



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE



APROBADA



CALIDAD DEL SUELO Y EROSIÓN HÍDRICA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**Doctor en Ciencias en Agricultura Multifuncional
para el Desarrollo Sostenible**

Presenta:

M. C. JORGE LUIS NUÑEZ PEÑALOZA

Bajo la supervisión de:
DR. JOEL PÉREZ NIETO



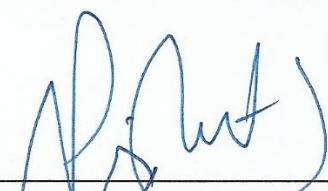
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2024

**CALIDAD DEL SUELO Y EROSIÓN HÍDRICA EN SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN DE LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA**

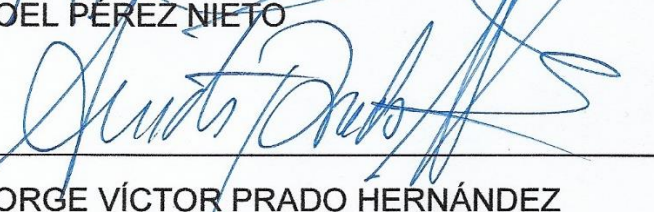
Tesis realizada por **JORGE LUIS NUÑEZ PEÑALOZA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR: _____


DR. JOEL PÉREZ NIETO

ASESOR: _____


DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR: _____


DR. JULIO CESAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR: _____


DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

LECTOR EXTERNO: _____


DR. GENARO OLMOS OROPEZA

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	12
1.1	Objetivo general	14
1.2	Objetivos específicos	14
1.3	Hipótesis	15
1.4	Contenido temático	16
1.5	Literatura citada	16
2	ANÁLISIS DE INDICADORES E ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELOS EN MÉXICO *	18
2.1	Resumen	18
2.2	Abstract	18
2.3	Introducción	19
2.4	Materiales y métodos.....	20
2.4.1	Resultados y discusión	20
2.4.2	Conclusiones	27
2.5	Literatura citada	27
3	IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SUELO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DEL PROGRAMA MEXICANO SEMBRANDO VIDA	33
3.1	Resumen	33
3.2	Abstract	33
3.3	Introducción	34
3.4	Materiales y métodos.....	36
3.4.1	Área de estudio	36
3.5	Descripción de los sistemas de producción.....	37
3.5.1	Sistemas de producción promovidos por el PSV.....	38
3.5.2	Sistemas convencionales de la región.....	39
3.6	Muestreo para determinar fertilidad inicial del suelo	40
3.7	Muestreo para determinar calidad del suelo en sistemas de producción promovidos por el PSV y en sistemas convencionales de la región.....	41
3.8	Análisis de laboratorio.....	42
3.8.1	Diagnóstico de la fertilidad inicial del suelo.....	42
3.8.2	Calidad de suelo	43
3.9	Análisis estadístico.....	43

3.9.1	Fertilidad de suelo.....	43
3.9.2	Calidad de suelo	43
3.10	Resultados y Discusión	44
3.10.1	Diagnóstico de la fertilidad del suelo.....	45
3.10.2	Diagnóstico de la calidad del suelo.....	50
3.11	Conclusiones.....	55
3.12	Literatura citada	56
4	ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL Y ACTUAL EN LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	61
4.1	Resumen	61
4.2	Abstract	61
4.3	Introducción	62
4.4	Materiales y métodos.....	63
4.4.1	Área de estudio	63
4.4.2	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	64
4.4.3	Álgebra de mapas.....	67
4.5	Resultados	68
4.5.1	Factor R de la EUPS	68
4.5.2	Factor K de la EUPS	69
4.5.3	Factor LS de la EUPS	69
4.5.4	Erosión potencial.....	70
4.5.5	Factor C de la EUPS	71
4.5.6	Erosión actual.....	72
4.6	Discusión.....	73
4.7	Conclusiones.....	74
4.8	Literatura citada	74
5	CONCLUSIONES GENERALES	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1 Perfil de parcelas experimentales para determinar calidad del suelo.....	42
Cuadro 3.2 Valores medios $\bar{x}$ en la profundidad del suelo 0 – 20 cm (n = 20) para las variables analizadas en los tres ejidos.....	45
Cuadro 3.3 Intervalos de clasificación e interpretación de análisis de fertilidad de suelos.....	46
Cuadro 3.4 Coeficientes de correlación de Pearson para las variables analizadas en los tres ejidos en la profundidad del suelo 0 – 20 cm (n = 20).	48
Cuadro 3.5 Resumen estadístico de variables del suelo por unidad de estudio (n = 21).....	51
Cuadro 3.6 Resultado del análisis de componentes principales de indicadores de calidad de suelo (n = 21).	52
Cuadro 3.7 Coeficientes de correlación de Pearson (ρ) de los indicadores seleccionados inicialmente en el análisis de componentes principales.	54
Cuadro 3.8 Selección de indicadores para conformar el CMD y coeficiente de puntuación.	55
Cuadro 4.1 Clases del factor erosividad de la lluvia (R) de la EUPS.....	68
Cuadro 4.2 Clases del factor longitud y grado de la pendiente (LS) de la EUPS.....	70
Cuadro 4.3. Categorías de pérdida de suelo por erosión potencial hídrica.	71
Cuadro 4.4 Categorías de pérdida de suelo por erosión actual hídrica.	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Número de artículos publicados en revistas científicas sobre calidad de suelos en México.....	21
Figura 2.2 Distribución del número de artículos científicos sobre calidad de suelos encontrados por estado en México.	21
Figura 2.3 Grupos de suelos estudiados con relación a su calidad en México.....	22
Figura 2.4 Indicadores físicos del suelo frecuentemente estudiados en México. Dap: densidad aparente, EA: estabilidad de agregados, I: infiltración, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CRH: curva de retención de humedad, P: porosidad, R: resistencia a la penetración, E: estructura, HA: humedad aprovechable, HG: humedad gravimétrica, TA: tamaño de agregados, EH: espesor de horizontes y DP: diámetro de poros.....	22
Figura 2.5 Indicadores químicos del suelo frecuentemente estudiados en México. MO: materia orgánica (carbono orgánico), pH: potencial de hidrógeno, K: potasio, Ntotal: nitrógeno total, P: fósforo, Mg: magnesio, Ca: calcio, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Ninorgánico: nitrógeno inorgánico, Na: sodio, Zn: zinc, Fe: hierro, Al: aluminio.	24
Figura 3.1. Localización del área de estudio.....	37
Figura 3.2 Área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo de suelos en los ejidos de General Felipe Ángeles, El Tortuguero y Los Fresnos, municipio de San Juan Mazatlán, Oaxaca.	40
Figura 3.3 a) Parcela en el ejido de El Tortuguero (17° 20' 37.56" N, 95° 14' 20.47" O) y b) parcela en el ejido Los Fresnos (17° 13' 56.62" N, 95° 22' 27.06" O).	41
Figura 3.4 Variación de los índices de calidad de suelo en los distintos sitios y sistemas de producción.	55
Figura 4.1 Localización del área de estudio.....	63
Figura 4.2. Distribución espacial del factor de erosividad de la lluvia.....	68
Figura 4.3 Distribución espacial del factor erodabilidad del suelo.....	69
Figura 4.4 Distribución espacial del factor longitud y grado de la pendiente.	70
Figura 4.5 Distribución espacial de la erosión potencial hídrica.	71
Figura 4.6 Distribución espacial del factor manejo y cobertura.....	72
Figura 4.7 Distribución espacial de la erosión actual hídrica.	73

DEDICATORIAS

A mis padres:

Manuel Nuñez Flores[†] y María Luisa Peñaloza Pérez

Gracias por darme la vida y por brindarme siempre cariño, apoyo y comprensión, aun teniendo obstáculos en el camino pude salir adelante y no les fallé. Con todo mi amor y respeto.

A mis esposa e hijo:

Betsabe Uriarte Medina

Jorge Luis Nuñez Uriarte

Su compañía, afecto y cariño son los detonantes de mi felicidad. Los amo y adoro y siempre los traigo en mi corazón.

A mis hermanos Sergio, Omar, José Manuel, Rafael y Miguel Ángel, por estar siempre apoyándome, por ser los mejores en esta familia que Dios me regaló. Gracias por sus consejos.

A mis sobrinos, sobrinas, primos, primas, tíos, tías y a todos los que forman parte de mi familia. Con mucho cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, porque en sus aulas y de la mano de sus docentes aprendí a desarrollarme como un profesional exitoso.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca otorgada para la realización de esta investigación.

Al Dr. Joel Pérez Nieto, Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, Dr. Julio César Buendía Espinoza y Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por sus consejos y asesorías en la elaboración de este trabajo.

A todas aquellas personas que no se mencionan, pero que de una u otra forma contribuyeron en mi formación profesional, aprovecho para darles las gracias y decirles que siempre los recordaré.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Jorge Luis Nuñez Peñaloza
Fecha de nacimiento: 06 de mayo de 1992
Lugar de nacimiento: Matías Romero Avendaño, Oaxaca
CURP: NUPJ920506HOCXXR04
Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos
Cédula profesional: 10650053

Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura: Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos. Universidad Autónoma Chapingo
Maestría: Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

CALIDAD DEL SUELO Y EROSIÓN HÍDRICA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA¹

En el presente estudio, se identificaron indicadores, índices de calidad y altas tasas de erosión hídrica de suelo para la región Bajo Mixe, Oaxaca. Los indicadores, que incluyen propiedades del suelo, son esenciales para comprender la calidad del suelo en términos de su capacidad para sustentar sistemas de producción. A través de la realización de análisis de fertilidad y de calidad de suelo en sistemas de producción convencionales y promovidos por el Programa Sembrando Vida, se propuso un conjunto de indicadores que permitieron construir, mediante análisis estadístico, índices de calidad del suelo. Se encontró que, la capacidad de campo, los niveles de calcio, magnesio, fósforo, nitrato, la densidad aparente y el pH, son claves para evaluar las condiciones presentes. El índice de calidad encontrado para cada uno de los sistemas de producción se clasificó como moderado, lo que indicó que los sistemas de producción presentaban una condición deseable para seguir soportando actividades agropecuarias y agroforestales. Los índices encontrados pueden ser utilizados para monitorear los cambios en la calidad del suelo a lo largo del tiempo, facilitando la comparación entre diferentes prácticas de manejo. A pesar de que no se observó una correlación directa entre la calidad del suelo y las altas tasas de erosión hídrica presentes, se reconoció que la erosión puede tener un impacto negativo a largo plazo en la calidad del suelo.

¹Tesis de Doctor en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible
Autor: Jorge Luis Nuñez Peñaloza
Director de Tesis: Joel Pérez Nieto

ABSTRACT

SOIL QUALITY AND WATER EROSION IN PRODUCTION SYSTEMS IN THE BAJO MIXE REGION, OAXACA²

In the present study, indicators, quality indices, and high rates of soil water erosion were identified for the Bajo Mixe region, Oaxaca. The indicators, which include soil properties, are essential to understand soil quality in terms of its capacity to support production systems. Through the performance of soil fertility and quality analyses in conventional production systems and those promoted by the Sembrando Vida Program, a set of indicators was proposed that allowed the construction of soil quality indices through statistical analysis. It was found that field capacity, levels of calcium, magnesium, phosphorus, nitrate, bulk density, and pH are key to assessing current conditions. The quality index found for each of the production systems was classified as moderate, which indicated that the production systems presented a desirable condition to continue supporting agricultural and agroforestry activities. The indices found can be used to monitor changes in soil quality over time, facilitating comparison between different management practices. Although no direct correlation was observed between soil quality and the high rates of water erosion present, it was recognized that erosion can have a long-term negative impact on soil quality.

²Thesis of Doctor of Sciences in Multifunctional Agriculture for Sustainable Development
Author: Jorge Luis Nuñez Peñaloza
Advisor: Joel Pérez Nieto

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

A pesar de la gravedad de la situación ambiental, pareciera que los esfuerzos para estudiar la degradación de suelos en México están perdiendo terreno en lo que va del siglo XXI. El suelo es un componente natural de gran importancia en la sostenibilidad de los ecosistemas, su degradación se debe, en la mayoría de los casos, al mal manejo, lo que disminuye su productividad y su capacidad para sostener la vida humana. Se sabe que, alrededor del 63.02 % de la superficie nacional presenta algún grado de degradación. Las clases de degradación ligera y moderada representan el 51.4 %, y la degradación severa y extrema representan el 11.6 %, lo que indica que el problema asociado a la disminución o pérdida de la capacidad productiva de los suelos del país es grave, principalmente por declinación de la fertilidad del suelo por lo que es imperativo establecer planes y acciones encaminadas a revertir este proceso (UACH y CONAFOR, 2013).

Las prácticas de manejo que realizan los agricultores en sus parcelas pueden alterar las propiedades del suelo, sobre todo si las energías asociadas a las entradas y las salidas de ésta en forma de productos no son equilibradas (Castillo-Valdez et al., 2021). Para analizar el efecto de las prácticas de manejo del suelo en un sistema de producción, se puede valorar cómo éstas alteran la funcionalidad de este.

La multifuncionalidad del suelo abarca, además de las relaciones de producción (Cuevas-Reyes et al., 2017), otras funciones como regulación del ciclo hidrológico, captura de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, entre muchas otras (Castillo-Valdez et al., 2021; Montaña-Arias et al., 2018). La multifuncionalidad del suelo se puede estudiar a través de la selección de indicadores, los cuales tienen que relacionarse con la función principal que desempeña, en nuestro caso, con el sistema de producción de cultivos (Sarmiento et al., 2018).

Existe una gran variedad de propiedades del suelo que se han utilizado como indicadores (Bautista-Cruz et al., 2004; Bünemann et al., 2018; Karlen et al., 2003; Sarmiento et al., 2018), al funcionar como indicadores, estas propiedades pueden variar, en disponibilidad y funcionalidad, o entre localidades, dependiendo del tipo y uso del suelo o en función de sus factores de formación.

La selección de un conjunto mínimo de propiedades del suelo (MDS por sus siglas en inglés) que pueden funcionar como indicadores, obedece a juicio de expertos o mediante el uso de técnicas multivariadas como el análisis de componentes principales (Bünemann et al., 2018; Sarmiento et al., 2018). La finalidad de trabajar con indicadores de calidad de suelo radica en que se pueden obtener índices de calidad de suelo que permitan desarrollar estrategias locales para conservar este recurso, en un contexto donde la degradación interna de los suelos está presente en el 24.2 % del territorio mexicano, siendo la degradación química la más importante, seguida del desplazamiento de material del suelo con el 20.8 %, siendo la erosión causada por el agua el proceso más importante con un 11.4 % del territorio mexicano (CEDRSSA, 2015).

En la Sierra Norte de Oaxaca, México, ha cambiado el uso de suelo, de forestal a agrícola y pastizal, incorporando al cultivo terrenos con pendientes pronunciadas (Vergara-Sánchez et al., 2004, 2005). Se desconoce el efecto que dicho cambio ha tenido en la fertilidad del suelo y en la erosión de estos.

Tal es el caso de los ejidos de General Felipe Ángeles, Los Fresnos y El Tortuguero dentro del municipio de San Juan Mazatlán, Oaxaca, perteneciente a la región Bajo Mixe. En estos ejidos se tienen diferentes sistemas agrícolas, pecuarios y, últimamente, agroforestales, lo que hace que sea una zona con una alta actividad agropecuaria. Sin embargo, esto ha acrecentado que muchas zonas con vegetación primaria, ubicadas en laderas, sean utilizadas para estos sistemas originando un serio problema de degradación (interna:

declinación de la fertilidad y externa: erosión) del suelo en la región, pese a ello, nulos son los estudios acerca de este problema, que disminuye de forma paulatina y silenciosa la productividad y pone en riesgo la seguridad alimentaria de los habitantes en esta región (Cotler et al., 2020; Etchevers-Barra et al., 2020).

En la actualidad hay un cambio de rumbo en las políticas agrícolas (2018-2024), en el cual los programas están enfocados hacia productores pequeños (menores a 20 ha). Programas como Sembrando Vida y Producción para el Bienestar promueven agrodiversidad y algunas prácticas agroecológicas, a través de una capacitación permanente. El impacto que estos programas puedan generar sobre la calidad de los suelos deberá ser evaluado y monitoreado a través de estudios e investigaciones transdisciplinarias, como esta, con la finalidad de mejorar el diseño de estos programas. Por otro lado, programas como Crédito Ganadero a la palabra y Fertilizantes para el Bienestar también pueden generar impactos en ámbitos sociales y ambientales, específicamente en la calidad de los suelos, que deberán contar con seguimiento (Etchevers-Barra et al., 2020).

Por tal motivo, en este estudio se planteó el siguiente objetivo general y cuatro objetivos específicos:

1.1 Objetivo general

Explicar la calidad del suelo, como resultado del comportamiento de la fertilidad y de la erosión, mediante el análisis de los indicadores físicos, químicos, y biológicos, en sistemas de producción convencionales y promovidos por el Programa Sembrando Vida, para gestionar el recurso suelo de manera sostenible en la región Bajo Mixe, Oaxaca.

1.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar a través del componente biofísico la zona de estudio, donde se establecerán sistemas de producción promovidos por el Programa Sembrando Vida, utilizando recorridos de campo, análisis de fertilidad de

suelo, para analizar la influencia de las actividades antrópicas en el componente ecológico.

2. Analizar indicadores de calidad de suelos (físicos, químicos y biológicos) en los sistemas de producción convencionales y promovidos por el Programa Sembrando Vida, usando metodologías convencionales de análisis para sustentar su función productiva.
3. Construir un índice particular de calidad del suelo partiendo del uso de indicadores físicos, químicos, y biológicos determinados en los sistemas de producción convencionales y promovidos por el Programa Sembrando Vida, para establecer relaciones causa-efecto entre las propiedades del suelo y comparar diferentes sistemas de producción.
4. Generar información cuantitativa y espacial sobre la pérdida de suelo en la región, a través de la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en un Sistema de Información Geográfica con el fin de cuantificar y visualizar la magnitud de este problema.

Las hipótesis planteadas para cada objetivo específico se describen a continuación:

1.3 Hipótesis

1. Los suelos de la zona de estudio se encuentran en una condición de debilidad debido a prácticas agrícolas intensivas anteriores, lo que limita su capacidad productiva.
2. Los sistemas de producción convencionales y promovidos por el Programa Sembrando Vida han generado cambios significativos en los indicadores de calidad del suelo.
3. Los sistemas de producción promovidos por el Programa Sembrando Vida presentan indicadores de calidad del suelo superiores en comparación con los sistemas de producción convencionales, reflejando una mayor sostenibilidad y resiliencia.

4. La aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la región de estudio.

1.4 Contenido temático

La Introducción General hace referencia a un contexto amplio del tema de investigación, abarcando conceptos generales que es necesario conocer en el tema que aborda el documento. Aquí se incluyeron los antecedentes del tema, el planteamiento del problema, la justificación del estudio, los objetivos a cumplir, las preguntas de investigación, así como las hipótesis. Mientras que el marco teórico y de referencia, presentado en la Revisión de Literatura, engloba una serie de publicaciones enfocadas al estudio del tema en cuestión en forma resumida, abarcando los aspectos más relevantes de dichas investigaciones, de tal manera que permite crear un aspecto general del avance en el estudio del tema. Los capítulos 3 y 4 se presentan a manera de artículos científicos, donde se plasman los resultados del desarrollo de la investigación.

1.5 Literatura citada

- Bautista-Cruz, A., Etchevers-Barra, J. D., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(1), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Castillo-Valdez, X., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39(1), 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- CEDRSSA. (2015). Recurso suelo. Elementos para la definición de una política pública en México. Consultada en: [http://intra.cedrssa.gob.mx/files/b/13/83Reporte 24 Recurso suelo. Elementos para la definición de una política pública en México 1 06 2015.pdf](http://intra.cedrssa.gob.mx/files/b/13/83Reporte%20Recurso%20suelo.Elementos%20para%20la%20definici%C3%B3n%20de%20una%20pol%C3%ADtica%20p%C3%BAblica%20en%20M%C3%A9xico%201%2006%202015.pdf)
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y

carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*, 1(101), e59976. <https://doi.org/10.14350/rig.59976>

Cuevas-Reyes, V., Baca-del Moral, J., Espejel-García, A., Barrera-Rodríguez, A. I., & Sosa-Montes, M. (2017). Agricultura multifuncional y sistemas de producción bajo un contexto de agricultura diversificada. In M. Á. Sámano-Rentería & J. Baca-del Moral (Eds.), *Agricultura multifuncional y políticas públicas en México* (1st ed., pp. 35–51). Universidad Autónoma Chapingo.

Etchevers-Barra, J. D., Cotler-Ávalos, H., & Hidalgo-Moreno, C. (2020). Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(4), 931–939. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867>

Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114(3–4), 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)

Montaño-Arias, N. M., Navarro-Rangel, M. del C., Patricio-López, I. C., Chimal-Sánchez, E., & Miguel-de la Cruz, J. (2018). El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? *CIENCIA ergo-sum*, 25(3), 1–10. <https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9>

Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad de suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130–139. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1598>

UACH y CONAFOR. (2013). *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe final*. Consultada en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/06/linea-base-nacional-de-degradación-de-tierras-y-desertificacion.pdf>

Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Padilla-Cuevas, J. (2005). La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 39(3), 259–266.

Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Vargas-Hernández, M. (2004). Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 359–367.

2 ANÁLISIS DE INDICADORES E ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELOS EN MÉXICO*

2.1 Resumen

Una estrategia para evaluar suelos es mediante índices de calidad que dependen de indicadores específicos sobre los suelos muestreados, el tipo de cultivo y el manejo realizado. Los indicadores son variables físicas, químicas o biológicas medibles, que afectan la capacidad del suelo al ejercer una o varias de sus funciones. El objetivo de esta investigación fue examinar el uso metodológico de las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo usadas como indicadores de calidad para determinar índices de calidad del suelo en México, a través de una revisión bibliográfica realizada en el año 2022, para el período 2000-2021 mediante diversos buscadores de artículos científicos y palabras clave relacionadas al tema, con la finalidad de generar un diagnóstico y vislumbrar oportunidades de investigación. Se debe prestar mayor atención al estudio de la calidad de suelos en México, con base en información técnica y científica en regiones y estados donde esta información siga siendo escasa. Producto de la revisión bibliográfica se propone como un conjunto de indicadores físicos: a la textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo; como indicadores químicos: materia orgánica, pH, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio y magnesio y como indicadores biológicos: carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, deshidrogenasa, β -glucosidasa, ureasa, fosfatasa y a los hongos micorrízicos arbusculares, optando por un subconjunto de indicadores o por un conjunto mínimo de datos para conformar un índice de calidad de suelo.

Palabras clave: análisis de componentes principales, fertilidad física-química-biológica del suelo, propiedades del suelo.

2.2 Abstract

One strategy for evaluating soils is through quality indices that depend on specific indicators on the soils sampled, the type of crop and the management carried out. Indicators are measurable physical, chemical or biological variables that affect the capacity of the soil as they perform one or more of its functions. The objective of this research was to examine the methodological use of the different physical, chemical and biological properties of the soil used as quality indicators to determine soil quality indices in Mexico, through a bibliographic review carried out in 2022, for the period 2000-2021 through various search engines of scientific articles and keywords related to the subject, in order to generate a diagnosis and glimpse research opportunities. Greater attention should be paid to the study of soil quality in Mexico, based on technical and scientific information in regions and states where this information remains scarce. As a product of the bibliographic

*Citar como: Nuñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., & Prado-Hernández, J. V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 14(6), Article e3148. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148>

review, the following sets of indicators are proposed: texture, bulk density, aggregate stability, infiltration, penetration resistance, moisture retention curve and soil depth as physical indicators; organic matter, pH, total nitrogen, inorganic nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium as chemical indicators; and microbial biomass carbon, soil respiration, earthworm density, dehydrogenase, β -glucosidase, urease, phosphatase and arbuscular mycorrhizal fungi as biological indicators, opting for a subset of indicators or a minimum data set to form a soil quality index.

Keywords: physical-chemical-biological soil fertility, principal component analysis, soil properties.

2.3 Introducción

Las presiones actuales sobre el suelo están alcanzando límites críticos, en concreto, los aumentos previstos en la producción de alimentos, fibras y combustibles que se exigen para alcanzar la seguridad alimentaria y energética suponen mayor presión sobre este recurso no renovable. En México se reportan la presencia de 25 de las 32 unidades de suelo que aparecen en la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) por sus siglas en inglés. Dos de los problemas más importantes en la actualidad, por su extensión, que afectan a estos suelos en México son: la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica (20 millones de hectáreas) y la degradación por disminución de la fertilidad (31.6 millones de hectáreas) (Álvarez-Arteaga et al., 2020); sin embargo, para varios sectores de la sociedad actual, el conocimiento sobre esta problemática en muchas regiones del país es poco e incierto, lo cual explica el escaso interés que se pone sobre este recurso natural.

Una estrategia para evaluar la degradación de los suelos es mediante índices de calidad del suelo (íCS), que dependen de indicadores específicos relacionados con los suelos muestreados, el tipo de cultivo y su manejo (Bedolla-Rivera et al., 2020). Los indicadores pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo medibles, que afectan la capacidad de éste para ejercer una de sus funciones (Castillo-Valdez et al., 2021). Los indicadores físicos son propiedades físicas asociadas con el uso eficiente del agua, los nutrientes y el uso de agroquímicos; los indicadores químicos están relacionados con las condiciones químicas que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrientes para plantas y otros seres vivos y los indicadores biológicos son aquellos organismos o procesos desarrollados por éstos que, con su presencia o abundancia, señalan cambios o estados de ciertas propiedades o procesos del suelo.

Los indicadores constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, mediante su integración, se obtienen íCS, que son variables numéricas que permiten una evaluación más exacta y confiable de la calidad del suelo usando métodos estadísticos como el conjunto mínimo de datos (CMD) y el análisis de

componentes principales (ACP) (Bedolla-Rivera et al., 2020). Una vasta cantidad de parámetros físicos, químicos y biológicos se han incluido en investigaciones sobre calidad de suelos alrededor del mundo. Sin embargo, su integración en íCS es escaso e incierto y aún sigue siendo una tarea pendiente.

Con base en ello, el objetivo de esta investigación fue examinar el uso metodológico de las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo usadas como indicadores de calidad para determinar íCS en México; a través, de una revisión bibliográfica mediante diversos buscadores de artículos científicos y palabras clave relacionadas al tema, con la finalidad de generar un diagnóstico y vislumbrar oportunidades de investigación.

2.4 Materiales y métodos

La búsqueda de literatura se realizó en las bases de datos: *ScienceDirect*, *Scopus*, *JSTOR*, *SciELO*, *Springer*, *Redalyc* y *Google Scholar*. La revisión se hizo tanto en inglés, como en español y comprendió exclusivamente artículos en revistas científicas publicados entre el año 2000 y 2021. Las palabras usadas se concentraron en título y palabras claves relacionadas con la calidad de suelos en México; por ejemplo: calidad, suelos, indicadores, índices y México. La elección final de los artículos se basó en la lectura del título, del análisis de la información presente en los apartados de resumen, metodología y conclusiones en cada uno de ellos, y finalmente, que condujera a la temática planteada en el objetivo.

Con los criterios anteriores se encontraron 43 artículos científicos. Posteriormente, cada uno de ellos se llevó a una hoja de cálculo del programa Excel® dónde se formó una bitácora con los siguientes apartados: año, autor principal, estado de la República Mexicana dónde se realizó la investigación, indicadores físicos, indicadores químicos e indicadores biológicos del suelo empleados, grupo de suelos analizados y tipo de íCS empleado. A partir de esta bitácora se generó un diagnóstico del uso de indicadores e íCS en México.

2.4.1 Resultados y discusión

Se encontraron 43 artículos científicos relacionados con el uso metodológico de las propiedades del suelo usadas como indicadores de su calidad en México. El número de artículos por año varió de cero a siete en promedio y aunque no se aprecia una tendencia directa de incremento de las publicaciones a través del tiempo, se visualiza que, en el período de 2015 al 2021 se publicaron el 60.5 % de los artículos científicos, en comparación con el período de 2000 al 2014 con sólo el 39.5 % de los artículos publicados (Figura 2.1).

Con respecto al número de artículos publicados por estado, el Estado de México concentra la mayoría con ocho; le siguen Oaxaca y Veracruz con seis; Puebla con cinco; Hidalgo, Nayarit y Tabasco con cuatro; Campeche, Chiapas, Guanajuato, Michoacán y Nuevo León con dos; y Chihuahua, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa y Zacatecas con uno respectivamente (Figura 2.2).

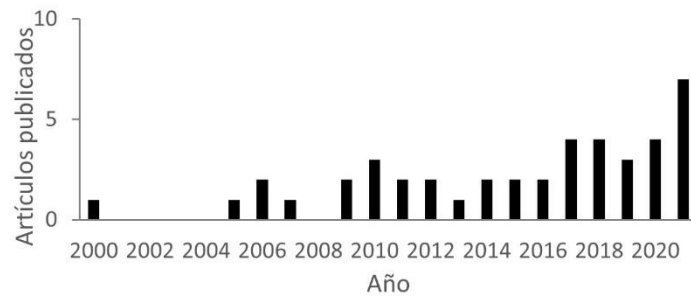


Figura 2.1 Número de artículos publicados en revistas científicas sobre calidad de suelos en México.

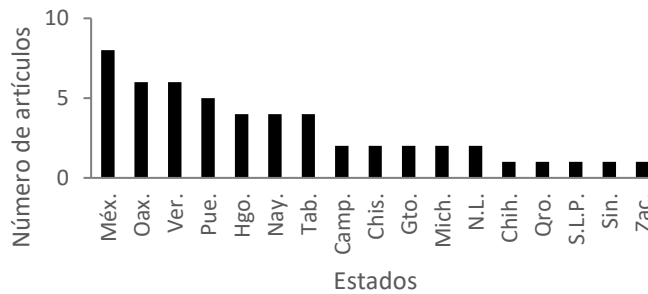


Figura 2.2 Distribución del número de artículos científicos sobre calidad de suelos encontrados por estado en México.

Es preciso mencionar que existen regiones dónde se han desarrollado más investigaciones sobre calidad de suelos, Texcoco en el Estado de México (Fonteyne et al., 2021; Govaerts et al., 2006; Pajares-Moreno et al., 2010; Rodríguez et al., 2016), la región Mixteca en el estado de Oaxaca (Estrada-Herrera et al., 2017; Fonteyne et al., 2021; Santiago-Mejía et al., 2018), y las regiones centro y montaña de Veracruz (Campos et al., 2007; Fernández et al., 2016; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Peña et al., 2021).

El análisis arrojó información de varios grupos de suelos (WRB) estudiados en México, con al menos dos artículos por grupo (Figura 2.3). Algunos otros grupos estudiados fueron: Plintisol, Solonchak, Litosol, Planosol, Lixisol, Durisol, Solonetz y Technosol (Alcalá et al., 2009; Huerta et al., 2009; Pajares-Moreno et al., 2010; Alejo-Santiago et al., 2012; Fonteyne et al., 2021; Martínez-Rodríguez et al., 2021). En siete artículos no se hace referencia explícita a algún grupo de suelo en particular (Prieto-Méndez et al., 2011, 2013; Rodríguez et al., 2016; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Murillo-Cuevas et al., 2019; Acevedo-Gómez et al., 2020; Peña et al., 2021), y en Bautista-Cruz et al. (2012), Campos et al. (2007), Chavarin-Pineda et al. (2021) y Govaerts et al. (2006) se reportan los suelos Mollisol, Andisol, Ultisol, Inceptisol y Entisol bajo la nomenclatura de la Soil Taxonomy del Departamento de EE.UU (USDA).

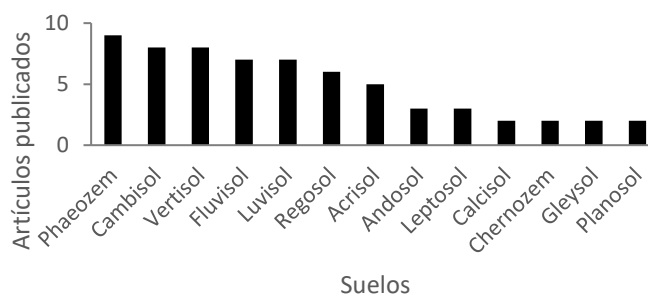


Figura 2.3 Grupos de suelos estudiados con relación a su calidad en México.

2.4.1.1 Indicadores físicos

Al analizar la frecuencia de estudio de los indicadores físicos en los artículos científicos, se encontró que la densidad aparente (Álvarez-Arteaga et al., 2020; Armida-Alcudia et al., 2005; Bugarín et al., 2010; Campos et al., 2007; Cantú et al., 2018; Chavarin-Pineda et al., 2021; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Fernández et al., 2016; Muñoz et al., 2017; Murray et al., 2014; Peña et al., 2021; Prieto-Méndez et al., 2013; Santiago-Mejía et al., 2018; Zavala-Cruz et al., 2014); textura (Acevedo-Gómez et al., 2020; Álvarez-Arteaga et al., 2020; Bedolla-Rivera et al., 2020; Cantú et al., 2018; Cruz-Flores et al., 2020; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; López et al., 2019; Muñoz et al., 2017; Peña et al., 2021; Prieto-Méndez et al., 2011; Santiago-Mejía et al., 2018; Zavala-Cruz et al., 2014) y estabilidad de agregados (Castillo-Valdez et al., 2021; Fonteyne et al., 2021; Govaerts et al., 2006; Hernández-González et al., 2018; Medina-Méndez et al., 2006; Prieto-Méndez et al., 2013; Sustaita-Rivera et al., 2000) son las propiedades físicas mayormente elegidas como indicadores físicos de calidad del suelo (Figura 2.4). Estos indicadores están relacionados con servicios ecosistémicos y funciones ecológicas del suelo muy importantes, tal y como lo sugieren Bünemann et al. (2018).

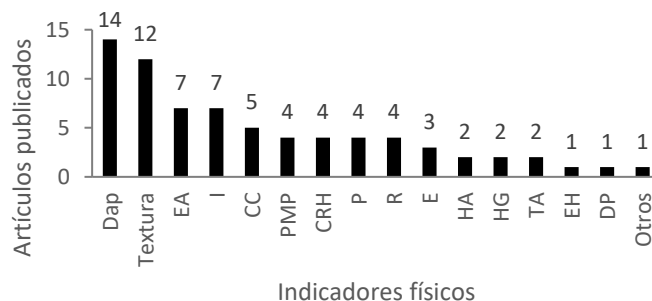


Figura 2.4 Indicadores físicos del suelo frecuentemente estudiados en México. Dap: densidad aparente, EA: estabilidad de agregados, I: infiltración, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CRH: curva de retención de humedad, P: porosidad, R: resistencia a la penetración, E: estructura, HA: humedad aprovechable, HG: humedad gravimétrica, TA: tamaño de agregados, EH: espesor de horizontes y DP: diámetro de poros.

Para medir la densidad aparente se reporta el método del cilindro, para la textura el hidrómetro de Bouyoucos, estabilidad de agregados a través del tamizado en húmedo y seco, la infiltración mediante el doble cilindro, capacidad de campo con olla de presión, punto de marchitez permanente con membrana de presión, curva de retención de humedad a 33, 50, 150, 500, 1000 y 1500 kPa, porosidad total utilizando el valor de densidad aparente y densidad real de 2.65 Mg m^{-3} , resistencia a la penetración con ayuda de un penetrómetro dinámico, humedad aprovechable como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente y humedad gravimétrica pesando una muestra de suelo húmeda, secándola a 105°C durante 24 horas para obtener el peso de suelo seco.

Con respecto a los métodos usados para determinación de los indicadores físicos del suelo con el fin de evaluar su calidad, cabe destacar que deben considerarse indicadores que limiten el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, y deben ser medidos en lugar de derivados. Para integrar un CMD podrían considerarse la textura (% arenas, % limos y % arcillas), densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo (Bünemann et al., 2018).

2.4.1.2 Indicadores químicos

El carbono orgánico o materia orgánica del suelo es la propiedad del suelo más usada como indicador químico (Acevedo-Gómez et al., 2020; Alejo-Santiago et al., 2012; Armida-Alcudia et al., 2005; Bugarín et al., 2010; Cantú et al., 2018; Castillo-Valdez et al., 2021; Cruz-Ruiz et al., 2015; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Duché-García et al., 2021; Estrada-Herrera et al., 2017; Fernández et al., 2016; Fonteyne et al., 2021; Hernández-González et al., 2018; Hernández et al., 2017; López et al., 2019; Martínez-Rodríguez et al., 2021; Medina-Méndez et al., 2006; Muñoz et al., 2017; Murray et al., 2014; Peña et al., 2021; Prieto-Méndez et al., 2011; Rangel-Peraza et al., 2017; Santiago-Mejía et al., 2018; Sustaita-Rivera et al., 2000; Uribe-Hernández et al., 2010; Zavala-Cruz et al., 2014), le sigue el pH (Uribe-Hernández et al., 2010; Bugarín et al., 2010; Prieto-Méndez et al., 2011; Alejo-Santiago et al., 2012; Bautista-Cruz et al., 2012; Fernández et al., 2016; Muñoz et al., 2017; Rangel-Peraza et al., 2017; Estrada-Herrera et al., 2017; Yáñez et al., 2018; López et al., 2019; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Acevedo-Gómez et al., 2020; Álvarez-Arteaga et al., 2020; Cruz-Flores et al., 2020; Fonteyne et al., 2021; Martínez-Rodríguez et al., 2021; Peña et al., 2021; Castillo-Valdez et al., 2021), potasio intercambiable (Govaerts et al., 2006; Prieto-Méndez et al., 2011; Alejo-Santiago et al., 2012; Zavala-Cruz et al., 2014; Palma-López et al., 2015; Fernández et al., 2016; Estrada-Herrera et al., 2017; Santiago-Mejía et al., 2018; López et al., 2019; Acevedo-Gómez et al., 2020; Álvarez-Arteaga et al., 2020; Cruz-Flores et al., 2020; Martínez-Rodríguez et al., 2021; Trejo et al., 2021; Chavarin-Pineda et al., 2021; Duché-García et al., 2021; Fonteyne et al., 2021), nitrógeno Kjeldahl (Govaerts et al., 2006; Campos et al., 2007; Pajares-Moreno et al., 2010; Pájaros-Moreno et al., 2011; Prieto-Méndez et al., 2011; Palma-López et al., 2015; Cruz-Ruiz et al., 2015; Fernández et al., 2016; Muñoz et al., 2017; Hernández et al.,

2017; Santiago-Mejía et al., 2018; Hernández-González et al., 2018; Acevedo-Gómez et al., 2020; Álvarez-Arteaga et al., 2020; Chavarin-Pineda et al., 2021; Duché-García et al., 2021) y fósforo (Alejo-Santiago et al., 2012; Bautista-Cruz et al., 2012; Palma-López et al., 2015; Fernández et al., 2016; Estrada-Herrera et al., 2017; Hernández et al., 2017; López et al., 2019; Acevedo-Gómez et al., 2020; Álvarez-Arteaga et al., 2020; Trejo et al., 2021; Castillo-Valdez et al., 2021; Martínez-Rodríguez et al., 2021) (Figura 2.5).

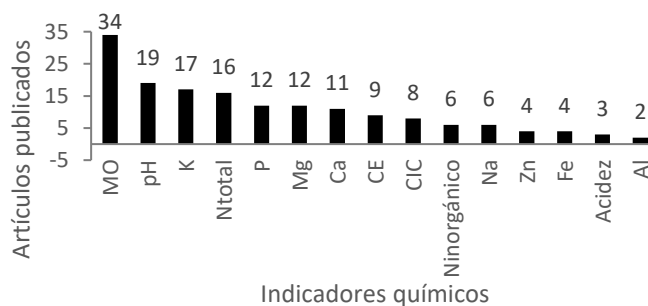


Figura 2.5 Indicadores químicos del suelo frecuentemente estudiados en México. MO: materia orgánica (carbono orgánico), pH: potencial de hidrógeno, K: potasio, Ntotal: nitrógeno total, P: fósforo, Mg: magnesio, Ca: calcio, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Ninorgánico: nitrógeno inorgánico, Na: sodio, Zn: zinc, Fe: hierro, Al: aluminio.

Para determinar el contenido de carbono orgánico los artículos reportan el método de Walkley-Black y el contenido de materia orgánica al multiplicar el carbono orgánico por algún factor: 1.724 o 2. El pH lo determinaron en una suspensión de suelo: agua: 1:1, 1:2 o 1:2.5, utilizando además cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) con ayuda de un potenciómetro. El K, Ca y Mg lo determinaron en la mayoría de los artículos usando una solución extractora de acetato de amonio (1 N pH = 7). El nitrógeno total lo determinaron mediante el procedimiento de digestión de Kjeldahl o micro-Kjeldahl. Para el fósforo aprovechable se reportan los procedimientos de Bray & Kurtz, Olsen y ácido cítrico. Los indicadores químicos deben describir las interacciones suelo-planta, disponibilidad y movilidad de nutrientes, agua para las plantas y otros organismos. Un CMD sería considerando materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo y bases intercambiables (Bünemann et al., 2018).

2.4.1.3 Indicadores biológicos

Las propiedades biológicas más recurrentemente usadas como indicadores de calidad de suelos fueron carbono en biomasa microbiana (Armida-Alcudia et al., 2005; Campos et al., 2007; Pajares-Moreno et al., 2010; Estrada-Herrera et al., 2017; Cruz-Flores et al., 2020); respiración (Pajares-Moreno et al., 2010; Rodríguez et al., 2016; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Bedolla-Rivera et al., 2020); lombrices (Huerta et al., 2009; De la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Castillo-Valdez et al., 2021; Peña et al., 2021); enzimas involucradas en el metabolismo intracelular, nitrógeno, carbono y fósforo (Pajares-Moreno et al., 2010; Pájaros-Moreno et al., 2011; Cruz-Ruiz et al., 2015;

Cruz-Flores et al., 2020); mesofauna y macrofauna edáfica (Uribe-Hernández et al., 2010; Rodríguez et al., 2016; Murillo-Cuevas et al., 2019); y hongos micorrízicos arbusculares, bacterias y actinomicetos (Murillo-Cuevas et al., 2019; Cruz-Flores et al., 2020; Duché-García et al., 2021; Trejo et al., 2021).

Para determinar el carbono en la biomasa microbiana en los artículos revisados se reportan los métodos de fumigación-incubación; para la respiración del suelo se reporta el método de la cámara cerrada; para las lombrices se menciona el método de extracción de monolitos de suelo de dimensiones de 25 cm x 25 cm x 30 cm de profundidad; las enzimas mediante diversas metodologías como se describe en Pajares-Moreno et al. (2010); mesofauna y macrofauna por el embudo de Berlese, una descripción de esta metodología se describe detalladamente en Rodríguez et al. (2016) y la cuantificación de hongos, bacterias y actinomicetos en diferentes medios de cultivo, según se describe en Duché-García et al. (2021) y Murillo-Cuevas et al. (2019). Un CMD sería considerando el carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, enzimas: deshidrogenasa, β -glucosidasa, ureasa y fosfatasa, y hongos micorrízicos arbusculares (Bünemann et al., 2018).

2.4.1.4 Índices empleados

La mayoría de los artículos consultados usan un conjunto de propiedades físicas, químicas o biológicas como indicadores de calidad, empleando para ello el valor o contenido de dicha propiedad, comparándolo con intervalos previamente establecidos o reportados como se describe en Martínez-Rodríguez et al. (2021) y Yáñez et al. (2018). Otros autores (Prieto-Méndez et al., 2013; Estrada-Herrera et al., 2017; Muñoz et al., 2017; Hernández-González et al., 2018; Duché-García et al., 2021) emplean ecuaciones para normalizar los valores de las propiedades del suelo utilizadas como indicadores:

$$(1) V_l = \frac{I_m - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}; \quad (2) V_l = 1 - \frac{I_m - I_{min}}{I_{max} - I_{min}};$$

donde, V_l : valor normalizado del indicador (lineal); I_m : valor experimental de la propiedad del suelo considerada como indicador; I_{min} : valor mínimo de la propiedad del suelo considerada como indicador; I_{max} : valor máximo de la propiedad del suelo considerada como indicador.

La Ecuación (1) se aplica a aquellos indicadores de calidad donde son convenientes valores elevados (p. ej. carbono orgánico) y la Ecuación (2) a aquellos donde convienen valores bajos (p. ej. densidad aparente). El ACP se reporta por varios autores como útil en la definición de íCS (Govaerts et al., 2006; Campos et al., 2007; Bautista-Cruz et al., 2012; Rangel-Peraza et al., 2017; Bedolla-Rivera et al., 2020; Cruz-Flores et al., 2020; Castillo-Valdez et al., 2021; Chavarin-Pineda et al., 2021; Duché-García et al., 2021; Fonteyne et al., 2021; Martínez-Rodríguez et al., 2021).

Para la conformación de un CMD a través de indicadores de calidad, se eligen los componentes principales que expliquen al menos una parte significativa de la variabilidad (p. ej. 80 %) con un valor propio > 1 (eigenvalor). Los indicadores con los pesos más altos tienen mayor influencia en la calidad del suelo dentro de cada componente principal, para el caso sólo se consideran a los indicadores dentro del intervalo del 10 %: $ICS_c - 0.1 * ICS_c$, donde ICS_c : peso del indicador de calidad del suelo con mayor peso dentro del componente principal

Cuando más de un indicador de calidad es retenido en los diferentes componentes principales con la regla anterior, se realiza un análisis de redundancia mediante una correlación de Pearson. Si existe correlación significativa, se retiene el indicador con más peso, de lo contrario ambos indicadores son retenidos. Después de normalizar los indicadores de calidad retenidos mediante alguna de las Ecuaciones 1-9, se procede a generar los íCS a través de las Ecuaciones 10 y 11 (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021):

$$\begin{aligned}
 (3) V_l &= \frac{I_m}{I_{max}}; & (4) V_{nl} &= \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{I_m}{\bar{I}}\right)^{-2.5}\right\}}; & (5) f(x)_l &= \begin{cases} 0.1, & x \leq L \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & L \leq x \leq U \\ 1, & x \geq U \end{cases} \\
 (6) V_l &= \frac{I_{min}}{I_m}; & (7) V_{nl} &= \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{I_m}{\bar{I}}\right)^{2.5}\right\}}; & (8) f(x)_l &= \begin{cases} 1, & x \leq L \\ 1 - 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & L \leq x \leq U \\ 0.1, & x \geq U \end{cases} \\
 (9) f(x) &= \begin{cases} 0.1, & x < L, \ x > U \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & L \leq x < L_1 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & U_1 \leq x < U \\ 1, & L_1 \leq x < U_1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

donde, V_{nl} , $f(x)_l$: valor normalizado del indicador (no lineal y lineal, respectivamente); Ecuaciones 3-5: mayor valor del indicador es mejor; Ecuaciones 6-8: menor valor del indicador es mejor; ecuación 9: valor óptimo; $\bar{I}$: valor promedio del indicador en el área de estudio; L: umbral inferior; U: umbral superior; L_1 y U_1 : valor del indicador para una línea base inferior y superior

$$(10) \text{íCS}_A = \sum_{i=1}^n S_i / n$$

$$(11) \text{íCS}_{PA} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

donde, íCS_A , íCS_{PA} : índice de calidad de suelo (aditivo y ponderado aditivo, respectivamente); S_i : indicador de calidad de suelo normalizado; n: número de indicadores de calidad de suelo en el CMD; W_i : ponderación obtenida al dividir el porcentaje de varianza explicada por el componente principal entre el porcentaje de varianza acumulada por los componentes principales retenidos

Finalmente, los íCS se comparan con rangos de calidad previamente establecidos, de esta manera se logran encontrar diferencias o similitudes entre diferentes suelos, y permiten proponer acciones en favor de una mejor gestión de este recurso (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020).

2.4.2 Conclusiones

Debe prestarse mayor atención al estudio de la calidad de suelos en México. Esta atención debe focalizarse a nivel estatal, regional o en grupos de suelos donde no se cuenta con información. Se propone como indicadores físicos: textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo; como indicadores químicos a la materia orgánica, pH, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio y magnesio; y como indicadores biológicos al carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, deshidrogenasa, β -glucosidasa, ureasa, fosfatasa y a los hongos micorrízicos arbusculares. Del conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos se opta por un subconjunto de estos o se reducen a un CMD para conformar un íCS.

2.5 Literatura citada

- Acevedo-Gómez, R.; Sánchez-Hernández, M. A.; Gómez-Merino, F. C.; Ponce-Peña, P.; González-Lozano, M. A.; Navarro-Moreno, L. and Poisot, M. 2020. Soil Quality of Ananas comosus Cultivation Land in the Papaloapan Basin Region of Mexico after Wastes Addition as Fertilizer Supplement. *Agriculture*. 10(5):1-12. Doi: 10.3390/agriculture 10050173.
- Alcalá, J.; Sosa, M.; Moreno, M.; Rodríguez, J. C.; Quintana, C.; Terrazas, C. y Rivero, O. 2009. Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*. 18(2):53-69.
- Alejo-Santiago, G.; Salazar-Jara, F. I.; García-Paredes, J. D.; Arrieta-Ramos, B. G.; Jiménez-Meza, V. M. y Sánchez-Monteón, A. L. 2012. Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15(2):323-328.
- Álvarez-Arteaga, G.; Ibáñez-Huerta, A.; Orozco-Hernández, M. E. y García-Fajardo, B. 2020. Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*. 22(2):5-19.
- Armida-Alcudia, L.; Espinosa-Victoria, D.; Palma-López, D. J.; Galvis-Spínola, A. y Salgado-García, S. 2005. Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de Vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana*. 23(4):545-551.
- Bautista-Cruz, A.; del Castillo, R. F.; Etchevers-Barra, J. D.; Gutiérrez-Castorena, M. del C. and Baez, A. 2012. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 277(1):74-80. Doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.013.

- Bedolla-Rivera, H. I.; Negrete-Rodríguez, M. L.; Medina-Herrera, M. D. R.; Gámez-Vázquez, F. P.; Álvarez-Bernal, D.; Samaniego-Hernández, M.; Gámez-Vázquez, A. J. and Conde-Barajas, E. 2020. Development of a soil quality index for soils under different agricultural management conditions in the Central Lowlands of Mexico: physicochemical, biological and ecophysiological indicators. *Sustainability*. 12(22):9754. Doi: 10.3390/su12229754.
- Bugarín, J.; Bojórquez, J. I.; Lemus, C.; Murray, R. M.; Hernández, A.; Ontiveros, H. y Aguirre, J. 2010. Comportamiento de algunas propiedades físicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la Llanura Norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales*. 31(2):48-55.
- Bünemann, E. K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R. E.; De Deyn, G.; de Goede, R.; Flesskens, L.; Geissen, V.; Kuyper, T. W.; Mäder, P.; Pulleman, M.; Sukkel, W.; van Groenigen, J. W. and Brussaard, L. 2018. Soil quality a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120(1):105-125. Doi: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
- Campos-Cascaredo, A.; Oleschko-Lutkova, K.; Etchevers-Barra, J. D. and Hidalgo-Moreno, C. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano. Mexico. *Forest Ecology and Management*. 248(3):174-182. Doi: 10.1016/j.foreco.2007.05.004.
- Cantú-Silva, I.; Díaz-García, K. E.; Yáñez-Díaz, M. I.; Gonzalez-Rodríguez, H. y Martínez-Soto, R. A. 2018. Caracterización físicoquímica de un calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 9(49):59-86. Doi: 10.29298/rmcf.v9i49.153. DOI: 10.29298/rmcf.v9i49.153.
- Castillo-Valdez, X.; Etchevers-Barra, J. D.; Hidalgo-Moreno, C. M. I. y Aguirre-Gómez, A. 2021. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*. 39(1):1-12. Doi: 10.28940/terra.v39i0.698.
- Chavarin-Pineda, Y.; Reynoso, E. C.; Torres, E.; Cruz-Flores, G.; Tenorio-Arvide, M. G.; Linares-Fleites, G. and Valera-Pérez, M. Á. 2021. Soil quality in volcanic soils in a forest biosphere reserve in Mexico. *Soil and Water Research*. 16(4):217-227. Doi: 10.17221/108/2020-SWR.
- Cruz-Flores, G.; Guerra-Hernández, E. A.; Valderrábano-Gómez, J. M. y Campo-Alvés, J. 2020. Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México. *Terra Latinoamericana*. 38(4):781-793. Doi: 10.28940/terra.v38i4.421.
- Cruz-Ruiz, E.; Cruz-Ruiz, A.; Vaca, R.; del Águila, P. and Lugo, J. 2015.

Assessment of soil parameters related with soil quality in agricultural systems. *Life Science Journal*. 12(1):154-161. Doi: 10.1145/3132847.3132886.

De la Cruz-Elizondo, Y. y Fontalvo-Buelvas, J. C. 2019. Evaluación de la calidad del suelo de un huerto urbano en Xalapa, México. *Suelos Ecuatoriales*. 49(1 y 2):29-37. Doi: 10.47864/SE(49)2019p29-37-102.

Duché-García, T. T. A.; Ocampo-Fletes, I.; Cruz-Hernández, J.; Hernández-Guzmán, J. A.; Macías-López, A.; Jiménez-García, D. y Hernández-Romero, E. 2021. Grupos microbianos en un agroecosistema milpa intercalda con árboles frutales en Valles Altos de Puebla, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* . 24(2):1-17.

Estrada-Herrera, I. R.; Hidalgo-Moreno, C.; Guzmán-Plazola, R.; Almaraz-Suarez, J. J.; Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51(1):813-831.

Fernández-Ojeda, P. R.; Cristóbal-Acevedo, D.; Villanueva-Morales, A. y Uribe-Gómez, M. 2016. Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Rev. Mex. Cienc. Forest*. 7(35):65-77.

Fonteyne, S.; Burgueño, J.; Albarrán-Contreras, B. A.; Andrio-Enríquez, E.; Castillo-Villaseñor, L.; Enyanche-Velázquez, F.; Escobedo-Cruz, H.; Espidio-Balbuena, J.; Espinosa-Solorio, A.; Garcia-Meza, P.; González-Galindo, F.; González-Regalado, J.; Govaerts, B.; López-Bustamante, J. D.; López-Ramírez, A.; Martínez-Gamiño, M. A.; Martínez-Hernández, F.; Mora-Gutiérrez, M.; Nieves-Navarro, A. I.; Noriega-González, L. A.; Núñez-Peñaloza, O.; Osorio-Alcalá, L.; de la Piedra-Constantino, R.; Ponce-Lira, B.; Rivas-Jacobo, I. C.; Saldivia-Tejeda, A.; Tapia-Moo, C. A.; Tapia-Naranjo, A.; Uribe-Guerrero, M. A.; Vilchis-Ramos, R.; Villa-Alcántara, J. and Verhulst, N. 2021. Effects of conservation agriculture on physicochemical soil health in 20 maize-based trials in different agro-ecological regions across Mexico. *Land Degradation & Development*. 32(6):2242-2256. Doi: 10.1002/ldr.3894.

Govaerts, B.; Sayre, K. D. and Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*. 87(2):163-174. Doi: 10.1016/j.still.2005.03.005.

Hernández-Ordoñez, J. O.; Gutiérrez-Castorena, M. del C.; Ortiz-Solorio, C. A.; Sánchez-Guzmán, P. y Ángeles-Cervantes, E. 2017. Calidad de andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana* . 35(2):179-189. Doi: 10.28940/terra.v35i2.201.

- Hernández-González, D. E.; Muñoz-Iniestra, D. J.; López-Galindo, F. y Hernández-Moreno, M. M. 2018. Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCyT*. 11(43):792-807.
- Huerta, E.; Kampichler, C.; Geissen, V.; Ochoa-Gaona, S.; De Jong, B. and Hernández-Daumás, S. 2009. Towards an ecological index for tropical soil quality based on soil macrofauna. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 44(8):1056-1062.
- López-Báez, W.; Reynoso-Santos, R.; López-Martínez, J.; Villar-Sánchez, B.; Camas-Gómez, R. y García-Santiago, J. O. 2019. Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4):897-910. Doi: 10.29312/remexca.v10i4.1764.
- Martínez-Rodríguez, Ó. G.; Can-Chulim, Á.; Ortega-Escobar, H. M.; Bojórquez-Serrano, J. I.; Cruz-Crespo, E.; García-Paredes, J. D. y Madueño-Molina, A. 2021. Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana*. 39(1):1-13. Doi: 10.28940/terra.v39i0.766.
- Medina-Méndez, J.; Volke-Haller, V.; González-Ríos, J.; Galvis-Spínola, A.; Santiago-Cruz, M. y Cortés-Flores, J. 2006. Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Universidad y Ciencia*. 22(2):175-189. Doi: 10.19136/era. a22n2.320.
- Muñoz-Iniestra, D. J.; Chávez-Mosqueda, M.; Godínez-Álvarez, H. O. y Cuéllar-Arellano, N. A. 2017. Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra Latinoamericana*. 35(2):123-133. Doi: 10.28940/terra.v35i2.142.
- Murillo-Cuevas, F. D.; Adame-García, J.; Cabrera-Mireles, H. y Fernández-Viveros, J. A. 2019. Fauna y microflora edáfica asociada a diferentes usos de suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 6(16):23-33. Doi: 10.19136/era.a6n16.1792.
- Murray, R. M.; Orozco, M. G.; Hernández, A.; Lemus, C. y Nájera, O. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18(1):23-31.
- Pajares-Moreno, S.; Gallardo-Lancho, J. F. y Etchevers-Barra, J. D. 2010. Indicadores bioquímicos en suelos de un transecto altitudinal en el Eje Neovolcánico mexicano. *Agrociencia*. 44(3):261-274.

- Pajares-Moreno, S.; Gallardo-Lancho, J. F.; Masciandaro, G.; Ceccanti, B. and Etchevers-Barra, J. D. 2011. Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated Acrisols in the Mexican Trans-volcanic Belt. *Land Degradation and Development*. 22(3):373-381. Doi: 10.1002/ldr.992.
- Palma-López, D. J.; Salgado-García, S.; Martínez-Sebastian, G.; Zavala-Cruz, J. y Lagunes-Espinoza, L. del C. 2015. Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2(5):163-172.
- Peña-Morales, D. I.; de la Cruz-Elizondo, Y.; Ruelas-Monjardin, L. C. y Fontalvo-Buevas, J. C. 2021. Evaluación de la calidad del suelo en agroecosistemas tropicales de Xalapa y Emiliano Zapata en el estado de Veracruz, México. *Suelos Ecuatoriales* . 51(1 y 2):25-36. Doi: 10.47864/SE(51)2021p25-36-139.
- Prieto-Méndez, J.; Prieto-García, F.; Acevedo-Sandoval, O. y Méndez-Marzo, M. 2013. Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del Estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana*. 24(1):83-91.
- Prieto-Méndez, J.; Rubio-Arias, H.; Prieto-García, F.; Roman-Gutiérrez, A. D.; Méndez-Marzo, M. A. and Acevedo-Sandoval, O. A. 2011. Soil quality in terms of Physical-Chemical-Metal properties for barely (*Hordeum vulgare*) production in the state of Hidalgo, Mexico. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*. 10(2):230-237.
- Rangel-Peraza, J. G.; Padilla-Gasca, E.; López-Corrales, R.; Medina, J. R.; Bustos-Terrones, Y.; Amabilis-Sosa, L. E.; Rodríguez-Mata, A. E. and Osuna-Enciso, T. 2017. Robust Soil quality index for tropical soils influenced by agricultural activities. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. 6(4):199-221. Doi: 10.4236/jacen.2017.64014.
- Rodríguez-Serrano, A. C.; Cristóbal-Acevedo, D.; Álvarez-Sánchez, E. y Uribe-Gómez, M. 2016. Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16(1):3263-3275.
- Santiago-Mejía, B. E.; Martínez-Menez, M. R.; Rubio-Granados, E.; Vaquera-Huerta, H. y Sánchez-Escudero, J. 2018. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema Lama-Bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*. 15(2):275-288. Doi: 10.22231/asyd.v15i2.796.
- Sustaita-Rivera, F.; Ordaz-Chaparro, V.; Ortiz-Solorio, C. y de León-González, F. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región

semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia*. 34(4):379-386.

- Trejo, D.; Sangabriel-Conde, W.; Gavito-Pardo, M. E. and Banuelos, J. 2021. Mycorrhizal inoculation and chemical fertilizer interactions in pineapple under field conditions. *Agriculture*. 11(10):1-8. Doi: 10.3390/agriculture11100934.
- Uribe-Hernández, R.; Juárez-Méndez, C. H.; Montes de Oca, M. A.; Palacios-Vargas, J. G.; Cutz-Pool, L. y Mejía-Recarmier, B. E. 2010. Colémbolos (Hexapoda) como bioindicadores de la calidad de suelos. *Rev. Mexicana de Biodiversidad*. 81(1):153-162. Doi: 10.22201/ib.20078706e.2010.001.188.
- Yáñez-Díaz, M. I.; Cantú-Silva, I. y González-Rodríguez, H. 2018. Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra Latinoamericana*. 36(4):369-379. Doi: 10.28940/terra.v36i4.349.
- Zavala-Cruz, J.; Salgado-García, S.; Marín-Aguilar, Á.; Palma-López, D. J.; Castelán-Estrada, M. y Ramos-Reyes, R. 2014. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1(2):123-137.

3 IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SUELO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DEL PROGRAMA MEXICANO SEMBRANDO VIDA

3.1 Resumen

El concepto de fertilidad del suelo se operacionaliza química y físicamente en términos de la provisión a los cultivos de nutrientes por parte del suelo. En la región Bajo Mixe del estado de Oaxaca, se llevó a cabo la incorporación de terrenos sin una marcada sobreexplotación agropecuaria al programa Sembrando Vida, sin embargo, el impacto que este programa pueda generar sobre la fertilidad y la calidad del suelo debe ser evaluado. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue caracterizar a través del tiempo el componente edafológico en las parcelas dónde se establecerán sistemas de producción alternativos a través de análisis de fertilidad y de calidad del suelo. Los resultados mostraron que son necesarias acciones a favor de: a) conservar y aumentar los niveles actuales de materia orgánica para evitar su pérdida, b) aplicar enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales constantemente para apoyar al suministro del suelo hacia las plantas considerado como bajo, c) monitorear los cambios que ocurran en la fertilidad del suelo, producto de las acciones anteriores, d) los indicadores de calidad: capacidad de campo, calcio y magnesio intercambiable, densidad aparente, fósforo asimilable, nitrato y pH son necesarios para evaluar la calidad de los suelos de la región y, e) los sistemas de producción analizados tuvieron índices de calidad de moderados a altos, dichos sistemas se encuentran en una condición buena.

Palabras clave: degradación, pérdida, San Juan Mazatlán, sistemas agrícolas sustentables

3.2 Abstract

The concept of soil fertility is operationalized chemically and physically in terms of the provision of nutrients to crops by the soil. In the Bajo Mixe region of the state of Oaxaca, lands without marked agricultural overexploitation were incorporated into the Sembrando Vida Program; however, the impact that this program may generate on soil fertility and quality must be evaluated. For this

reason, the objective of this research was to characterize over time the edaphological component in the plots where alternative production systems will be established through analysis of soil fertility and quality. The results showed that actions are necessary to: a) conserve and increase current levels of organic matter to prevent its loss, b) apply organic amendments and mineral fertilizers constantly to support the soil supply to plants considered as low, c) monitor the changes that occur in soil fertility, product of the previous actions, d) quality indicators: field capacity, exchangeable calcium and magnesium, apparent density, assimilable phosphorus, nitrate and pH are necessary to evaluate the quality of the soils in the region and, e) the production systems analyzed had quality indices from moderate to high, these systems are in good condition.

Keywords: degradation, loss, San Juan Mazatlán, sustainable agricultural systems

3.3 Introducción

Sembrando Vida es un programa del Gobierno de México que busca contribuir al bienestar social de sembradoras y sembradores a través del impulso de la autosuficiencia alimentaria, con acciones que favorezcan la reconstrucción del tejido social y la recuperación del medio ambiente, a través de la implementación de parcelas con Sistemas Productivos Agroforestales (Cortez *et al.*, 2022). Tiene como objetivo general que sembradoras y sembradores cuenten con 2.5 ha sembradas con Sistemas Productivos Agroforestales y Milpa Intercalada con Árboles Frutales produciendo y que tengan cubiertas sus necesidades alimenticias básicas (Secretaría de Bienestar, 2023). Son beneficiarios de este programa más de 434,000 personas, de las cuales, más de 34,000 se encuentran en el Estado de Oaxaca (Secretaría de Bienestar, 2024).

El distrito Istmo del estado de Oaxaca, integrado por 54 municipios, ocupa el segundo lugar en superficie agrícola cosechada (288,396 ha) y en valor de su producción (4,557,119 miles de pesos) de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019). Uno de los municipios que

integran al distrito Istmo es San Juan Mazatlán, el cual se encuentra dentro de la región conocida como Bajo Mixe y participa con el 15 % de la superficie cosechada y con el 18 % del valor de producción distrital (SIAP, 2019). Los sistemas productivos son: ganadería extensiva con pastos introducidos en alrededor de 34,000 ha con un rendimiento promedio de 41 t ha⁻¹, maíz grano en alrededor de 2,700 ha con un rendimiento promedio de 5 t ha⁻¹ y limón persa en alrededor de 2,200 ha con un rendimiento promedio de 12 t ha⁻¹ (SIAP, 2019).

De las 2,167 unidades de producción que se encuentran en el municipio, alrededor del 44 % tienen pérdidas por cuestiones climáticas y por la fertilidad del suelo, lo que sugiere que la superficie cosechada y el valor de la producción pueden disminuir considerablemente año tras año para los principales cultivos: pastizal inducido, maíz grano y limón persa (INEGI, 2007, 2019, 2023) afectando las necesidades de las generaciones actuales y de las futuras.

Las unidades de producción de la región, con superficies menores a 20 ha, han convertido sus terrenos en monocultivos de limón persa, incluso reemplazando los cultivos de maíz, café, naranja y de relictos de selva o acahuales. Esto ha traído como consecuencia erosión y pérdida de la fertilidad de los suelos, disminución del volumen de agua superficial de los cuerpos de agua y aumenta de la temperatura ambiental local (Oxfam México, 2021).

Para revertir esta situación, los agricultores han adoptado prácticas agrícolas como los cultivos mixtos y la aplicación de abonos y pesticidas orgánicos, sugeridos por programas gubernamentales como Sembrando Vida (Etchevers-Barra *et al.*, 2020, Secretaría de Bienestar, 2023). Sin embargo, el impacto que estos programas puedan tener en la calidad y conservación del suelo y agua debe evaluarse y controlarse mediante estudios e investigaciones para optimizar su diseño (Etchevers-Barra *et al.*, 2020 y SADER, 2022).

Por consiguiente, es fundamental realizar una evaluación de la fertilidad del suelo para obtener información sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, estas propiedades se consideran indicadores de la calidad del suelo (ICS), ya

que reflejan su estado y señalan cambios o tendencias en esa condición. Además, funcionan como herramientas de medición que proporcionan información sobre las características y procesos del suelo, su integración en índices de calidad del suelo (variable numérica) permiten tomar decisiones para una gestión apropiada, por ejemplo, la adición de abonos orgánicos y fertilizantes (Sarmiento *et al.*, 2018).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de los sistemas de producción promovidos por el Programa Sembrando Vida (PSV) en la calidad del suelo mediante un análisis de fertilidad del suelo y un índice de calidad del suelo, con el fin de comparar su calidad con los sistemas de producción existentes en la región.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio

El área de estudio, comprendida por los ejidos de General Felipe Ángeles, El Tortuguero y Los Fresnos, pertenece a la región del Bajo Mixe y se localiza en el municipio de San Juan Mazatlán, estado de Oaxaca, México (Figura 3.1). Dicha área está ubicada en la provincia Llanura Costera del Golfo Sur, subprovincia Llanura Costera Veracruzana y su topografía dominante es lomerío. Su clima es cálido húmedo (Am), temperatura media anual entre 24 °C y 26 °C, precipitación media anual entre 2 000 mm y 2 500 mm y evapotranspiración anual de 1 200 mm. Su tipo de suelo predominante es Luvisol (Juárez & Saragos, 2015; Nuñez-Peñaloza *et al.*, 2022).

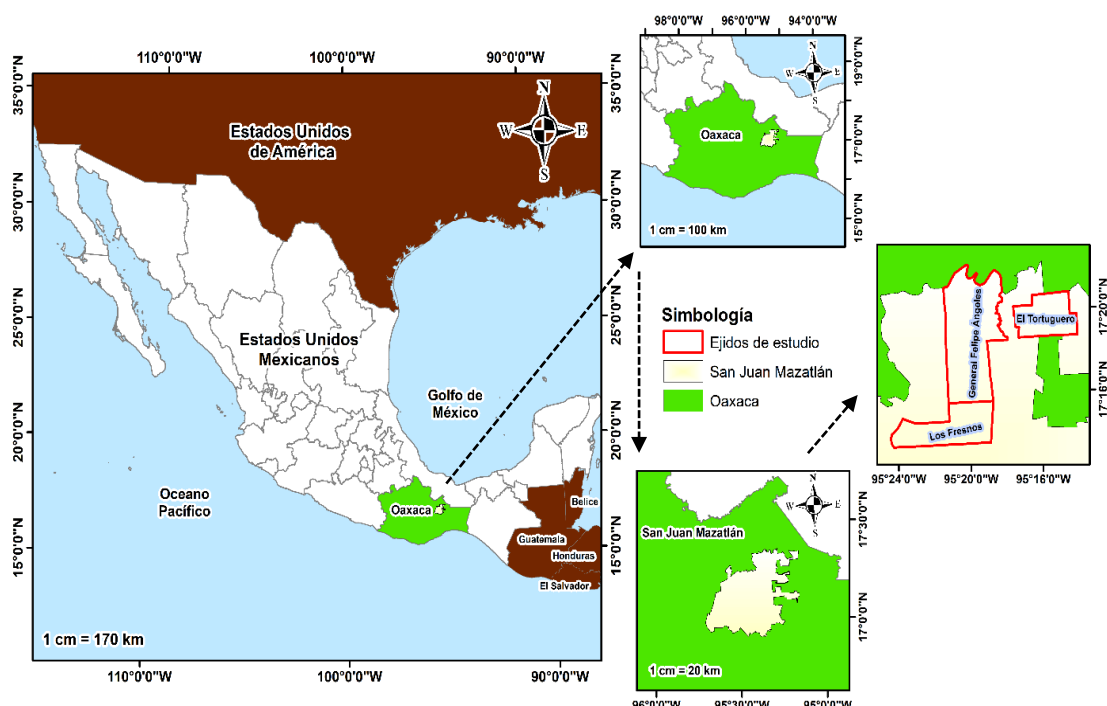


Figura 3.1. Localización del área de estudio.

Su vegetación dominante son pastizales introducidos principalmente del género *Brachiaria*, acahuals: vegetación secundaria nativa que surge de manera espontánea en terrenos que estuvieron bajo uso agrícola o pecuario (altura menor a 2.5 m y diámetros de tallos menores a 10 cm), cultivo de maíz y relictos de selva perennifolia con especies arbóreas nativas tales como *Cordia alliodora* (solerilla), *Miconia argentea* (hoja de lata), *Rollinia menbranacea* (anonilla), *Zanthoxylum riedelianum* (tachuelillo), *Schizolobium parahyba* (picho), *Tabebuia rosea* (roble), *Croton draco* (sangregado) y *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste) (Juárez & Saragos, 2015).

3.5 Descripción de los sistemas de producción

En el área de estudio, los sistemas de producción convencionales como el cultivo de limón persa, maíz y pastizales, se caracterizan por su enfoque de monocultivo. Estos sistemas de producción, aunque productivos, suelen generar impactos negativos en el suelo a largo plazo. Por otro lado, el Programa Sembrando Vida

promueve alternativas como el MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales), que combina el maíz con árboles frutales, y el SAF (Sistema Agroforestal), que integra cultivos convencionales con árboles maderables y frutales, promoviendo la biodiversidad y la conservación de los recursos naturales (Cortez *et al.*, 2022; Oxfam México, 2021).

3.5.1 Sistemas de producción promovidos por el PSV

3.5.1.1 Sistema agroforestal

Este sistema es una combinación de cultivos perennes y plantaciones de árboles (CONAFOR, 2011). En el área de estudio se caracterizan por la presencia de especies arbóreas nativas dispersas dentro de cada una de las parcelas; especies arbóreas de rápido crecimiento como *Tectona grandis* (teca), *Gmelina arborea* (melina) y *Tabebuia donell-smith* (primavera); cultivos agroindustriales de *Coffea canephora* (café robusta), *Theobroma cacao* (cacao); así como árboles de *Cinnamomum zeylanicum* (canela). Su distribución es en sentido perpendicular a la pendiente del terreno, cubriendo una superficie de 1.5 ha en cada una de las parcelas. Las labores culturales consisten principalmente en la aplicación de bocashi, composta, microorganismos de montaña y lixiviados de lombriz para la fertilización y en la aplicación de caldo sulfocálcico, caldo sulfocálcico y agua de vidrio para el control de plagas y enfermedades en las especies cultivadas.

3.5.1.2 Sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF)

Este sistema consiste en hileras de árboles frutales de *Citrus latifolia* Tanaka (limón persa), *Annona muricata* (guanabana) y *Citrus sinensis* (naranja), en algunos casos también *Cinnamomum zeylanicum* (canela) con un distanciamiento entre plantas de 2 m, cubriendo una tercera parte del terreno. Cultivos de maíz, frijol y calabaza en franjas (aguas arriba y aguas abajo) de la hilera de árboles frutales cubriendo una superficie de 1 ha según lo descrito por Cortés *et al.* (2005). Las labores culturales son iguales a las del sistema agroforestal.

3.5.2 Sistemas convencionales de la región

3.5.2.1 Maíz

Este sistema se desarrolla con el uso de semillas híbridas en dos temporadas, mayo a julio (temporal) para el ciclo primavera – verano y noviembre a enero (humedad residual o tapachol) para el ciclo otoño – invierno. El terreno de siembra se prepara con maquinaria haciendo un barbecho, rastreo, cruza y surcado, posteriormente se depositan de dos a tres semillas por mata con un distanciamiento de 0.2 m y de 0.8 m entre surcos, dando una densidad de 62.5 mil plantas/ha. La dosis de fertilización que utilizan es de 146-70-80 usando como fuentes urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). Se aplican fertilizantes foliares para complementar el cultivo con elementos menores tales como Cu, B, Zn, Mn, Mo. Plagas del follaje como *Spodoptera frugiperda* (gusano cogollero) se controlan con Spinetoram o Benzoato de emamectina. Para el control de enfermedades fungosas como *Phyllachora maydis* (mancha de asfalto) utilizan la combinación de Propiconazol y Azoxistrobin.

3.5.2.2 Limón persa (*Citrus latifolia* Tanaka)

Este sistema emplea patrones o portainjertos tales como *Citrus aurantium* (Naranja Agrio o “cucho”) y *Citrus volkameriana* (Limón Volkameriana). La distancia de plantación es de 6 m entre surcos y 4 m entre árboles en arreglo rectangular que permite mayor aireación y luz solar, con crecimiento libre y con una densidad de 417 árboles por ha. La dosis de fertilización que utilizan, al cuarto año de establecida la plantación (cuando inicia la producción), es de 21-4-8 usando como fuentes urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). Se aplican fertilizantes foliares para complementar el cultivo con elementos menores tales como Cu, B, Zn, Mn, Mo. Plagas del follaje como *Diaphorina citri* (Psilido asiático) se controlan con ciantraniliprol. Para el control de enfermedades fungosas como *Phytophthora parasitica* (gomosis) utilizan fosetil-Al.

3.5.2.3 Pastizal

En este sistema de producción extensiva, se emplean pasturas de crecimiento libre dominadas por especies como *Brachiaria* (*Brachiaria brizantha*), Tanzania (*Panicum maximum*), Taiwán (*Pennisetum purpureum*) entre otros, para optimizar la producción de carne y leche en ganado bovino. Sin embargo, las limitaciones climáticas imponen serias restricciones nutricionales a las pasturas, ocasionando poca disponibilidad durante la sequía y deficiencias de Ca, K, Cu, Zn y P (Valdez-Arjona *et al.*, 2019).

3.6 Muestreo para determinar fertilidad inicial del suelo

Se tomaron 20 muestras compuestas de suelo al final del mes de junio de 2021 en 20 parcelas que fueron seleccionadas para ingresar al PSV en los ejidos de Los Fresnos, El Tortuguero y General Felipe Ángeles municipio de San Juan Mazatlán (Figura 3.2). Estas parcelas presentaban las siguientes características: se encontraban ociosas en el momento de realizar el muestreo de suelos, estaban bajo un uso de potrero o agostadero abandonado o sin uso (Figura 3.3).

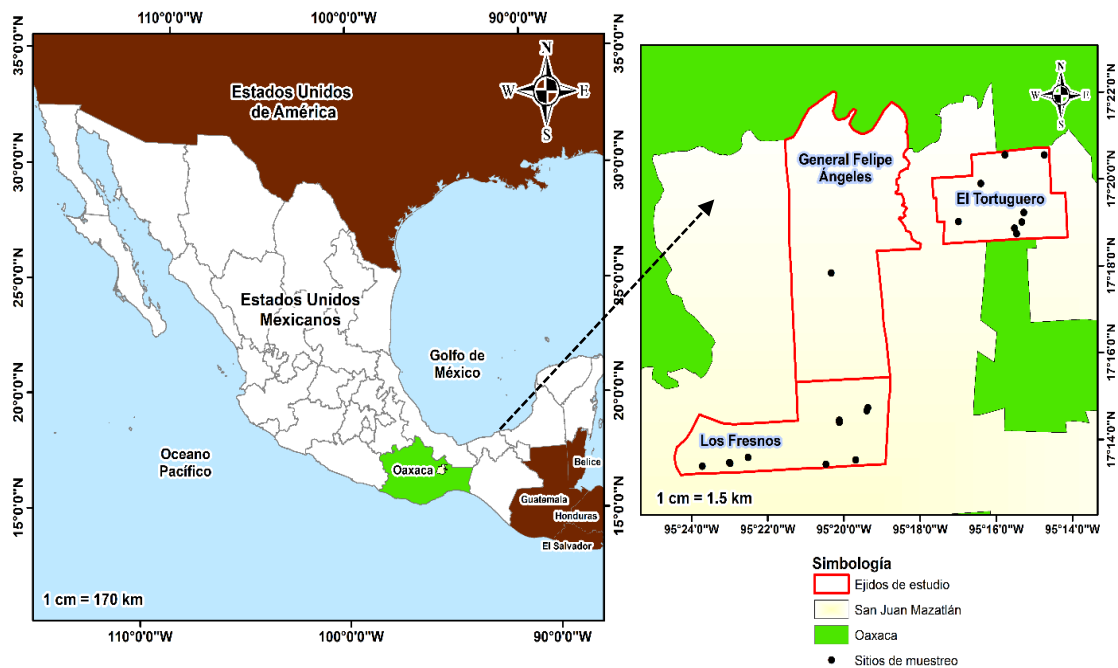


Figura 3.2 Área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo de suelos en los ejidos de General Felipe Ángeles, El Tortuguero y Los Fresnos, municipio de San Juan Mazatlán, Oaxaca.



Figura 3.3 a) Parcela en el ejido de El Tortuguero ($17^{\circ} 20' 37.56''$ N, $95^{\circ} 14' 20.47''$ O) y b) parcela en el ejido Los Fresnos ($17^{\circ} 13' 56.62''$ N, $95^{\circ} 22' 27.06''$ O).

Cada muestra compuesta se conformó de 15 submuestras recogidas en zigzag dentro de cada parcela (de 2.5 ha en promedio), a una profundidad de 20 cm con ayuda de una pala recta. Para la conformación de la muestra compuesta y su transporte al Laboratorio Fertilab en Celaya, México se procedió conforme a la NOM-021 (SEMARNAT, 2002).

3.7 Muestreo para determinar calidad del suelo en sistemas de producción promovidos por el PSV y en sistemas convencionales de la región

Con el objetivo de evaluar el impacto del PSV en el suelo, se seleccionaron seis parcelas experimentales, distribuidas de la siguiente manera: tres parcelas se encontraban bajo sistemas de producción promovidos por el PSV, mientras que las otras tres parcelas empleaban sistemas de producción convencionales característicos de la región. Adicionalmente se eligió un relicto de vegetación natural como testigo (Cuadro 3.1). Estas parcelas fueron seleccionadas considerando los siguientes factores: tamaño (medido con un GPS marca Garmin® modelo eTrex 10) y pendiente (medida con el aparato "A"), a fin de garantizar la representatividad de las condiciones agroecológicas de la zona.

Cuadro 3.1 Perfil de parcelas experimentales para determinar calidad del suelo.

Ejido	Sistema de producción	Superficie m ²	Pendiente %	Localización	
				Latitud (N)	Longitud (O)
Los Fresnos	MIAF	3 093	44	17° 14' 0.20"	95° 22' 27.03"
	Limón persa	2 247	32	17° 14' 44.41"	95° 21' 5.07"
El Tortuguero	MIAF	6 386	32	17° 19' 10.22"	95° 16' 40.13"
	SAF	4 511	39	17° 19' 11.67"	95° 16' 38.59"
	Maíz	3 512	25	17° 18' 51.00"	95° 16' 45.00"
General Felipe Ángeles	Pastizal	4 024	22	17° 18' 16.15"	95° 20' 2.27"
	Relicto de selva perennifolia	3 199	35	17° 18' 8.17"	95° 19' 59.46"

MIAF: milpa intercalada con árboles frutales; SAF: sistema agroforestal

En cada uno de los sistemas de producción y del relicto de selva perennifolia se realizó un muestreo compuesto de suelos a las profundidades de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm utilizando una barrena AMS® de acero inoxidable y 21 pulgadas. El muestreo consistió en la toma de 25 submuestras siguiendo un transecto en zig-zag dentro de cada parcela del sistema de producción para formar una muestra compuesta igual que para el análisis de fertilidad (SEMARNAT, 2002).

3.8 Análisis de laboratorio

3.8.1 Diagnóstico de la fertilidad inicial del suelo

Las propiedades evaluadas fueron densidad aparente (D_{ap}) por el método de la probeta modificado (Cervantes y Mojica, 2003); pH en relación 1:2 suelo/agua medido con un potenciómetro, materia orgánica (MO) por Walkley – Black, fósforo (P) por Bray – Kurtz, capacidad de intercambio catiónico (CIC), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) extraídos con acetato de amonio 1N pH 7 cuantificados por absorción atómica (SEMARNAT, 2002); N-NO₃ (N) extraído con KCl 2M y cuantificado por el método de nitración (Robarge *et al.* 1983); hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B) extraídos con ácido del dietilen-triamino-pentaacético 0.005M (DTPA) – sorbitol (SEMARNAT, 2002; Shiffler *et al.*, 2005) y azufre (S) por el método turbidimétrico (Gavlak *et al.* 2005).

3.8.2 Calidad de suelo

3.8.2.1 Indicadores físicos y químicos del suelo

Este primer conjunto de indicadores aborda funciones ecosistémicas del suelo, incluyendo los servicios de regulación hídrica, biogeoquímica y de soporte, específicamente relacionados con el ciclo del carbono y la productividad primaria (Drobnik *et al.*, 2018).

Los indicadores de calidad del suelo evaluados para este enfoque fueron densidad aparente (D_{ap}), pH en relación 1:2 suelo/agua, materia orgánica (MO), nitrato (NO_3^-), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), los procedimientos para la obtención de estos indicadores fueron descritos en el apartado 2.5.1, y se agregó amonio (NH_4^+) evaluado por destilación mediante arrastre de vapor, porosidad total (f) en función de la D_{ap} y la densidad real (2.65 Mg m^{-3}), textura por el método de Bouyoucos y capacidad de retención de humedad (PAW) como la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), medidos con membrana y olla de presión (SEMARNAT, 2002).

3.9 Análisis estadístico

3.9.1 Fertilidad de suelo

Se calculó el valor medio ($\bar{x}$), desviación estándar (σ), coeficiente de variación (CV), valor mínimo ($V_{\min}$) y valor máximo ($V_{\max}$) de las propiedades de los suelos, las medias se compararon con la prueba t, entre los ejidos de El Tortuguero y Los Fresnos (Sokal & Rohlf, 1999). Todos los procedimientos anteriores se hicieron con el software R en su versión 4.3.3 (R Core Team, 2024).

3.9.2 Calidad de suelo

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) usando el software R en su versión 4.3.3 (R Core Team, 2024) con todos los indicadores del suelo para seleccionar aquellos que conformarían el conjunto mínimo de datos (CMD), explicando el procedimiento en al menos un 80% de la variabilidad total de los datos, con lo que se realizó la selección de los componentes principales con el

criterio de Kaiser (mayor a 1) y aquellos indicadores en donde la distancia represente el 10% con respecto al valor más alto. En los indicadores que presentaron un coeficiente de correlación significativo se procedió a elegir el de mayor peso. Los valores de los indicadores seleccionados fueron normalizados utilizando una función de puntuación lineal (PL); para CC, Ca, Mg, NO₃⁻, P y pH se empleó la Ecuación (1), y para la D_{ap} se usó la Ecuación (2):

$$PL = \frac{x}{x_{max}} \quad (1)$$

$$PL = \frac{x_{min}}{x} \quad (2)$$

Donde x es el valor medido del indicador, x_{max} es el valor máximo del indicador y x_{min} es el valor mínimo del indicador.

El índice de calidad de suelo (ICS) para cada sistema de producción (Andrews *et al.* 2002), se obtuvo con la ecuación (3):

$$ICS = \sum_{i=1}^n w_i \times PL_i \quad (3)$$

Donde W_i es el peso atribuido al i-ésimo componente principal, PL_i es la puntuación lineal del i-ésimo indicador normalizado y n es el número de indicadores que conforman el conjunto mínimo de datos (CMD)

Se establecieron cinco clases de calidad de acuerdo con Estrada-Herrera *et al.* (2017), que sirvió para comparar a los diferentes sistemas de producción: 0.00 a 0.19, calidad muy baja; 0.20 a 0.39, calidad baja; 0.40 a 0.59, calidad moderada; 0.60 a 0.79, calidad alta y de 0.80 a 1.00, muy alta calidad.

3.10 Resultados y Discusión

Los resultados del diagnóstico de la fertilidad del suelo se presentan mediante una estadística descriptiva, que permite resumir y analizar las propiedades clave del suelo. Para el diagnóstico de la calidad del suelo, se emplea un análisis

multivariado utilizando componentes principales, proporcionando una visión más integral del estado del suelo.

3.10.1 Diagnóstico de la fertilidad del suelo

3.10.1.1 Densidad aparente, D_{ap}

El valor medio de D_{ap} encontrado fue de 1.26 Mg m^{-3} con un coeficiente de variación (CV) de 4.76 % (Cuadro 3.2). Esta D_{ap} sugiere que existe una porosidad total mayor que 50 % y considerada como buena, lo cual se debe a que los sistemas no se encuentran bajo una sobreexplotación agropecuaria que conduzca a una compactación del suelo. Nuñez-Peñaloza *et al.* (2022) encontraron valores muy superiores a los obtenidos en este estudio en sistemas sometidos a una sobreexplotación agropecuaria en la misma región de estudio. El CV advierte de una propiedad normalmente homogénea.

Cuadro 3.2 Valores medios ($\bar{x}$) en la profundidad del suelo 0 – 20 cm (n = 20) para las variables analizadas en los tres ejidos.

	D_{ap} (Mg m^{-3})	pH adi	MO (%)	N	P	Fe	Zn	Mn	Cu	B	S	CIC	K	Ca	Mg	Na
$V_{\min}$	1.14	5.6	1.58	3.26	2.36	11.10	0.10	1.42	0.10	0.09	1.38	4.38	0.12	2.28	1.17	0.08
$V_{\max}$	1.37	6.8	6.16	22.90	58.30	74.70	2.71	10.30	1.49	0.12	35.90	20.30	0.44	17.14	3.60	0.22
$\bar{x}$	1.26	6.2	2.52	10.95	9.36	31.70	0.35	5.02	0.35	0.10	18.03	7.86	0.22	5.64	1.82	0.13
σ	0.06	0.3	0.96	6.03	12.33	15.56	0.69	2.60	0.35	0.01	10.34	3.38	0.09	3.10	0.55	0.04
CV	4.76	5.4	38.1	55.07	131.73	49.12	197.14	51.79	97.22	10.00	57.35	43.00	40.91	54.96	30.22	30.77

$V_{\min}$: valor mínimo; $V_{\max}$: valor máximo; $\bar{x}$: valor medio; s: desviación estándar; CV: coeficiente de variación (%); D_{ap} : densidad aparente; MO: materia orgánica; N: nitrato; P: fósforo; Fe: hierro; Zn: zinc; Mn: manganeso; Cu: cobre; B: boro; S: azufre; CIC: capacidad de intercambio catiónico; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio

3.10.1.2 Potencial de hidrógeno, pH

Se obtuvo un valor medio de pH de 6.2 clasificado como moderadamente bajo (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3) lo cual se explica por la génesis ácida del suelo. Zetina *et al.* (2002) mencionaron que la erosión, la extracción de nutrientes por los cultivos y la lixiviación de bases ocasionan una disminución gradual del pH del suelo, lo cual reduce progresivamente la fertilidad de este y la productividad agropecuaria. Estos autores mencionan además que los suelos de reciente incorporación a alguna actividad agropecuaria generalmente tienen valores de pH alrededor de 6.0 como los encontrados en este estudio, consecuentemente si

la actividad incluye la aplicación de materias orgánicas, su descomposición disminuiría aún más el pH, lo que justificaría emplear encalado en el mediano plazo. Villa-Alcántara & Nuñez-Peñaloza (2016) encontraron que el adicionar fertilizantes al cultivo de maíz no garantiza mayor rendimiento si antes no se corrigen los desequilibrios causados por el pH del suelo, poniendo en riesgo la rentabilidad de cualquier agroecosistema en el mediano y largo plazo en esta región. Esta propiedad tuvo el CV más bajo respecto a las demás propiedades químicas analizadas (Cuadro 3.2), debido a que es una característica intrínseca de la génesis del suelo, siendo relativamente homogénea en la región, lo que concuerda con lo encontrado por López *et al.* (2019).

Cuadro 3.3 Intervalos de clasificación e interpretación de análisis de fertilidad de suelos.

	Muy Bajo	Bajo	Moderadamente bajo	Medio	Moderadamente alto	Alto	Muy Alto
pH ¹	< 4.6	4.6 – 5.4	5.5 – 6.4	6.5 – 7.3	7.4 – 8.1	8.2 – 8.8	> 8.9
MO ¹	< 0.8	0.81 – 1.20	1.21 – 1.80	1.81 – 2.30	2.31 – 3.00	3.01 – 4.00	> 4.01
N-NO ₃ ²	< 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 100	100 – 150	> 150
P ¹	< 4	5 – 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 – 60	> 61
K ¹	< 0.20	0.20 – 0.38	0.39 – 0.51	0.52 – 1.02	1.03 – 2.05	2.06 – 3.07	> 3.07
Ca ¹	< 2.50	2.50 – 3.75	3.75 – 7.50	7.50 – 10.00	10.00 – 15.00	15.00 – 22.50	> 22.50
Mg ¹	< 0.41	0.41 – 0.82	0.82 – 1.64	1.64 – 3.28	3.28 – 6.56	6.56 – 11.48	> 11.48
S ¹	< 3	4 - 5	6 - 7	8 - 12	13 - 18	18 – 25	> 25
PSI ^{3*}	< 1.25	1.25 – 2.50	2.51 – 3.75	3.76 – 5.00	5 – 10	10 – 15	> 15
Fe ¹	< 3	3 - 5	5 - 8	9 - 12	13 - 25	26 - 49	> 50
Zn ¹	< 0.3	0.3 – 0.6	0.7 – 1.2	1.3 – 2.5	2.6 – 5.0	5.1 – 8.0	> 8.1
Mn ¹	< 2	2 - 4	4 - 7	7 - 12	12 – 25	25 – 50	> 50
Cu ¹	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 0.8	0.9 – 1.2	1.3 – 1.8	1.8 – 2.5	> 2.5
B ¹	0 - 0.4	0.5 – 0.7	0.8 – 1.0	1.1 – 1.5	1.6 – 2.0	2.0 – 3.0	> 3.0

¹(Castellanos *et al.* 2000); ²(SEMARNAT 2002); ³(Martínez-Rodríguez *et al.* 2021); las unidades de las variables enlistadas en la columna 1 corresponden a las mismas del Cuadro 3.2. *PSI expresado como % del cociente entre [Na] y [CIC]

3.10.1.3 Materia orgánica, MO

El contenido de MO se clasificó como moderadamente alto con un valor promedio de 2.52 % (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3). Este valor se asocia a una explotación agropecuaria moderada en los sitios muestreados. López *et al.* (2019) mencionaron que las prácticas de cultivo que no incorporan fuentes de MO al

suelo traen como consecuencia su deterioro progresivo, en virtud de que la MO está relacionada con muchas propiedades de este. El CV de la MO tuvo un valor de 38.1 % (Cuadro 3.2) lo que corrobora una propiedad normalmente heterogénea, debido principalmente a factores como el tipo de vegetación y la pendiente del terreno en la región.

3.10.1.4 Nitrógeno, fósforo y potasio. N, P, K

Las concentraciones medias de N (10.95 mg kg^{-1}), P (9.36 mg kg^{-1}) y K ($0.22 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) se clasificaron como bajas (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3), lo que conlleva a que los cultivos presenten deficiencias de estos nutrimentos ya sean pastos cultivados (Muñoz-González *et al.* 2016) o cultivos anuales (Vergara-Sánchez *et al.* 2005). Esto se debe a que la precipitación en la región de estudio, al ser abundante, lixivia parte de estos nutrimentos, aunado a una constante extracción por las plantas en la temporada de lluvias, así como a la movilización e inmovilización de los mismos en el suelo (Sárdi, 2017).

La eficiencia de fertilizantes aplicados en esta región generalmente son del orden de 50% para N, 10% (o menos) para P y entre 20 % y 40 % para K (Baiyeri y Ugehe, 2017), por lo que se deben realizar previamente algunas estrategias de manejo como el encalado o la adición de abonos orgánicos (Vergara-Sánchez *et al.* 2005, Villa-Alcántara & Nuñez-Peñaloza, 2016).

El CV para estas propiedades, de mayor a menor, tuvo un comportamiento de la siguiente manera: $P > N > K$ con 131.73 %, 55.07 % y 40.91 % (Cuadro 3.2), resultados similares obtuvo López *et al.* (2019), lo cual indica que son propiedades muy heterogéneas en esta región. La prueba de *t* indicó diferencias significativas ($p < 0.01$) en la concentración media de N entre los ejidos de El Tortuguero y Los Fresnos (14.60 mg kg^{-1} y 7.21 mg kg^{-1} , respectivamente)

3.10.1.5 Capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio y sodio. CIC, Ca, Mg, Na

El valor medio de la CIC fue de 7.86 cmol+ kg⁻¹ con un CV de 43 % (Cuadro 3.2), lo que indica que también es una propiedad heterogénea en la región, resultados similares fueron reportados por Fonteyne *et al.* (2021) y Vergara-Sánchez *et al.* (2005) en la región de estudio. El valor de la CIC encontrado considerado bajo (Cuadro 3.2 Cuadro 3.3) revela una alta meteorización del suelo (Baiyeri & Ugehe, 2017), una limitada capacidad de retención de nutrimentos y una desprotección del suelo contra el proceso de lixiviación (López *et al.* 2019), así como la presencia de arcillas 1:1 (Palma-López *et al.* 2015). La concentración de Ca (5.64 cmol+ kg⁻¹) se clasificó como moderadamente baja, la de Mg (1.82 cmol+ kg⁻¹) como media y la de Na (0.13 cmol+ kg⁻¹: 1.65 % PSI) como muy baja (Cuadros 3.2 y 3.3). Estos valores concuerdan con los reportados por Fonteyne *et al.* (2021) y Vergara-Sánchez *et al.* (2005).

De acuerdo con el análisis de correlación entre estos cationes y la CIC los valores de K ($r = 0.49$, $p < 0.05$), Ca ($r = 0.99$, $p < 0.01$) y Mg ($r = 0.56$, $p < 0.05$) contribuyen en mayor proporción a explicar la CIC encontrada (Cuadro 3.4). Otra propiedad que también explica la variación de la CIC es el contenido de MO ($r = 0.75$, $p < 0.01$), propiedad que asimismo explica la concentración de K ($r = 0.60$, $p < 0.01$) y Ca ($r = 0.76$, $p < 0.01$), mejorando indirectamente la CIC. Al respecto, Cruz-Macías *et al.* (2020) mencionaron que el uso de cualquier enmienda o material orgánico mejora la CIC, lo cual aumenta el nivel de fertilidad de los suelos.

Cuadro 3.4 Coeficientes de correlación de Pearson para las variables analizadas en los tres ejidos en la profundidad del suelo 0 – 20 cm ($n = 20$).

	Dap	pH	MO	N	P	Fe	Zn	Mn	Cu	B	S	CIC	K	Ca	Mg	Na
Dap	-															
pH	-0.02	-														
MO	-0.24	0.31	-													
N	-0.34	-0.16	0.27	-												
P	0.54*	0.11	0.03	-0.14	-											
Fe	-0.11	-0.71**	0.07	0.21	-0.25	-										
Zn	-0.34	0.36	0.67**	0.45	-0.13	-0.04	-									
Mn	-0.41	-0.35	-0.12	0.33	-0.38	0.18	0.19	-								

Cu	-0.54*	0.06	0.63**	0.39	-0.14	0.33	0.59**	0.05	-							
B	0.36	-0.39	-0.08	-0.35	0.29	0.42	-0.13	-0.03	-0.04	-						
S	0.07	-0.46*	-0.36	0.21	-0.22	0.43	-0.06	0.08	-0.28	0.18	-					
CIC	-0.44*	0.36	0.75**	0.62**	0.00	-0.03	0.85**	0.19	0.65**	-0.26	-0.17	-				
K	-0.05	0.33	0.60**	0.21	-0.09	-0.04	0.45*	-0.23	0.56*	-0.13	-0.48*	0.49*	-			
Ca	-0.45*	0.30	0.76**	0.63**	0.04	0.00	0.79**	0.18	0.63**	-0.26	-0.14	0.99**	0.43	-		
Mg	-0.25	0.59**	0.23	0.26	-0.20	-0.34	0.71**	0.22	0.35	-0.29	-0.23	0.56*	0.44	0.44	-	
Na	-0.27	-0.18	0.10	0.34	-0.14	0.09	0.10	0.49*	0.06	-0.11	-0.20	0.25	-0.14	0.29	-0.13	-

Valores en negritas indican diferencias significativas (**) $p < 0.01$, (*) $p < 0.05$

El CV para estas propiedades, de mayor a menor, tuvo un comportamiento de la siguiente manera: Ca > Na > Mg con 54.96, 30.77 y 30.22 % (Cuadro 3.2), resultados muy inferiores a los reportados por López *et al.* (2019), pero siguen siendo propiedades muy heterogéneas en esta región.

3.10.1.6 Azufre, S

El contenido de S se clasificó como alto con un valor promedio de 18.03 mg kg⁻¹ con un CV de 57.35 % (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3), contenido que, de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) y Corrales-Maldonado *et al.* (2014) probablemente corresponde a la reserva adsorbida por la MO protegiéndola de la lixiviación en regiones con intensas lluvias como la región de estudio. Cuando la concentración de S en la solución del suelo es mayor a 5 mg kg⁻¹, normalmente los cultivos pueden abastecerse bien de este elemento (Castellanos *et al.* 2000). La prueba de *t* indicó diferencias significativas ($p < 0.01$) en la concentración media de S entre los ejidos de El Tortuguero y Los Fresnos (24.72 mg kg⁻¹ y 11.74 mg kg⁻¹, respectivamente).

3.10.1.7 Hierro, Zinc, Manganeseo, Cobre y Boro. Fe, Zn, Mn, Cu, B

La concentración de Fe (31.70 mg kg⁻¹) fue alta, Zn (0.35 mg kg⁻¹) baja, Mn (5.02 mg kg⁻¹) moderadamente baja, Cu (0.35 mg kg⁻¹) baja y B (0.10 mg kg⁻¹) muy baja (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3), resultados que concuerdan con los reportados por Fonteyne *et al.* (2021). El orden en CV fue Zn > Cu > Mn > Fe > B (Cuadro 3.2), presentándose en el Zn el valor más alto con 197.14 % y en el B el más bajo

con 10 %, lo cual indica que sólo el B es una propiedad del suelo relativamente homogénea en la región de estudio.

Palma-López *et al.* (2015) comentaron que el aumento en la presencia de hierro en el suelo es un indicador de un incremento del intemperismo y una disminución del pH, esto último se comprueba con los datos del Cuadro 3.4 ($r = -0.71$, $p < 0.01$).

La prueba de t indicó diferencias significativas ($p < 0.05$) en la concentración media de Fe (40.76 mg kg^{-1} y 22.37 mg kg^{-1} , respectivamente) y Mn (6.41 mg kg^{-1} y 3.94 mg kg^{-1} , respectivamente) entre los ejidos de El Tortuguero y Los Fresnos. Muñoz-González *et al.* (2016) encontraron que una alta presencia de hierro en el suelo está asociado a una alta acumulación de este elemento en plantas forrajeras del trópico húmedo. La prueba de t indicó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los ejidos de El Tortuguero y Los Fresnos en la concentración media de Fe (40.76 mg kg^{-1} y 22.37 mg kg^{-1} , respectivamente) y Mn (6.41 mg kg^{-1} y 3.94 mg kg^{-1} , respectivamente).

Castellanos *et al.* (2000) mencionan que una alta concentración de Fe en el suelo crea antagonismo con Cu, Mn y Zn lo que conlleva a que estos elementos no se encuentren en cantidades suficientes para las plantas, tal y como lo reportaron Muñoz-González *et al.* (2016). En lo que respecta al B, la deficiencia encontrada puede deberse a la excesiva precipitación (López *et al.* 2019), el pH, así como por el tipo de arcilla presente 1:1 (Castellanos *et al.* 2000).

3.10.2 Diagnóstico de la calidad del suelo

3.10.2.1 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva de los indicadores de calidad de suelo determinadas en los sistemas de producción (Cuadro 3.5), indica que solo tres variables (D_{ap} , porosidad y pH) observaron un coeficiente de variación (CV) $< 15 \%$, lo que significa que presentan una variabilidad baja. El pH presentó la menor variabilidad (3.53 %), se sabe que esta propiedad química es una de las que menos varía. A diferencia de esta propiedad, puede esperarse una mayor

variabilidad en MO, P y Mg debido a que son altamente dependientes de las condiciones de manejo del suelo, como la incorporación de residuos orgánicos y la adición de fertilizantes (Brady & Weil, 2017).

Cuadro 3.5 Resumen estadístico de variables del suelo por unidad de estudio (n = 21).

	V _{min}	$\bar{x}$	V _{max}	s	CV
D _{ap} (Mg m ⁻³)	1.11	1.25	1.37	0.07	5.56
f (%)	48.00	52.90	58.00	2.59	4.89
A (%)	19.80	46.80	65.80	14.19	30.30
L (%)	16.60	28.90	38.60	8.01	27.72
Ar (%)	15.60	24.30	47.60	8.49	35.00
CC (m ³ m ⁻³)	0.18	0.30	0.45	0.07	24.65
PMP (m ³ m ⁻³)	0.07	0.14	0.27	0.07	48.60
PAW (m ³ m ⁻³)	0.08	0.16	0.21	0.03	20.84
pH	5.52	5.78	6.25	0.20	3.53
MO (%)	1.21	2.36	4.44	1.09	46.32
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	12.30	22.30	36.80	6.12	27.48
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	10.50	21.40	35.00	5.60	26.23
N _{inorg} (mg kg ⁻¹)	22.80	43.60	68.30	9.95	22.80
P (mg kg ⁻¹)	1.15	4.80	23.70	5.11	106.66
K (cmol _c kg ⁻¹)	0.25	0.47	0.77	0.13	27.98
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	5.78	8.70	15.30	2.81	32.32
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1.10	2.88	8.18	2.07	71.91
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	7.30	12.00	22.80	4.80	39.89

V_{min}: valor mínimo; V_{max}: valor máximo; $\bar{x}$: media; s: desviación estándar; CV: coeficiente de variación (%); D_{ap}: densidad aparente; f: porosidad total; A: arena; L: limo; Ar: arcilla; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; PAW: humedad aprovechable; MO: materia orgánica; NH₄⁺: amonio; NO₃⁻: nitrato; N_{inorg}: nitrógeno inorgánico; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

3.10.2.2 Selección de indicadores de calidad de suelo

Los primeros cuatro componentes principales (CP) del análisis de componentes principales (ACP) explicaron el 84.86 % de la varianza total de los datos originales (Cuadro 3.6), por lo que, fueron los componentes considerados en la selección de indicadores de la calidad de suelo. El CP1 incluyó a los siguientes indicadores: CC, PMP, Ca y Mg. La CC y PMP son dos propiedades que permiten conocer la máxima cantidad de agua disponible para las plantas, por lo que este componente se relaciona con la capacidad amortiguadora y reguladora del suelo (Hillel, 2003). Las propiedades Ca y Mg desempeñan funciones críticas para

contrarrestar la acidificación del suelo, además de que su ciclo juega un papel muy importante en la función del suelo y del ecosistema (Brady & Weil, 2017).

Cuadro 3.6 Resultado del análisis de componentes principales de indicadores de calidad de suelo (n = 21).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Eigenvalues	6.48	3.61	2.95	1.38
% varianza	38.12%	21.25%	17.35%	8.14%
%varianza acumulada	38.12%	59.37%	76.72%	84.86%
D _{ap}	0.207	0.402	0.005	0.019
F	-0.207	-0.402	-0.005	-0.019
A	0.323	-0.234	0.096	0.145
L	-0.259	0.185	-0.034	-0.376
Ar	-0.296	0.217	-0.129	0.112
CC	-0.388	-0.004	0.010	-0.028
PMP	-0.363	0.089	-0.102	0.159
PAW	-0.107	-0.209	0.280	-0.423
pH	0.123	-0.234	-0.174	0.600
MO	-0.145	-0.311	0.332	-0.088
NH ₄ ⁺	0.105	0.225	0.377	0.196
NO ₃ ⁻	-0.067	0.141	0.480	0.118
N _{inorg}	0.027	0.218	0.503	0.187
P	0.101	-0.406	0.002	-0.013
K	-0.211	-0.223	0.335	0.168
Ca	-0.355	-0.033	-0.026	0.293
Mg	-0.358	0.067	-0.073	0.225

CP1, CP2, CP3, CP4: componente principal 1 hasta 4; D_{ap}: densidad aparente; f: porosidad total; A: arena; L: limo; Ar: arcilla; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; PAW: humedad aprovechable; MO: materia orgánica; NH₄⁺: amonio; NO₃⁻: nitrato; N_{inorg}: nitrógeno inorgánico; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; CIC: capacidad de intercambio catiónico

El CP2 incluyó los indicadores D_{ap}, porosidad y P. Las dos primeras propiedades influyen en otras funciones del suelo como el reciclaje de nutrientes, erosión del suelo, almacenamiento y disponibilidad del agua y rendimiento del cultivo. Un aumento en la densidad aparente (disminución de la porosidad total) impide la penetración de raíces y el flujo del agua, lo que a su vez limita el rendimiento de los cultivos (Brady & Weil 2017, Hillel 2003). El P es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, su concentración en suelos tropicales es poca o muchas veces casi nula (Palma-López *et al.* 2015, Vergara-Sánchez

et al. 2005, Zetina *et al.* 2002), lo que reduce la disponibilidad para los cultivos, en consecuencia, limita la sostenibilidad de los sistemas de cultivo en el corto plazo. La producción agrícola actual ocupa grandes cantidades de roca fosfórica, un recurso finito que probablemente se agote en menos de cien años, por lo tanto, aumentar la eficiencia en el uso de P es sumamente importante (Castellanos *et al.* 2000).

El CP3 incluyó el N_{inorg} y el nitrato. De acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) el nitrógeno es uno de los elementos más críticos para el crecimiento y productividad de los cultivos, es absorbido directamente a través del sistema radicular en dos formas: NO_3^- y NH_4^+ (conocidas como N_{inorg}). Su pérdida por fenómenos como lixiviación y volatilización, eutrofización de cuerpos de agua, acumulación excesiva de nitratos en las aguas subterráneas y aumento de las emisiones de óxido nitroso conducen directamente a una reducción significativa de la productividad de los cultivos (Brady & Weil, 2017). Castellanos *et al.* (2000) mencionan que los nitratos en el suelo, a diferencia de otros nutrientes, se encuentran en forma totalmente disponible para las plantas, y que, debido a la nitrificación realizada por bacterias *Nitrobacter* el NH_4^+ pasa a la forma final de NO_3^- .

Finalmente, el CP4 incluyó al pH, Zetina *et al.* (2002) mencionaron que, en suelos tropicales incorporados a la explotación agropecuaria, el pH ácido del suelo fue resultado de la intensa presión que ejercen los factores climáticos, acentuado por la erosión del suelo y por la extracción de nutrientes por los cultivos, lo que reduce progresivamente la fertilidad del suelo y la productividad agropecuaria.

La alta correlación observada entre algunos indicadores (Cuadro 3.7) en los CP refleja que la inclusión de todos puede ser redundante en el conjunto mínimo de datos (CMD), por lo que, los indicadores PMP, porosidad y N_{inorg} no fueron considerados como indicadores de la calidad de suelo. El Cuadro 3.8 muestra los

indicadores finalmente seleccionados para conformar el CMD y sus coeficientes de puntuación.

Cuadro 3.7 Coeficientes de correlación de Pearson (ρ) de los indicadores seleccionados inicialmente en el análisis de componentes principales.

	Dap	f	CC	PMP	pH	NO ₃ ⁻	N _{inorg}	P	Ca	Mg
Dap	1	-1***	-0.52*	-0.35	-0.15	0.14	0.32*	-0.34	-0.53*	-0.34
	f	1	0.52*	0.35	0.15	-0.14	-0.32*	0.34	0.52*	0.34
		CC	1	0.91***	-0.34	0.15	-0.07	-0.25	0.88***	0.90***
			PMP	1	-0.23	0.08	-0.11	-0.39	0.91***	0.90***
				pH	1	-0.33*	-0.24	0.50**	-0.03	-0.09
					NO ₃ ⁻	1	0.83***	-0.21	0.13	0.14
						N _{inorg}	1	-0.29	-0.06	-0.06
							P	1	-0.24	-0.28
								Ca	1	0.88***
									Mg	1

Niveles de significancia: * = 0.05, moderada, = 0.01, fuerte, *** = 0.001, muy fuerte.

Los índices de calidad de suelo (ÍCS) obtenidos (Figura 3.4) mediante este CMD, de acuerdo con Estrada-Herrera *et al.* (2017) se ubican en la clase calidad moderada y alta. Por lo que, en esta región, pH ácidos se relacionan con escasez de bases intercambiables y de fósforo. Se recomendaría aplicar fertilizantes inorgánicos como superfosfato de calcio simple o triple que aportan P y Ca, materiales de encalado para neutralizar el exceso de acidez, así como, corregir los problemas de adsorción, precipitación y mejorar la disponibilidad de bases intercambiables para los cultivos (Castellanos *et al.* 2000, Vergara-Sánchez *et al.* 2005, Villa-Alcántara & Nuñez-Peñaloza 2016, Zetina *et al.* 2002). Aumentar la concentración de Ca y Mg en el suelo impactaría directamente el ÍCS, ya que son indicadores con un coeficiente de puntuación más alto. Niveles adecuados de agua en el suelo son importantes para los sistemas agrícolas y agroforestales, ya que mejorarían la productividad, por sus múltiples servicios ambientales (Hillel, 2003). Adicionalmente, la aplicación de abonos orgánicos, abonos verdes, residuos de cosecha y el intercalado con plantas leguminosas, aumentarían la CC del suelo, disminuiría la D_{ap} y aumentaría la concentración de NO₃⁻ en el suelo (Fonteyne *et al.* 2021).

Cuadro 3.8 Selección de indicadores para conformar el CMD y coeficiente de puntuación.

Indicador	CC	Ca	Mg	D _{ap}	P	NO ₃ ⁻	pH
Puntuación	PC1: 0.45			PC2: 0.25		PC3: 0.20	PC4: 0.10

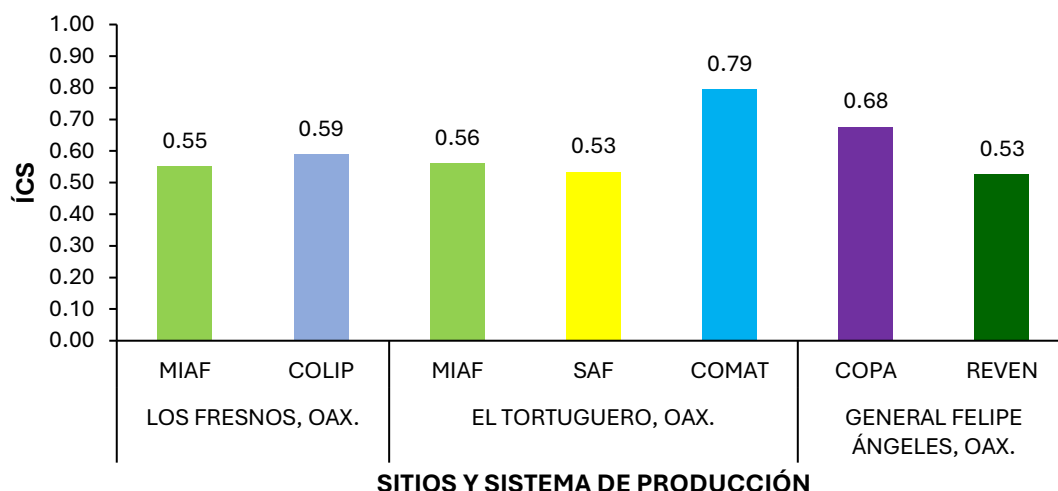


Figura 3.4 Variación de los índices de calidad de suelo en los distintos sitios y sistemas de producción.

Los indicadores físicos y químicos se integraron en un marco de evaluación que refleja las condiciones locales que vincula el estado actual de la fertilidad del suelo con la calidad de este. La calidad del suelo no solo se puede medir a escala simplificada, sino que la información obtenida a través de los ÍCS se puede usar para dar recomendaciones viables que mejoren la productividad de los cultivos y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

3.11 Conclusiones

Como resultado de la alta variabilidad espacial encontrada dentro del área de estudio para MO, N-NO₃, P, K, Ca, Mg, Na, CIC, Fe, Cu, Zn, Mn, S, con la excepción de D_{ap}, pH y B, el análisis de fertilidad de suelo indicó un bajo nivel de nutrientes primarios, secundarios y de micronutrientes en los sistemas examinados, resultando en una baja fertilidad. La CC, Ca, Mg, D_{ap}, P, N-NO₃⁻ y el pH constituyeron el índice de calidad del suelo. Los índices de calidad del suelo

(ÍCS) de los sistemas de producción promovidos por el PSV alcanzaron niveles moderados, lo que indica que son adecuados para la mayoría de los cultivos. Los sistemas de producción del PSV potenciaron servicios ecosistémicos como la regulación del agua y la protección contra la erosión, contribuyendo así a la sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas. Los sistemas agroforestales promovidos por el PSV mejoran la calidad del suelo y crean condiciones más fértiles y sostenibles.

3.12 Literatura citada

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Baiyeri, K. P., & Ugehe, F. D. (2017). Response pattern of selected tropical perennials to organic and inorganic fertilizers based on empirical data. In M. Naeem, A. Ansari, & S. Singh (Eds.), *Essential plant nutrients. Uptake, use efficiency, and management* (pp. 155–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4_8
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils*. (15th ed.). Pearson education.
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. INCAPA.
- Cervantes, C., & Mojica, S. (2003). *Manual de laboratorio de edafología*. Universidad Nacional de Costa Rica.
- CONAFOR. (2011). *Establecimiento de sistemas agroforestales*. CONAFOR.
- Corrales-Maldonado, C. G., Vargas-Arispuro, I., Vallejo-Cohén, S., & Martínez-Téllez, M. A. (2014). Deficiencia de azufre en suelos cultivables y su efecto en la productividad. *BIOtecnica*, 16(1), 38–44. <https://doi.org/10.18633/bt.v16i1.32>
- Cortés, J. I., Turrent, A., Díaz, P., Hernández, E., Mendoza, R., & Aceves, E. (2005). *Manual para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en laderas*. Colegio de Postgraduados.

- Cortez, J. G., Baca, J., Uribe, M., Gómez, T., & Valdés, E. (2022). La multifuncionalidad de la agricultura como herramienta de análisis de políticas agrarias: el caso del programa Sembrando Vida en Chahuities, Oaxaca. *Acta Universitaria*, 32(1), e3339. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3339>
- Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(3), 475–480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(1), 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813–831.
- Etchevers-Barra, J. D., Cotler-Ávalos, H., & Hidalgo-Moreno, C. (2020). Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(4), 931–939. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867>
- Fonteyne, S., Burgueño, J., Albarrán, B. A., Andrio, E., Castillo, L., Enyanche, F., Escobedo, H., Espidio, J., Espinosa, A., Meza, P., González, F., González, J., Govaerts, B., López, J. D., López, A., Martínez, M. A., Martínez, F., Mora, M., Nieves, A. I., ... Verhulst, N. (2021). Effects of conservation agriculture on physicochemical soil health in 20 maize-based trials in different agro-ecological regions across Mexico. *Land Degradation and Development*, 32(1), 2242–2256. <https://doi.org/10.1002/ldr.3894>
- Gavlak, R., Horneck, D., & Miller, R. O. (2005). Soil, plant and water reference methods for the western region. In *Soil, plant and water reference methods for the Western region*. WREP 125. <https://www.naptprogram.org/files/napt/western-states-method-manual-2005.pdf>
- Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Censo agrícola, ganadero y forestal 2007*. <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Encuesta nacional agropecuaria 2019*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). *Censo agropecuario 2022. Resultados definitivos. Oaxaca*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdOA X.pdf
- Juárez, A., & Saragos, J. (2015). Estructura diamétrica de árboles en potreros de la región Bajo Mixe, Oaxaca. *Teoría y Praxis*, 11(18), 131–151.
<https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TYP18/05>
- López, W., Reynoso, R., López, J., Villar, B., Camas, R., & García, J. O. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 897–910.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>
- Martínez-Rodríguez, Ó. G., Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H. M., Bojórquez-Serrano, J. I., Cruz-Crespo, E., García-Paredes, J. D., & Madueño-Molina, A. (2021). Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana*, 39(1), Article e766.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.766>
- Muñoz-González, J. C., Huerta-Bravo, M., Lara, A., Rangel, R., & de la Rosa, J. L. (2016). Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(1), 3315–3327. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3315.pdf>
- Nuñez-Peñaloza, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Hernández-Acosta, E., & Villanueva-Morales, A. (2022). Efecto de tres sistemas de producción sobre el estado de la fertilidad física del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 55–81. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279>
- Oxfam México. (2021). *Captura económica y política en las cadenas de valor*.
https://oxfamMexico.org/wp-content/uploads/2021/10/Investigacion_Economias_inclusivas.pdf
- Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Martínez, G., Zavala-Cruz, J., & Lagunes-Espinoza, L. del C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(5), 163–172.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/era/v2n5/v2n5a4.pdf>
- R Core Team. (2024). *R version 4.3.3*. The R Foundation for Statistical Computing. <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/R-4.3.3-win.exe>
- Robarge, W. P., Edwards, A., & Johnson, B. (1983). Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14(12), 1207–1215.

<https://doi.org/10.1080/00103628309367444>

- Sárdi, K. (2017). Short-term transformation and dynamics of main nutrients in soil. In M. Naeem, A. Ansari, & S. Singh (Eds.), *Essential plant nutrients. Uptake, use efficiency, and management* (pp. 379–401). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4_16
- Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad de suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130–139. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1598>
- Secretaría de Bienestar. (2023). *Informe de resultados del seguimiento físico y operativo del programa de Sembrando Vida 2022*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/879817/InformeResultadosPSV2022op.pdf>
- Secretaría de Bienestar. (2024). *Sembrando vida. Consulta al padrón único de beneficiarios*. <https://pub.bienestar.gob.mx/v2/pub/programasIntegrales/16/1631>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/D02280n.pdf>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Shiffler, A. K., Jolley, V. D., Christopherson, J. E., Webb, B. L., Farrer, D. C., & Haby, V. A. (2005). Pressurized hot water and DTPA-sorbitol as viable alternatives for soil boron extraction. I. Boron-treated soil incubation and efficiency of extraction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(15–16), 2179–2187. <https://doi.org/10.1080/00103620500196457>
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1999). *Introducción a la bioestadística*. W. H. Freeman and Company.
- Valdez-Arjona, L., Ramírez-Mella, M., Díaz-Ramírez, M., Jiménez-Guzmán, J., García-Garibay, M., Miranda-de la Lama, G. C., Cruz-Monterrosa, R. G., & Ramírez-Bribiesca, E. (2019). Problemas productivos y reproductivos por deficiencias minerales en bovinos de algunas regiones tropicales de México. *Agroproductividad*, 12(12). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1505>

- Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Padilla-Cuevas, J. (2005). La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 39(3), 259–266. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239302.pdf>
- Villa-Alcántara, J., & Nuñez-Peñaloza, O. (2016). Agricultura de conservación en trópico húmedo. In N. Verhulst (Ed.), *Red de plataformas de investigación MasAgro. Resultados 2015* (pp. 14–17). CIMMYT.
- Zetina, R., Pastrana, L., Romero, J., & Jiménez, J. A. (2002). *Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

4 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL Y ACTUAL EN LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

4.1 Resumen

El reconocimiento temprano del problema de la erosión hídrica en regiones con alta precipitación e intensidad de lluvias, suelos susceptibles a la erosión y escasa cobertura vegetal debido al manejo intensivo del suelo, es fundamental para prevenir daños irreversibles. En el caso de la región Bajo Mixe, Oaxaca, donde el uso intensivo del suelo ha sustituido la vegetación natural por cultivos como el limón persa, maíz y pastizales, la erosión hídrica ha adquirido una magnitud alarmante. Este fenómeno se ve agravado por las altas precipitaciones anuales, superiores a los 2,000 mm, que intensifican el desgaste del suelo, afectando tanto la productividad agrícola como la estabilidad ecológica. En este contexto, se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para evaluar la erosión hídrica en los ejidos de General Felipe Ángeles, El Tortuguero y Los Fresnos, municipio de San Juan Mazatlán. Los resultados obtenidos mostraron que más de la mitad del área de estudio presentaba altas tasas de erosión, lo que evidencia la vulnerabilidad de la región ante este problema. La aplicación de la EUPS en un SIG permitió visualizar y cuantificar con precisión las zonas más afectadas, proporcionando una herramienta clave para la toma de decisiones en la gestión sostenible del suelo y la implementación de prácticas de conservación que mitiguen los efectos de la erosión.

Palabras clave: degradación del suelo, conservación del suelo, erosión terrestre, uso del suelo, manejo sostenible

4.2 Abstract

Early recognition of the problem of water erosion in regions with high rainfall and intensity, soils susceptible to erosion and scarce vegetation cover due to intensive soil management is essential to prevent irreversible damage. In the case of the Bajo Mixe region, Oaxaca, where intensive land use has replaced the natural vegetation with crops such as Persian lime, corn and grasslands, water erosion

has acquired an alarming magnitude. This phenomenon is aggravated by high annual rainfall, exceeding 2,000 mm, which intensifies soil wear, affecting both agricultural productivity and ecological stability. In this context, the Universal Soil Loss Equation (USLE) integrated into a Geographic Information System (GIS) was used to evaluate water erosion in the ejidos of General Felipe Ángeles, El Tortuguero and Los Fresnos, municipality of San Juan Mazatlán. The results obtained showed that more than half of the study area had high erosion rates, which shows the vulnerability of the region to this problem. The application of EUPS in a GIS allowed to visualize and quantify with precision the most affected areas, providing a key tool for decision-making in sustainable soil management and the implementation of conservation practices that mitigate the effects of erosion.

Keywords: soil degradation, soil conservation, land erosion, land use, sustainable management

4.3 Introducción

La erosión hídrica es un problema crítico en diversas regiones del mundo, y la región Bajo Mixe, en Oaxaca, no es la excepción (Panagos et al., 2017). Esta área se caracteriza por precipitaciones anuales superiores a los 2,000 mm (Juárez y Saragos, 2015), lo que contribuye significativamente a la pérdida de suelo. El uso intensivo de la tierra, con cultivos como limón persa, maíz y pastizales que reemplazan a la vegetación natural de selva alta perennifolia, genera una fuerte presión sobre el recurso suelo, favoreciendo la erosión (Oxfam México, 2021). Dada la falta de información detallada sobre este fenómeno en la región, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) resulta fundamental para estimar la magnitud de la pérdida de suelo, especialmente mediante modelos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), los cuales permiten una evaluación precisa en áreas aún no estudiadas (Alewell et al., 2019). El objetivo de esta investigación fue aplicar la EUPS en un SIG para identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la región Bajo Mixe, contribuyendo a la gestión sostenible del suelo en el área de estudio.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Área de estudio

El área de estudio, comprendida por los ejidos de General Felipe Ángeles, El Tortuguero y Los Fresnos, pertenece a la región del Bajo Mixe y se localiza en el municipio de San Juan Mazatlán, estado de Oaxaca, México (Figura 4.1). Dicha área está ubicada en la provincia Llanura Costera del Golfo Sur, subprovincia Llanura Costera Veracruzana y su topoforma dominante es lomerío. Su clima es cálido húmedo (Am), temperatura media anual entre 24 °C y 26 °C, precipitación media anual entre 2 000 mm y 2 500 mm y evapotranspiración anual de 1 200 mm. Su tipo de suelo predominante es Luvisol (Juárez & Saragos, 2015; Nuñez-Peñaloza *et al.*, 2022).

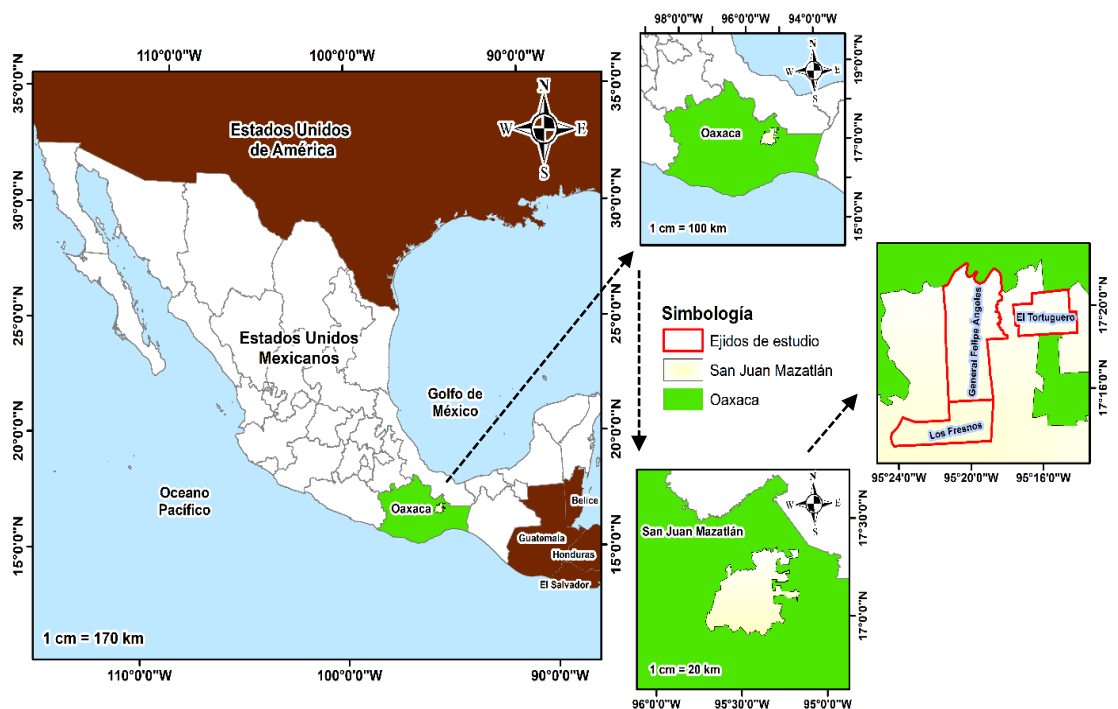


Figura 4.1 Localización del área de estudio.

Su vegetación dominante son pastizales introducidos principalmente del género *Brachiaria*, acahuals: vegetación secundaria nativa que surge de manera espontánea en terrenos que estuvieron bajo uso agrícola o pecuario (altura

menor a 2.5 m y diámetros de tallos menores a 10 cm), cultivo de maíz y relictos de selva perennifolia con especies arbóreas nativas tales como *Cordia alliodora* (solerilla), *Miconia argétea* (hoja de lata), *Rollinia menbranacea* (anonilla), *Zanthoxylum riedelianum* (tachuelillo), *Schizolobium parahyba* (picho), *Tabebuia rosea* (roble), *Croton draco* (sangregado) y *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste) (Juárez & Saragos, 2015).

4.4.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Los modelos de erosión del suelo ayudan a identificar áreas susceptibles a la erosión, estimar las tasas de erosión y discernir las posibles causas detrás de su ocurrencia, contribuyendo así a la gestión del suelo. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) utiliza una ecuación multiplicativa simple que incluye seis parámetros o factores: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y grado de la pendiente (LS), manejo y cobertura (C) y prácticas de conservación (P). De estos seis factores, solo el factor R tiene una unidad original, es decir $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que la unidad del factor K, $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ Mj}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, es simplemente la tasa de pérdida de suelo por unidad del factor R, y el resto son adimensionales.

4.4.2.1 Factor de erosividad de la lluvia R

El factor R (erosividad de la lluvia) de la EUPS, se define como la capacidad potencial de una lluvia para crear erosión en el suelo medida por medio de índices de erosividad (Colín-García et al., 2013), sin embargo, en México se tiene poca información que cubra al país sobre este aspecto. El factor R, por lo tanto, se obtuvo de Panagos et al. (2017) para la región de estudio, mediante un modelo ráster con unidades en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

4.4.2.2 Factor de erodabilidad del suelo K

El factor K (erodabilidad del suelo) de la EUPS, se define como la capacidad del suelo para resistir la erosión. Influenciada por las siguientes propiedades: materia orgánica, textura, estructura, porosidad, minerales secundarios y humedad del suelo (Wischmeier & Smith, 1978). Figueroa-Sandoval (1991) para determinar el

valor de K, propuso establecerlo con base en la unidad del suelo y su textura, de acuerdo con lo señalado por la FAO (1980). Por lo tanto, se empleó la información edafológica más reciente del INEGI (2024b): Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000, Serie II (Continuo Nacional E15-7: Minatitlán), de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés). Las características obtenidas al procesar esta información en un modelo ráster fueron: tipo de suelo y textura, con unidades de $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ Mj^{-1}\ mm^{-1}$ (Majhi et al., 2021; Montes-León et al., 2011).

4.4.2.3 Factor de longitud y grado de la pendiente LS

El factor L (longitud de la pendiente) y S (inclinación de la pendiente) de la EUPS, lo definieron Wischmeier y Smith (1978) como:

“La longitud de la pendiente (L) es la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde la inclinación de la pendiente (S) disminuye lo suficiente como para que comience la deposición”

Para calcular el factor L se utilizaron las siguientes Ecuaciones (1-4):

$$(1) L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$(2) \lambda = \frac{30}{\cos \theta}$$

$$(3) m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$(4) \beta = \frac{\left(\frac{\text{seno } \theta}{0.0896} \right)}{3(\text{seno } \theta)^{0.8} + 0.56}$$

donde, λ : es la longitud de la pendiente en m; m: relación entre condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos; θ : ángulo de la pendiente.

El valor de λ se obtuvo de acuerdo con información proporcionada por el INEGI (2024a): modelo ráster del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, Escala 1:50,000, CEM 3.0 (E15C32, E15C33, E15C42, E15C43), con una distancia entre píxeles de 30 m. El ángulo θ se obtuvo en ArcGIS Desktop 10.8.2 (ESRI, 2021) con el módulo *Spatial Analyst*, herramienta *Surface*, opción *slope*; se le pide la pendiente en grados, lo cual genera un ráster de pendiente en grados.

Para calcular el factor S se utilizaron las siguientes Ecuaciones (5-6):

$$(5) S = 10.8 \text{seno } \theta + 0.03, \text{ si } s < 9 \%$$

$$(6) S = 16.8 \text{seno } \theta - 0.50, \text{ si } s \geq 9 \%$$

4.4.2.4 Factor de manejo y cobertura C

El factor C (manejo y cobertura) de la EUPS, se define como la relación entre la pérdida de suelo de un terreno con cobertura y manejo específicos, con respecto a las pérdidas de suelo de un terreno desnudo y con barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo, pendiente y lluvia. Es uno de los factores más importantes porque representa la condición más fácilmente manejable para reducir la erosión (Wischmeier & Smith, 1978).

Se descargaron imágenes ráster ortorectificadas de reflectancia de superficie *Landsat 8 OLI* desde el portal *Earth Explorer* (USGS, 2022), las cuales, presentan una alta precisión posicional: a) Path/row = 023/048, b) fecha = 06 de abril 2022 y c) estación = seca.

Se utilizó el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), debido a su facilidad de aplicación y procesamiento. El NDVI es un indicador ampliamente utilizado para determinar el vigor de la vegetación verde mediante el cálculo de la diferencia de reflectancia espectral entre las bandas roja (RED) e infrarroja cercana (NIR) de la imagen satelital (Ecuación 7) y varía de -1 a +1, atribuyéndose los valores más altos a las áreas con mayor cobertura vegetal

(Almagro et al., 2019).

$$(7) NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right)$$

donde, NIR: es la reflectancia espectral de la superficie en la banda del infrarrojo cercano; RED: es la reflectancia espectral de la superficie en la banda roja.

Para calcular el factor C, Almagro et al. (2019) recomendaron utilizar la siguiente Ecuación (8), haciendo un reescalamiento del NDVI en condiciones climáticas tropicales, con precipitaciones más intensas:

$$(8) C = 0.1 \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right)$$

4.4.2.5 Factor por prácticas de conservación P

El factor P (prácticas de conservación) de la EUPS, se define como la relación entre la pérdida de suelo en un terreno con una práctica de conservación específica y la pérdida de suelo en un terreno bajo cultivo en sentido de la pendiente (Wischmeier & Smith, 1978).

Representa la eficacia de las medidas de control de la erosión (surcado en curvas a nivel, cultivo en franjas en curvas a nivel y terrazas en los cultivos son algunos ejemplos), con valores cercanos a cero que sugieren el éxito de una práctica particular de erosión del suelo. En el caso de la región de estudio, se consideró que no se realiza alguna de estas prácticas y, por lo tanto, este factor tomó el valor de $P = 1$.

4.4.3 Álgebra de mapas

El módulo de álgebra de mapas en ArcGIS Desktop 10.8.2 (ESRI, 2021), fue utilizado para crear un mapa ráster para cada uno de los parámetros o factores de la EUPS; una vez realizados, se multiplicaron entre ellos. Esto se hizo con el

módulo *Spatial Analyst* y la herramienta *raster calculator*.

4.5 Resultados

4.5.1 Factor R de la EUPS

El total de la superficie (10,137.94 ha) de estudio tiene una clase alta de erosividad (Cuadro 4.1). En la Figura 4.2 se puede observar cómo los valores mayores se presentan en la parte este del área de estudio y disminuyen hacia la parte oeste.

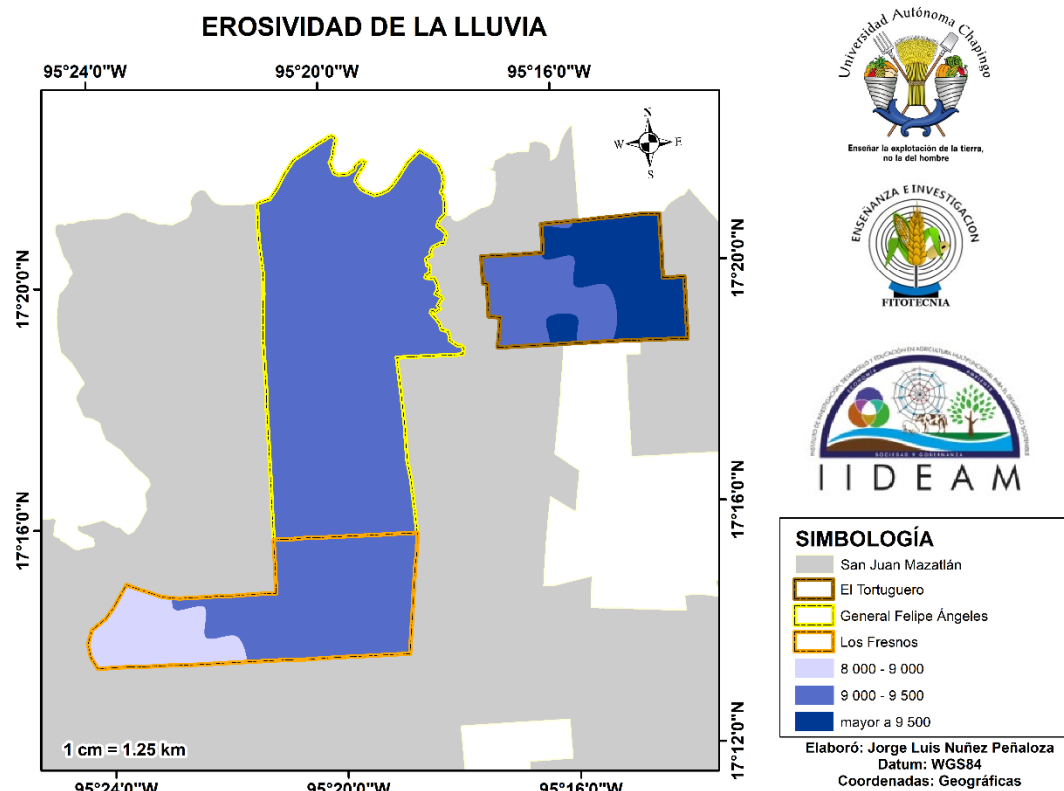


Figura 4.2. Distribución espacial del factor de erosividad de la lluvia.

Cuadro 4.1 Clases del factor erosividad de la lluvia (R) de la EUPS.

Erosividad (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹)	Clase
< 2,452	Baja
2,452 – 4,905	Media
4,905 – 7,357	Mod. alta
7,357 – 9,810	Alta
> 9,810	Muy alta

Fuente: Neves y Di Lollo (2022)

4.5.2 Factor K de la EUPS

Con base en la carta edafológica del INEGI (2024b) se encontró que en el área de estudio se tienen los tipos de suelos Luvisol con textura media (96 % del total de la superficie) y Fluvisol con textura gruesa (4 % del total de la superficie) como se aprecia en la Figura 4.3. Se tiene valores de K de 0.04 para el área que ocupa el suelo Luvisol y de 0.026 para el área que ocupa el suelo Fluvisol.

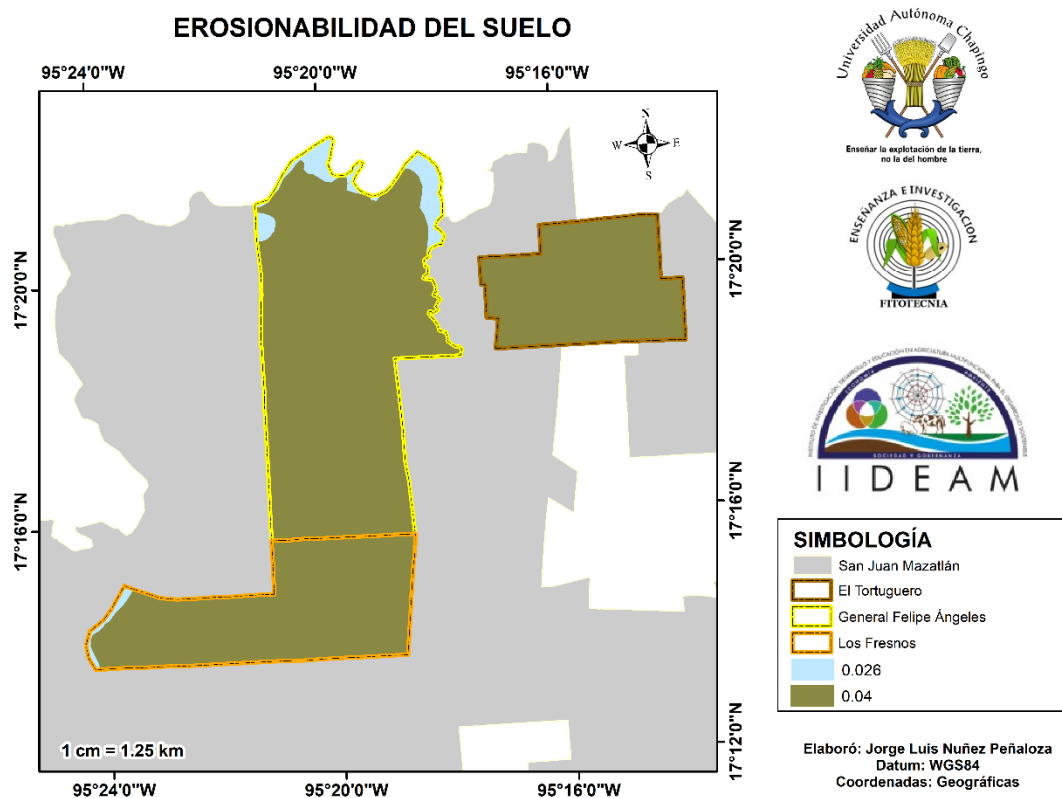


Figura 4.3 Distribución espacial del factor erodabilidad del suelo.

4.5.3 Factor LS de la EUPS

La Figura 4.4 muestra que los valores más bajos (áreas menos propensas a la erosión) se localizan hacia el norte del área de estudio. El factor LS de longitud y grado de la pendiente varía de 0.0 a más de 7.5. El 85.1 % de la superficie total presenta valores considerados de bajos a muy bajos (Cuadro 4.2). El 14.9 % de la superficie total presenta valores considerados de moderados a altos (Cuadro

4.2).

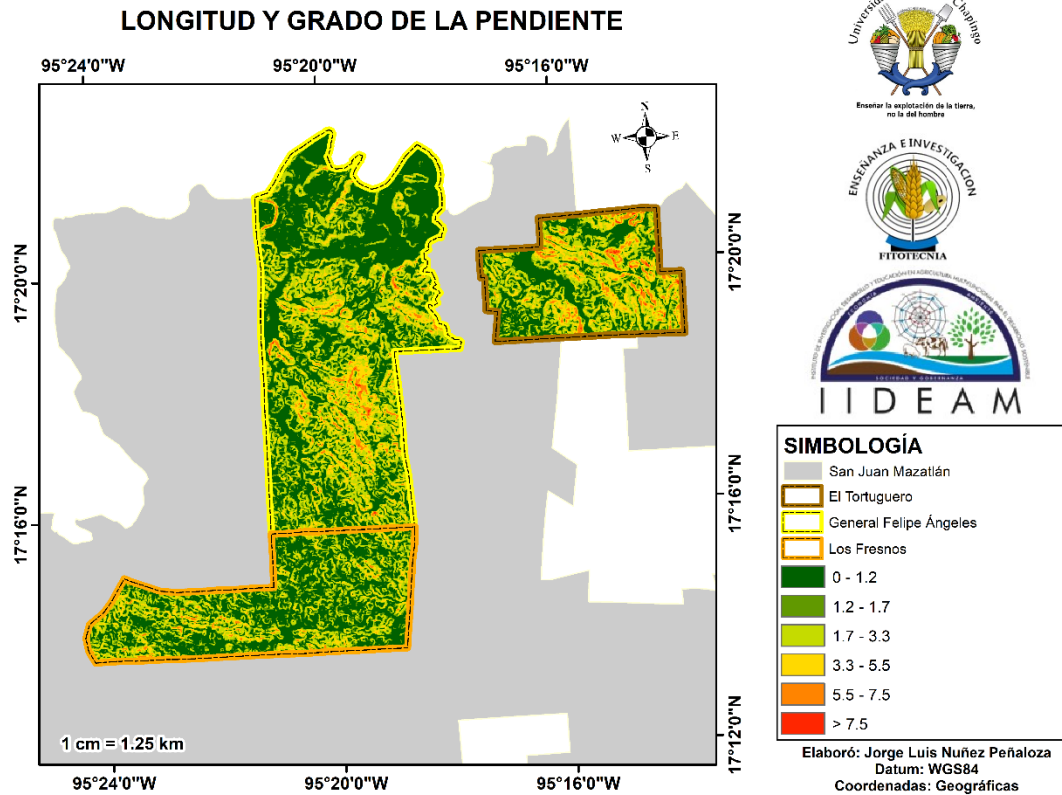


Figura 4.4 Distribución espacial del factor longitud y grado de la pendiente.

Cuadro 4.2 Clases del factor longitud y grado de la pendiente (LS) de la EUPS.

LS	Clase
0 – 1.2	Muy baja
1.2 – 1.7	Moderadamente baja
1.7 – 3.3	Baja
3.3 – 5.5	Moderada
5.5 – 7.5	Moderadamente alta
7.5 – 20.0	Alta

Fuente: Matheus et al. (2020)

4.5.4 Erosión potencial

Los factores naturales del ambiente R, K y LS de la EUPS, son los que determinan la tasa de erosión potencial. El 54.2 % de la superficie total concentra las clases débil y moderada, mientras que el 45.8 % de la superficie total concentra las clases media a muy fuerte.

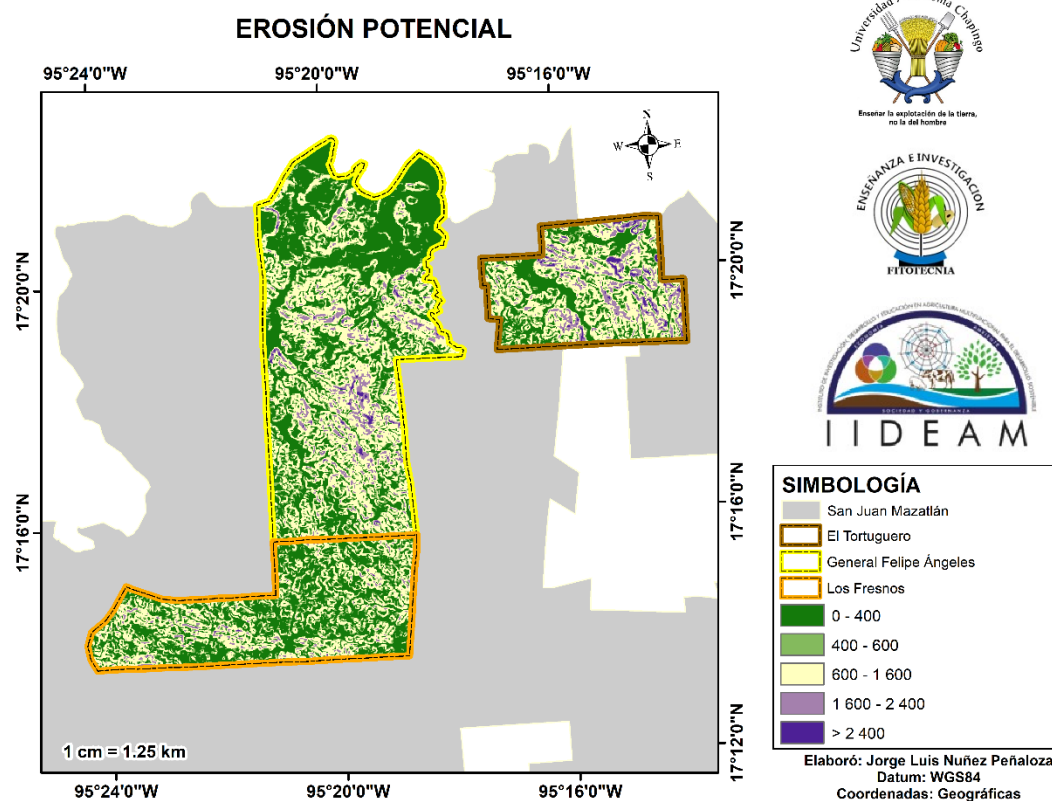


Figura 4.5 Distribución espacial de la erosión potencial hídrica.

Cuadro 4.3. Categorías de pérdida de suelo por erosión potencial hídrica.

Pérdida de suelo en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$	Clase
0 - 400	Débil
400 – 600	Moderada
600 – 1,600	Media
1,600 – 2,400	Fuerte
> 2,400	Muy fuerte

Fuente: Alves et al. (2022)

4.5.5 Factor C de la EUPS

En la Figura 4.6 se muestra la distribución espacial del factor manejo y cobertura, que va de 0.022 hasta 0.045; el máximo corresponde a las zonas más propensas a la erosión hídrica. En recorridos de campo se pudo apreciar que, como se aprecia en la Figura 4.4, las zonas con mayores valores del factor C son las de menor longitud y grado de la pendiente; aquí están establecidos sistemas de producción convencionales tales como: limón persa, maíz y pastizal, que en gran

parte del año mantienen el suelo libre de vegetación (por el control de arvenses o por sobrepastoreo) y aparentemente, susceptibles a erosionarse.

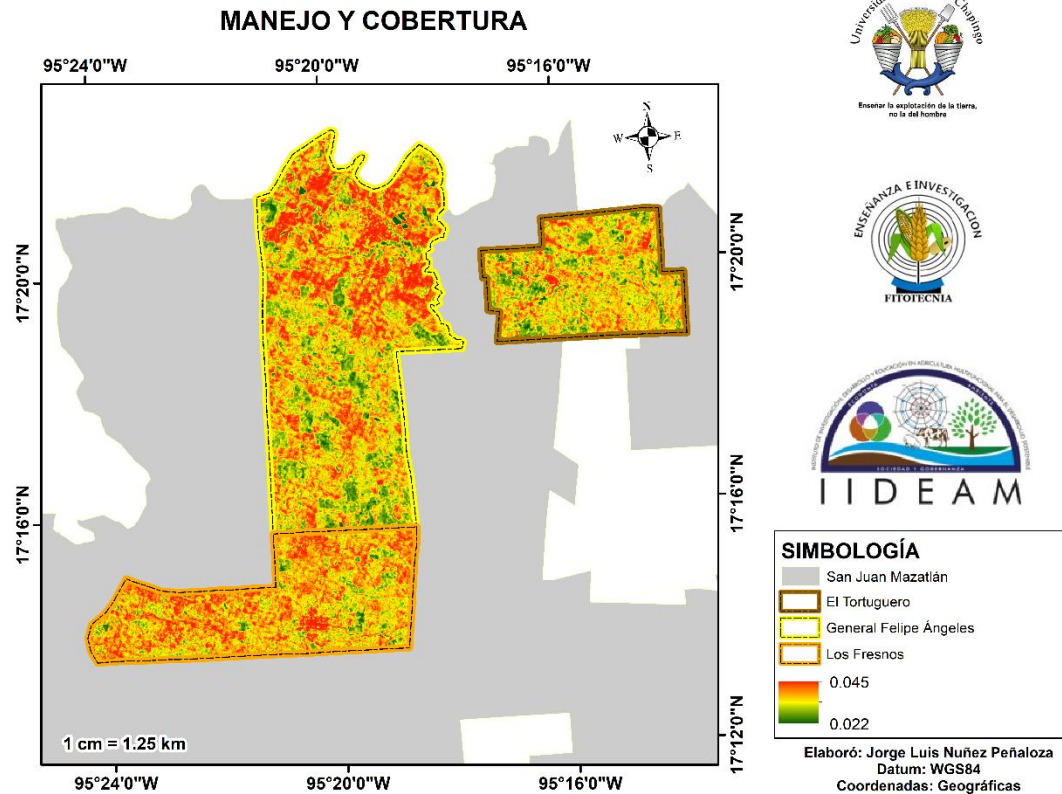


Figura 4.6 Distribución espacial del factor manejo y cobertura

4.5.6 Erosión actual

Para la obtención de la erosión actual, se multiplicaron todos los factores de la EUPS. La Figura 4.7 muestra que cerca del 54.3 % de la superficie total presenta valores altos y muy altos de erosión actual (15 a $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

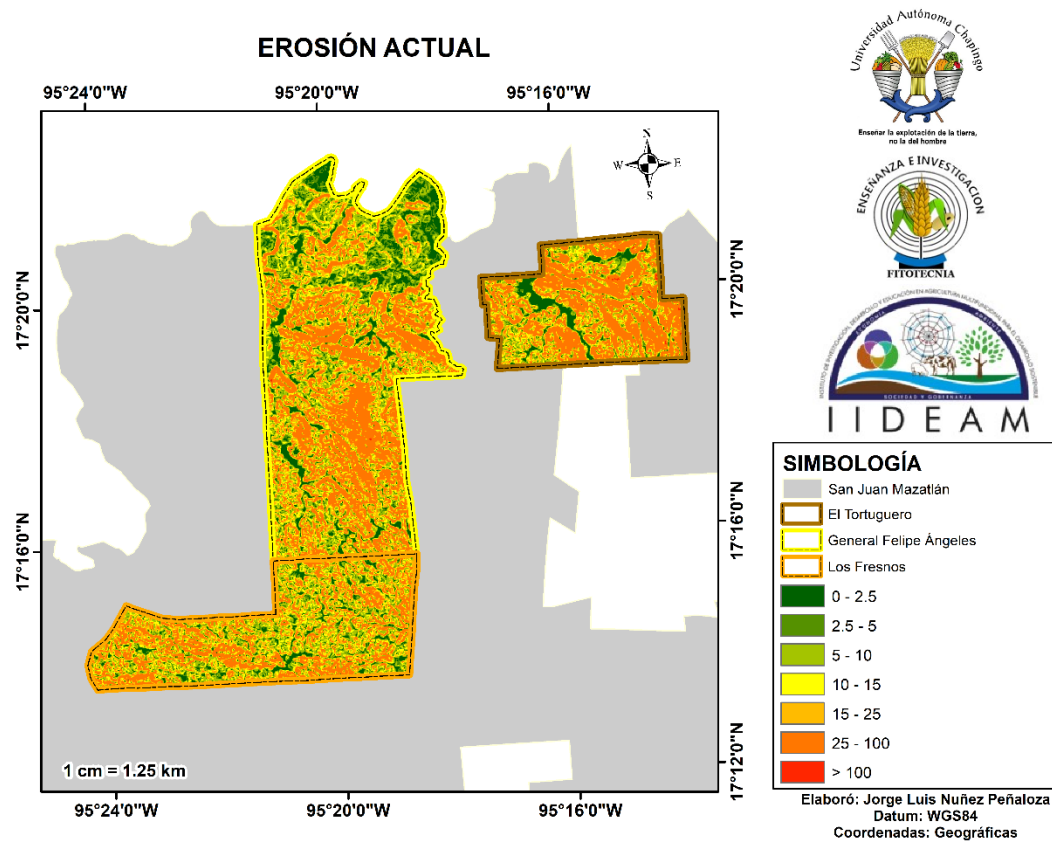


Figura 4.7 Distribución espacial de la erosión actual hídrica.

Cuadro 4.4 Categorías de pérdida de suelo por erosión actual hídrica.

Pérdida de suelo en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$	Clase
0 – 2.5	Ligera
2.5 – 5.0	Moderadamente ligera
5.0 – 10.0	Moderada
10.0 – 15.0	Moderadamente alta
15.0 – 25.0	Alta
25.0 – 100.0	Muy alta
> 100.0	Extremadamente alta

Fuente: Alves et al. (2022)

4.6 Discusión

Una alta erosividad (factor R) se relaciona con una alta proporción de lluvias, dada su mayor cantidad y concentración, alta intensidad y energía cinética que rompe los agregados superficiales del suelo en partículas de tamaño transportable (Colotti, 1999). Por otro lado, los suelos Luvisol, que cubren gran parte de la superficie del área de estudio, son suelos que por su naturaleza tienen

una alta susceptibilidad a la erosión hídrica (INEGI, 2004), por esta razón, presentan el valor más alto para el factor K. Los valores de longitud y pendiente son bajos en gran parte del área de estudio, permitiendo que se desarrollen actividades agropecuarias de manera intensiva, fomentando la degradación de los suelos, deforestación, pérdida de biodiversidad, así como patrones de menor precipitación y alzan en las temperaturas (Oxfam México, 2021). Cerca de la mitad del área de estudio presenta condiciones naturales para que ocurra una alta erosión hídrica (erosión potencial).

El factor C depende de la etapa particular de la vegetación y del desarrollo de la cobertura vegetal en el momento en que se produce el evento de lluvia, pero también de las condiciones previas de uso del suelo (Alewell et al., 2019). La integración del factor C con los demás factores de la EUPS, evidencia la alta erosión actual hídrica del suelo que ocurre en esta región, debido a una escasa vegetación y a problemas por monocultivos y sobrepastoreo existente (Oxfam México, 2021).

4.7 Conclusiones

En conclusión, la integración de los factores de la EUPS en un Sistema de Información Geográfica (SIG), permitió identificar de manera precisa tasas altas de pérdida de suelo en la región Bajo Mixe. La combinación de una intensa precipitación, baja cobertura, alta susceptibilidad a la erosión de los suelos y falta de prácticas de conservación en estos, agravan su deterioro. Estos hallazgos subrayan la urgencia de implementar estrategias de manejo sostenible para mitigar la erosión y proteger los recursos naturales en esta región.

4.8 Literatura citada

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203–225.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>

Almagro, A., Thomé, T. C., Colman, C. B., Pereira, R. B., Marcato Junior, J.,

- Rodrigues, D. B. B., & Oliveira, P. T. S. (2019). Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(4), 325–334.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.005>
- Alves, W. dos S., Martins, A. P., Morais, W. A., Pôssa, É. M., Castro, R. M., & Borges de Moura, D. M. (2022). USLE modelling of soil loss in a Brazilian cerrado catchment. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100788. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100788>
- Colín-García, G., Ibáñez-Castillo, L. A., Reyes-Sánchez, J., & Arteaga-Ramírez, R. (2013). Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del río Pichucalco. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 5(1), 23–31.
<https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2013.04.002>
- Colotti, E. (1999). La erosividad: cualidad de la lluvia poco conocida. *Terra Nueva Etapa*, 15(24), 99–116.
- ESRI. (2021). *ArcGIS Desktop 10.8.2*. Redlands, CA. USA.
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO.
- Figueroa-Sandoval, B. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Postgraduados.
- INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía. Edafología*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2024a). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0*. Consultada en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2024b). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Minatitlán. 2007*. Consultada en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Matheus, F. D., Angelo, E. S., & Jean, S. dos S. (2020). Effects of DEM resolution on the RUSLE-LS factor and its implications on soil and water management policies through the land cover seasonality. *African Journal of Agricultural Research*, 16(12), 1755–1765. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15002>
- Neves, M., & Di Lollo, J. A. (2022). Rainfall erosivity in the municipality of São Pedro-SP: Analysis between 1960-2020. *Sociedade & Natureza*, 34(1), e64608. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64608>
- Oxfam México. (2021). *Captura económica y política en las cadenas de valor*.

https://oxfammexico.org/wp-content/uploads/2021/10/Investigacion_Economias_inclusivas.pdf

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7(1), 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>

USGS. (2022). *Earth Explorer*. Consultada en: <https://earthexplorer.usgs.gov>

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. (Agriculture Handbook No. 537). Department of Agriculture.

5 CONCLUSIONES GENERALES

Se logró explicar la calidad del suelo en la región de estudio mediante el análisis detallado de indicadores físicos, químicos y biológicos, comparando sistemas de producción convencionales con aquellos promovidos por el Programa Sembrando Vida (PSV). Los resultados mostraron diferencias significativas en la fertilidad y en la calidad del suelo. La fertilidad inicial del suelo fue baja en el área de estudio, debido a prácticas agrícolas intensivas que afectan negativamente a los parámetros de fertilidad del suelo. Los sistemas promovidos por el programa mostraron una tendencia a mejorar ciertos aspectos de la calidad del suelo, aunque de manera variable dependiendo de la implementación específica. El índice de calidad de suelo encontrado para cada uno de los sistemas de producción alcanzó niveles moderados, lo que asegura condiciones adecuadas del suelo para cumplir la función de soporte de plantas. La estimación de la erosión potencial y actual, mediante la integración de factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, y la longitud y grado de la pendiente, permitió identificar zonas de alto riesgo de pérdida de suelo. Esta evaluación inicial de la erosión potencial fue complementada con la estimación de la erosión actual, donde se incluyó además el factor manejo y cobertura, fundamental ya que incide directamente en la protección del suelo. A pesar de que la calidad del suelo no se correlacionó con las tasas de erosión estimadas, las altas tasas de erosión en la región sugieren una influencia importante en el deterioro de los suelos, especialmente en áreas donde la cobertura vegetal es insuficiente o se encuentran en manejo intensivo. En resumen, las altas tasas de erosión reportadas son un factor crucial que influye negativamente, lo que resalta la necesidad urgente de implementar prácticas de manejo adecuadas para mitigar estos efectos y restaurar la calidad del suelo en la región.

**CALIDAD DEL SUELO Y EROSIÓN HÍDRICA EN SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN DE LA REGIÓN BAJO MIXE, OAXACA**

JORGE LUIS NUÑEZ PEÑALOZA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

2024