, J Decarre, y G Gavier. 2014. El Agroecosistema como hábitat de la biodiversidad. *In*: M E, M G Wilson, y J D Oszust. (comps). Manual de Buenas Prácticas para la Conservación del Suelo y sus Servicios ecosistémicos. INTA. Buenos Aires, Argentina. pp: 19-30.

Zamudio V, y E Méndez. 2011. La vulnerabilidad de erosión de suelos agrícolas en la región centro-sur del estado de Nayarit, México. *Ambiente y Desarrollo*, 28: 11-40.

Zavala-Cruz J, D J Palma-López, C R Fernández C, A López C, y E Shirma T. 2011. Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX. Villahermosa, Tabasco, México. 90 p.

Zavala-Cruz, J, D J Palma-López, C R Fernández C, A López C, y E Shirma T. 2014. Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX. Villahermosa, Tabasco, México. 920 p.

Zavala-Cruz, J, R Jiménez R, D J Palma-López, F B Zuñiga, y F Gavi R. 2017. Paisajes geomorfológicos: Base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 3: 161-177.

Anexos

Procedimientos para evaluar la velocidad de infiltración

Para este ensayo se utilizaron los siguientes materiales:

- Un cilindro (tubo de PVC hidráulico) de 20.32 cm de diámetro y 20 cm de altura
- Bolsa de polietileno transparente (extendida)
- Vaso con capacidad de 500 mL
- Agua purificada
- Cronómetro del celular
- Mazo de hule

Procedimiento

- Se seleccionó el área representativa para el muestreo y se despejó la superficie de MO y todo material que impida la realización del ensayo.
- Se introdujo 7 cm en el suelo el extremo oblicuo (biselado) del cilindro golpeado cuidadosamente con el mazo de hule (Figura 4). Seguidamente se afirmó el suelo del exterior sobre el borde del cilindro.
- Se extendió la bolsa de polietileno transparente dentro del cilindro dejando el remanente por fuera del cilindro.

- Se llenó el vaso a capacidad máxima y se vertieron los 500 mL de agua dentro del cilindro de tal manera que no se salga de la bolsa de polietileno transparente.
- Se preparó el cronometro y se retiró del cilindro la bolsa halándola de las partes exteriores. Se inició la medición del tiempo en minutos hasta que el agua se hubo infiltrado totalmente; se caracteriza por la superficie brillante del suelo.

Se anotó el tiempo de infiltración.

Procedimientos para evaluar resistencia a la penetración

Procedimiento

1. Se realizó en la superficie del suelo a 30 cm de la excavación realizada para identificación de la profundidad del horizonte A.
2. El área seleccionada se despejó de MO y se evitó tomar datos sobre raíces u otros materiales sólidos que alterasen la lectura de la resistencia a la compactación.
3. Se introdujo suavemente el penetrómetro en el suelo hasta alcanzar la marca de penetración localizada previamente del pistón (Figura 5).
4. Se registró el valor obtenido que fue indicado por el anillo de fricción.

Procedimientos para evaluar DAp

El cálculo de la Dap, con base en las fórmulas de Ortiz (2019):

$$\text{Volúmen del cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h;$$

$$Dap = \frac{\text{Peso del suelo seco g (105°C)}}{\text{Volúmen del cilindro (t m}^{-3}\text{)}}$$

El volumen del cilindro se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi * r^2 * h$$