

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN SUELOS

*MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE*

**ESTADO FISICOQUÍMICO Y PÉRDIDA DE SUELO EN
SISTEMAS AGROFORESTALES DE LA MICROCUENCA
DOS PUENTES, HUATUSCO.**

TESIS

QUE COMO PARA OBTENER EL REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**



PRESENTA

ANA KAREN HERNÁNDEZ JUAN

Dr. David Cristóbal Acevedo



Chapingo, Texcoco, Edo. de México, mayo de 2026

**ESTADO FISICOQUÍMICO Y PÉRDIDA DE SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE LA MICROCUENCA DOS PUENTES, HUATUSCO.**

Tesis realizada por **ANA KAREN HERNÁNDEZ JUAN** bajo la supervisión del
Comité Asesor Indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

ASESOR:



M.C JUAN ANGEL TINOCO RUEDA

ASESOR:



DR. JULIO CESAR BUENDIA ESPINOZA

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE APÉNDICES	viii
ABREVIATURAS	ix
DEDICATORIA	xi
AGRADECIMIENTOS	xii
DATOS BIOGRÁFICOS	xiv
RESUMEN GENERAL	xv
GENERAL ABSTRACT	xvi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Estructura de la tesis	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Sistemas agroforestales	5
2.2. Sistema silvopastoril	5
2.3. Bosque Mesófilo de Montaña	6
2.4. Pastizal	6
2.5. Sistemas agrícolas modernos	7
2.6. Degradación del suelo	7
2.7. Calidad del suelo	7
2.8. Indicadores de calidad del suelo	7

2.9.	Indicadores físicos de calidad del suelo	8
2.10.	Indicadores químicos de calidad del suelo.....	8
2.11.	Indicadores biológicos de calidad del suelo	9
2.12.	Erosión hídrica del suelo	9
2.13.	El proceso de la erosión hídrica	9
2.14.	Factores que inciden en la erosión hídrica del suelo.	10
2.14.1.	Topografía	11
2.14.2.	El suelo	11
2.14.3.	Clima.....	11
2.14.4.	Cobertura vegetal	12
2.15.	Sistemas de información geográfica (SIG).....	12
2.16.	Literatura citada	13

3. ESTADO DE LOS ELEMENTOS FISICOQUÍMICOS DEL SUELO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES, UN SISTEMA NATURAL Y UN PASTIZAL DE LA MICROCUENCA DOS PUENTES..... 17

3.1.	Resumen	17
3.2.	Abstract	18
3.3.	Introducción	19
3.4.	Materiales y métodos.....	21
3.4.1.	Área de estudio.....	21
3.4.2.	Caracterización de la zona de estudio	22
3.4.3.	Descripción de los sistemas	24
3.4.4.	Diseño de muestreo de suelos	28
3.4.5.	Determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo.	29
3.4.6.	Análisis Estadístico	31
3.5.	Resultados y discusión	31
3.6.	Conclusiones	54
3.7.	Literatura citada	56

4. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DOS PUENTES MEDIANTE LA ECUACIÓN USLE Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	63
4.1. Resumen	63
4.2. Abstract	64
4.3. Introducción	65
4.4. Materiales y métodos.....	66
4.4.1. Área de estudio.....	66
4.4.2. Cuantificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica.....	67
4.4.3. Factor de erosividad de la lluvia R.....	68
4.4.4. Factor de erodabilidad del suelo K	69
4.4.5. Factor longitud e inclinación de la pendiente LS.....	71
4.4.6. Factor de cobertura vegetal C	71
4.4.7. Factor de prácticas de conservación P	74
4.5. Resultados y discusión	75
4.5.1. Factor R.....	75
4.5.2. Factor K	77
4.5.3. Factor LS	79
4.5.4. Factor C.....	81
4.5.5. Erosión Hídrica de la Microcuenca Dos Puentes	82
4.6. Conclusiones	85
4.7. Literatura citada	86

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Determinación de las propiedades físicas.....	29
Cuadro 2. Determinación de las propiedades químicas.....	30
Cuadro 3. ANOVA de las propiedades físicas del suelo.....	31
Cuadro 4. ANOVA de las propiedades químicas del suelo.....	32
Cuadro 5. Prueba de comparación de medias de Tukey de las propiedades físicas del suelo.	33
Cuadro 6. Prueba de comparación de medias de Tukey de las propiedades químicas del suelo.	40
Cuadro 7. Ecuaciones regionalizadas del factor R para la República Mexicana.	69
Cuadro 8. Factor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB.	70
Cuadro 9. Valores del factor C con base en los usos de suelo y tipos de vegetación.	72
Cuadro 10. Categorías de erosión hídrica.....	75
Cuadro 11. Clasificación de la erosión de acuerdo a los rangos de tasas de erosión para suelos tropicales.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de la microcuenca Dos puentes de Huatusco, Veracruz.....	21
Figura 2. Climas de Huatusco, Veracruz.....	22
Figura 3. Mapa de uso de suelo y vegetación de Huarusco, Veracruz	24
Figura 4. Sistema agroforestal especializado.	25
Figura 5. Sistema agroforestal de café bajo sombra.....	25
Figura 6. Sistema silvopastoril (Huizache).....	26
Figura 7. Sistema silvopastoril	26
Figura 8. Bosque Mesófilo de Montaña.	27
Figura 9. Pastizal	28
Figura 10. Mapa de localización de la Microcuenca Dos puentes	67
Figura 11. Factor R, microcuenca Dos Puentes.....	77
Figura 12. Factor K, microcuenca Dos Puentes.....	79
Figura 13. Factor LS, microcuenca Dos Puentes.....	80
Figura 14. Factor C, microcuenca Dos Puentes.	82
Figura 15. Erosión hídrica, microcuenca Dos Puentes.	83

LITSA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Climas de Huatusco, Veracruz	89
Apéndice 2. Usos de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz.....	91

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
B	Boro
BMM	Bosque Mesófilo de Montaña
Ca	Calcio
CC	Capacidad de Campo
CE	Conductividad Eléctrica
CH	Conductividad Hidráulica
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
Cu	Cobre
DA	Densidad Aparente
EA	Estabilidad de Agregados
Fe	Hierro
K	Potasio
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
MO	Materia Orgánica
NH ₄ ⁺	Amonio

Abreviatura	Significado
Nmin	Nitrógeno Mineral
NO	Nitrógeno Orgánico
NO ₃ ⁻	Nitratos
NT	Nitrógeno Total
P	Fósforo Asimilable
PAS	Pastizal
pH	Potencial de Hidrógeno
PMP	Punto de Marchitez Permanente
PT	Porosidad Total
SAF	Sistema Agroforestal
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SO ₄	Sulfatos
SSP	Sistema Silvopastoril
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
Zn	Zinc

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón esta tesis a mi familia, especialmente a mi papá Roberto Soto Sánchez que, aunque ya no está físicamente sé que en donde quiera que este, le hubiera gustado verme terminar mis estudios de Posgrado y estar muy orgulloso de mi, gracias por su amor, sacrificios, esfuerzo y paciencia que me acompañaron siempre hasta el final.

A mi mamá, Enriqueta Hernández Juan, gracias por siempre apoyarme, que a pesar de la distancia siempre estuviste a una llamada de distancia para brindarme palabras de apoyo y animarme a seguir adelante, ante todo, por su amor, sus sacrificios, tu apoyo incondicional y paciencia le dedico mi trabajo.

A mi hermanita, Lisset Reyes Hernández, por ser una de las personas más importantes de mi vida, gracias por su amor, apoyo incondicional, y por acompañarme en estos dos años de Maestría. En los momentos difíciles y en cada logro siempre estuvo conmigo y esta tesis también es suya, porque de una u otra manera fue parte del esfuerzo, desvelos y aprendizaje, gracias por creer en mí y por ser una inspiración para mí y enseñarme a nunca rendirme.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la **SECIHTI** (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e innovación) por el apoyo financiero brindado en esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, a través de la **Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible** por abrirme sus puertas y el espacio para realizar mis estudios de Posgrado.

Un agradecimiento especial al Dr. David Cristóbal Acevedo, quien desde el principio estuvo a disposición de brindarme su apoyo como director de tesis. Gracias por la supervisión, la paciencia, los conocimientos compartidos y la orientación brindada durante el desarrollo de esta investigación, su compromiso, dedicación y confianza que fueron fundamentales para la culminación de este trabajo académico.

Al M.C Juan Angel Tinoco Rueda, de igual manera un agradecimiento especial, por el apoyo brindado desde incluso antes de ingresar a la Maestría. Gracias por el apoyo brindado en campo y su dirección durante el trabajo de investigación, sin duda ha sido un gran apoyo y sin su ayuda no lo hubiera logrado.

Al Dr. Julio Cesar Buendía Espinoza por su apoyo como asesor de tesis y coordinador de Posgrado, gracias por todas sus palabras y motivación cuando las cosas se ponían difíciles.

A María Dolores Coronel Sánchez, secretaria del departamento, por el gran apoyo brindado desde el ingreso a la maestría, le expreso mi más sincero agradecimiento por su amabilidad, atención y disposición para ayudarme tanto a

mi como a mis compañeras. De igual modo agradezco a Karla Melissa Rodríguez León por el apoyo brindado en cada trámite y situación que se presentó durante este proceso; sin duda su ayuda fue fundamental para el buen desarrollo de nuestra estancia en la maestría.

A mis compañeras Lisset Reyes Hernández, Ana Laura Cornelio Rodríguez, Nandi Espino Espinosa, Krystal Yedid Álvarez Quiñones, Belem Rosales Cortes, gracias su gran apoyo y compañía en este trayecto, gracias por compartir conmigo esta etapa llena de aprendizaje, retos y experiencias inolvidables. Su apoyo, amistad y compañía hicieron que el camino fuese más llevadero y especial. Sin duda cada una de ustedes dejó huella importante en esta experiencia académica y me llevo algo especial de cada una de ustedes.

Un agradecimiento especial a mis amigos Jesús, Regina y Liliana. Gracias por motivarme a lo largo de la recta final de esta etapa, aunque no formaron parte de mi maestría, su amistad, apoyo y compañía hicieron este camino más ligero y significativo. Sin duda fueron fundamentales para seguir adelante en los momentos difíciles y no desistir en llegar a la recta final.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Ana Karen Hernández Juan

Fecha de nacimiento: 16 de diciembre de 1998

Lugar de nacimiento: Martínez de la Torre,
Veracruz

CURP: HEJA981216MVZ007

Profesión: Ingeniera Ambiental

Cédula profesional: 14059448



Desarrollo académico

Bachillerato (2013-2016)	Preparatoria, Telebachillerato Villa Independencia, Martínez de la Torre, Veracruz
Licenciatura (2016-2020)	Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz
Maestría (2024-2026)	Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo México

RESUMEN GENERAL

Estado fisicoquímico y pérdida de suelo en sistemas agroforestales de la microcuenca Dos Puentes, Huatusco, Veracruz¹

En México, el principal factor de degradación del suelo es la erosión hídrica, principalmente en zonas montañosas, de pendientes irregulares y escarpadas, las afectaciones más evidentes involucran alteraciones en sus componentes y propiedades, reflejados en la pérdida de estructura y agregación, disminución en su capacidad de infiltrar agua, acidificación, acumulación de sales, incremento de la toxicidad y menos disponibilidad de nutrientes. El objetivo principal fue evaluar el estado fisicoquímico y pérdida de suelo por erosión hídrica en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes, mediante el uso de indicadores físicos y químicos, así como el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Para ello, se tomaron muestras de suelo en parcelas de 25 x 25 m (submuestras aleatorias). Los análisis se realizaron bajo la NOM-021-RECNAT-2000 y se realizó un ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Del mismo modo, se evaluó la erosión hídrica mediante la integración de los factores R, K, LS, C y P de la ecuación USLE, utilizando el programa QGIS. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los sistemas evaluados en la mayoría de las propiedades analizadas, excepto en arenas, limos y conductividad hidráulica, evidenciando el efecto del tipo de cobertura vegetal sobre las propiedades del suelo. La densidad aparente (DA) osciló de 0.77 a 1.09 gr.cm⁻³. La capacidad de campo (CC) osciló de 41.51 a 70.54 %, el pH de 5.37 a 6.06, la materia orgánica (MO) mostró valores de 8.62 a 11.30 %, la concentración de fósforo (P) mostró valores de 1.48 a 18.07 mg kg⁻¹ y el potasio (K) osciló entre 75.85 y 531.36 mg kg⁻¹. El mapa de erosión hídrica mostró que el 53.47 % de la superficie presenta erosión crítica (>200 t ha⁻¹ año⁻¹) mientras que el 5.87 % corresponde a niveles muy bajos, evidenciando la importancia de los sistemas agroforestales en la conservación del suelo y la reducción de la erosión hídrica.

Palabras clave: Pastizal, propiedades físicas, propiedades químicas, sistema silvopastoril, erosión hídrica, SIG.

¹ Tesis de maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Ana Karen Hernández Juan

Director de tesis: David Cristóbal Acevedo

GENERAL ABSTRACT

Physicochemical Status and Soil Loss in Agroforestry systems of the Dos Puentes micro-watershed²

In Mexico, the main cause of soil degradation is water erosion, particularly in mountainous areas with uneven and steep slopes. The most evident effects include changes in the soil's components and properties, manifested in the loss of structure and aggregation, a decrease in water infiltration capacity, acidification, Salt accumulation, increased toxicity, and reduced nutrient availability. The main objective was to assess the physicochemical status and soil loss due to water erosion in two agroforestry systems a natural system and a grassland in the Dos Puentes micro-watershed, using of physical and chemical indicators, as well as the universal soil loss equation in conjunction with geographic information systems (GIS). To this end, soil samples were collected from 25 x 25 m plots (random subsamples). Analyses were conducted in accordance with NOM-021-RECNAT-2000, and an ANOVA and Tukey's test were performed Tukey ($\alpha = 0.05$). Similarly, water erosion was evaluated by integrating the R, K, LS, C, and P factors of the USLE equation using the QGIS program. The results showed significant differences among the systems evaluated for most of the properties analyzed, except for sand content, silt content, and hydraulic conductivity. The bulk density ranged from 0.77 to 1.09 g.cm⁻³. The field capacity ranged from 41.51 to 70.54 %, pH values ranged from 5.37 to 6.06, organic matter (OM) ranged from 8.62 to 11.30 %, phosphorus (P) content ranged from 1.48 to 18.07 mg kg⁻¹, and potassium (K) ranged from 75.85 to 531.36 mg kg⁻¹. The water erosion map showed that 53.47% of the area exhibits critical erosion (>200 t ha⁻¹ year⁻¹), while 5.87 % corresponds to very low erosion levels. Highlighting the importance of agroforestry systems in soil conservation and reduction of water erosion.

Keywords: grassland, mesophilic mountain forest, physical properties, chemical properties, silvopastoral system, water erosion, GIS.

² Master's Thesis in Science. Master of Science Program in Agroforestry for Sustainable Development. Universidad Autónoma de Chapingo, Mexico.

Author: Ana Karen Hernández Juan

Thesis Advisor: David Cristóbal Acevedo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El suelo es considerado un recurso vital del entorno natural, es un sistema dinámico multifuncional que emerge de interacciones bióticas y abióticas, desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas (Robles et al., 2025). Es un recurso base para el abastecimiento de los alimentos a nivel mundial, pues se estima que el 95 % proviene del suelo. Además, es soporte principal de las actividades humanas, además de que enfrenta múltiples presiones derivadas de diversas actividades antropogénicas, entre ellas la urbanización, el uso excesivo de productos químicos orgánicos e inorgánicos dentro de las actividades agrícolas, la deforestación, incendios, labranza convencional (intensiva), uso de maquinaria pesada y sobrepastoreo, lo cual ha provocado degradación de los suelos (Luna Robles et al., 2022).

En México, se ha reportado que 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). Entre los principales problemas más importantes que afectan a estos suelos 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). Esto se da principalmente en las partes altas, donde el principal factor de degradación del suelo es la erosión hídrica. Este daño causado por la erosión en zonas montañosas, de pendientes irregulares y escarpadas se hace cada vez más notable, debido a que cada vez los fenómenos climáticos son más irregulares e intensos, por lo que el suelo agrícola se va dañando poco a poco y va perdiendo su capacidad productiva, generando problemas económicos, sociales y ecológicos (Portuguez M., 2015a).

Las afectaciones más evidentes involucran alteraciones en sus componentes y propiedades, reflejadas en la pérdida de estructura y agregación, disminución en su capacidad de infiltrar agua, acidificación, acumulación de sales, incremento de

la toxicidad, menos disponibilidad de nutrientes, así como la pérdida de biota y necromasa edáfica (Bonfante et al., 2019).

Es por ello que, se debe mantener el estado físico del suelo, las concentraciones de nutrientes y la condición biológica de los suelos. Esto es indispensable para mantener la calidad del suelo, que es la capacidad que tiene un suelo para desarrollar sus funciones en el ecosistema, lo cual depende del conjunto de las propiedades físicas, químicas y biológicas que también son utilizadas como indicadores de la calidad del suelo (Acevedo et al., 2021). Por otro lado, es igual de importante y necesario estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica ya que en gran parte una reducción de la erosión contribuye a mantener la productividad de los suelos, lo cual garantiza la sostenibilidad de este vital recurso (Echavarría-Cháirez et al., 2020).

Por lo anterior, el objetivo principal evaluar el estado de las propiedades fisicoquímicas y pérdida de suelo por erosión hídrica en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes, mediante el uso de indicadores físicos, químicos y biológicos, así como el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) utilizando sistemas de información geográfica (SIG), para contribuir al conocimiento de los beneficios de la agroforestería.

1.2. Hipótesis

1.- Los sistemas agroforestales de la microcuenca presentan un mejor estado de las propiedades físicas y químicas esenciales del suelo que el pastizal, reflejado por los valores de los indicadores físicos y químicos que permiten inferir el estado funcional del recurso edáfico.

2. La pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca Dos Puentes varía significativamente según el tipo de uso y cobertura vegetal, siendo menor en las zonas con mayor cobertura vegetal, y en las áreas con menor pendiente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el estado de las propiedades fisicoquímicas y pérdida de suelo por erosión hídrica en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes, mediante el uso de indicadores físicos, químicos y biológicos, así como el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) utilizando sistemas de información geográfica (SIG), para contribuir al conocimiento de los beneficios de la agroforestería.

1.3.2. Objetivos específicos

1.- Determinar el estado de las propiedades físicas y químicas esenciales del suelo en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes para identificar el estado funcional del recurso edáfico.

2.- Cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en función del tipo de uso y cobertura vegetal.

1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis está estructurada en cuatro capítulos. El capítulo uno, titulado “Introducción general”, presenta la introducción, hipótesis y objetivos planteados en el proyecto de investigación.

El capítulo dos corresponde al Marco teórico, el cual proporciona conceptos e información necesaria para la comprensión y sustento del trabajo realizado.

Por su parte los capítulos tres y cuatro, corresponden a los artículos científicos derivados del proyecto de investigación y que responden al cumplimiento de los objetivos específicos planteados. El capítulo tres titulado “Estados de los elementos fisicoquímicos del suelo en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes”, da respuesta al primer objetivo. Mientras que capítulo cuatro “Estimación de la erosión hídrica en la microcuenca Dos Puentes, mediante la ecuación USLE y Sistemas de Información Geográfica” aborda el segundo objetivo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) son sistemas complejos de uso de la tierra, integran cultivos agrícolas con árboles frutales o maderables en una misma unidad espacial y temporal, esta asociación debe generar interacciones beneficiosas entre los componentes del sistema, de modo que tanto la producción como la sostenibilidad ambiental y económica se vean favorables en beneficio directo del ser humano (Alfonso et al., 2013). Los SAF ofrecen múltiples beneficios ecosistémicos, las especies leñosas tienen como propósito principal, mantener o mejorar la productividad del sistema mediante la protección de los cultivos del intenso calor y las lluvias, disminuyen la evapotranspiración y aumentan el ciclaje de nutrientes (Workman et al., 2002). Por otro lado, proporcionan otros beneficios que contribuyen a la conservación de las propiedades del suelo, donde las especies de árboles pueden mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas (Clemente-Arenas, 2021). De manera química, los árboles proporcionan materia orgánica a los suelos en forma de hojarasca, favoreciendo el reciclaje de nutrientes (Petit-Aldana et al., 2012). Biológicamente, los suelos de los sistemas agroforestales conservan la diversidad de microorganismos y aseguran la fertilidad mediante la capacidad y velocidad de descomposición de la materia orgánica en los ciclos de nitrógeno y carbono (Clemente-Arenas, 2021).

2.2. Sistema silvopastoril

Los SSP (sistemas silvopastoriles) son un conjunto de tecnologías del uso de la tierra, sustentada en la asociación de especies arbóreas, especies forrajeras y la integración de animales, promoviendo su interacción en un mismo sistema productivo (Saucedo-Uriarte et al., 2023). En los SSP pueden presentarse una amplia variedad de asociaciones, tales como cercas vivas, bancos forrajeros de especies leñosas perennes, sistemas en callejones con leñosas perennes, árboles y arbustos dispersos en potreros, plantaciones de árboles maderables o

frutales, barreras vivas, cortinas rompevientos, bancos de proteína, también la integración de especies nativas e introducidas en los potreros (Durand-Chávez et al., 2022).

2.3. Bosque Mesófilo de Montaña

El bosque Mesófilo de Montaña (BMM) es un ecosistema que abarca un 0.5% de la superficie del territorio mexicano, pero en el alberga la mayor diversidad de flora y fauna. El BMM se define como un conjunto de comunidades vegetales dominadas principalmente por especies arbóreas que se desarrollan en zonas montañosas dentro de un rango altitudinal aproximado de 1,500 a 2,500 metros. Estas comunidades presentan una estructura y composición florística adaptadas a condiciones de humedad moderada a alta, la cual proviene tanto de la precipitación como de la presencia frecuente de neblina (Villaseñor & Ortiz, 2017).

2.4. Pastizal

Los pastizales (PAS) están dominados por vegetación graminoide, lo cual incluye gramíneas verdaderas (familia *Poaceae*) y otras similares como las ciperáceas (*Cyperaceae*) y los juncos (*Juncaceae*) a menudo se caracterizan por ser ecosistemas con cobertura relativamente alta en pastos y muchas veces con poca presencia de especies arbóreas y arbustos, sin embargo en algunos casos en los pastizales también se pueden encontrar otras especies vegetales, como hierbas no gramíneas, tanto anuales como perennes, además de arbustos y árboles (Blair et al., 2014).

Los pastizales son superficies destinadas a la producción de forraje ya sea de manera natural o mediante cultivo, dependen de factores como la precipitación, la topografía y la calidad del suelo (Del Ángel-Gerónimo et al., 2022).

2.5. Sistemas agrícolas modernos

A nivel mundial, los sistemas agrícolas modernos se caracterizan por el manejo intensivo del suelo, lo que provoca problemas como deterioro de la calidad y fertilidad, así como de producción, rendimiento y degradación. Asimismo, el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna, asociado con la aplicación excesiva de fertilizantes químicos sintéticos y un manejo deficiente del estado nutrimental, ha contribuido de manera significativa a la degradación de estos sistemas (Valera, 2019).

2.6. Degradación del suelo

La degradación del suelo está asociada a procesos antrópicos como la deforestación, la excesiva recurrencia e intensidad de incendios forestales, el sobrepastoreo, y otras actividades intensivas como la agricultura y la minería (Muñoz-Rojas et al., 2021).

2.7. Calidad del suelo

La calidad del suelo se relaciona con mejorar el contenido orgánico del suelo, así como su estado físico, químico y biológico. Esto incluye aspectos como la estabilidad de los agregados, la estructura, la porosidad, la capacidad de infiltración de agua, la humedad en el suelo, densidad aparente, el contenido de nutrientes en el suelo y la condición biológica. Todo ello como resultado del mantenimiento de la cobertura de la perturbación orgánica del suelo y la cobertura mínima de diversificación de plantas (Ardila-García et al., 2022).

2.8. Indicadores de calidad del suelo

Los indicadores de calidad del suelo son herramientas fundamentales para evaluar el estado y funcionamiento del suelo ya que brindan información sobre los efectos que generan los cambios de uso de la tierra y las prácticas agrícolas en su degradación o conservación. Asimismo, permiten identificar alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que facilita la detección temprana de procesos de deterioro y el diseño de estrategias de manejo

sostenible orientadas a mantener sus funciones productivas y ambientales (Rayo Estrada-Herrera et al., 2017).

2.9. Indicadores físicos de calidad del suelo

Los indicadores físicos de calidad del suelo son variables que reflejan sus propiedades físicas y permiten analizar el estado y funcionamiento en relación con su capacidad para mantener sus funciones productivas (García et al., 2012).

De manera particular, los indicadores físicos se atribuyen con la estructura, textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo, capacidad de almacenamiento de agua y conductividad hidráulica saturada, entre otros. Estas propiedades son indispensables ya que influyen en el uso eficiente del agua, nutrientes y agroquímicos, afectando la productividad agrícola y la sostenibilidad del suelo (Núñez-Peñaloza et al., 2023).

Las principales variables de la fertilidad física de los suelos agrícolas que incluyen son: La densidad aparente, la textura, la porosidad del suelo y la estructura del suelo (Echeverría Pérez et al., 2023a).

2.10. Indicadores químicos de calidad del suelo

Los indicadores químicos se describen como las condiciones que afectan las relaciones entre el suelo y la planta, la calidad del agua, la capacidad de amortiguación del suelo y la presencia de agua, nutrientes para las plantas y microorganismos (García et al., 2012). Los indicadores de mayor importancia son: pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Hierro (Fe) y principales microelementos (Villalba Martínez et al., 2020).

2.11. Indicadores biológicos de calidad del suelo

Evaluar las propiedades biológicas del suelo es importante dado que mantienen una estrecha relación con la descomposición de la materia orgánica proveniente de los residuos vegetales y animales, así como de su ciclaje, dado que los subproductos generados influyen de forma directa sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos (Astier-Calderón et al., 2002).

2.12. Erosión hídrica del suelo

La erosión hídrica se refiere al deterioro del suelo causado por la acción de la lluvia, el viento o la labranza en donde las partículas del suelo se desprenden y son transportadas por escorrentía superficial y acción de la gravedad (Cisneros et al., 2012).

2.13. El proceso de la erosión hídrica

La erosión hídrica del suelo es un proceso que comprende tres fases: El desprendimiento, transporte y sedimentación del material (Cisneros et al., 2012).

El desprendimiento por la energía cinética de la gota de lluvia: El impacto que provocan las gotas de lluvia y su consiguiente salpicadura constituyen el método más efectivo para el desprendimiento inicial, produciendo la ruptura de terrones y agregados (erosión por salpicadura) que desprende partículas que después son arrastradas pendiente abajo, y esto tiene que ver con el fenómeno llamado pérdida de infiltración del suelo.

El transporte por la escorrentía en movimiento: Este agente erosivo provoca el desprendimiento de nuevas partículas del suelo y el transporte del material removido, en proporción al caudal y a la velocidad del flujo de agua sobre la superficie, aquí es cuando también se originan nuevas formas de erosión más visibles en casos extremos como las cárcavas que son responsables del desplazamiento de las partículas desprendidas. Dentro de esta fase de la

escorrentía se distinguen dos tipos de flujos: el flujo laminar o mantiforme, de baja velocidad, el flujo turbulento o concentrado, también denominado flujo en surcos, que puede alcanzar velocidades de hasta 4 m.s^{-1} .

La sedimentación del material por gravedad: En esta fase ocurre el desplazamiento de las partículas del suelo por efecto de la gravedad, lo cual facilita el transporte de material orgánico e inorgánico hacia cuerpos de agua como cauces, lagos y embalses, lo cual ocasiona sedimentación. El transporte de sedimentos está directamente relacionado con la capacidad de transporte del suelo, incrementándose cuando existen condiciones favorables como la intensidad de la lluvia, la pendiente del terreno o ciertas propiedades propias del suelo. Sin embargo, cuando estas condiciones disminuyen y la energía de los agentes de transporte se reduce, se inicia la fase de deposición, en la cual las partículas se depositan al no poder seguir siendo arrastradas o al quedar retenidas en las irregularidades del terreno o por la vegetación (García-Fayos, 2004).

Cada fase está condicionada por múltiples factores, entre ellos el clima, la litología, la pendiente y la biota, se encuentra sujeta a las leyes físicas que rigen la dinámica de los agentes involucrados (García-Fayos, 2004).

2.14. Factores que inciden en la erosión hídrica del suelo.

Los procesos de erosión hídrica dependen ampliamente de factores como el volumen e intensidad de las precipitaciones, la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal, la ausencia de prácticas de manejo, conservación de sistemas y las propiedades físicas del suelo. Todos estos factores conducen a la escorrentía superficial y se produce cuando los agregados del suelo se desestructuran y se excede la capacidad de infiltración, por otro lado, el volumen e intensidad de las precipitaciones, al ser factores que no se pueden controlar, combinados con la pendiente del terreno generan flujos superficiales con capacidad erosiva (Álvarez Ticllasuca, 2020).

Existen diversos factores que inciden en la erosión hídrica del suelo, estos factores interactúan de manera compleja y varían según las condiciones locales.

A continuación, se describen brevemente estos factores:

2.14.1. Topografía

El grado de inclinación, la longitud y forma, la rugosidad del terreno, son variables de este factor del relieve que influyen directamente en el proceso de la erosión de suelos, cuanto más pronunciada sea la pendiente en la ladera, mayor será la erosión, ya que la inclinación facilita la velocidad y la concentración de los flujos del agua, aumentando su capacidad para transportar los sedimentos y erosionar el suelo (Quispe, 2018).

2.14.2. El suelo

Uno de los factores que influye mucho en la erosión del suelo es la erodabilidad o erosionabilidad, que se refiere a la vulnerabilidad del suelo a ser desprendido y transportado por agentes erosivos, es un factor que integra varios procesos que controlan tanto la capacidad del suelo para absorber el agua de lluvia como la resistencia de sus partículas ante el desprendimiento y su posterior desplazamiento. Dichos procesos, dependen de características propias del suelo, tales como el tamaño de sus partículas, la estabilidad de sus agregados, el contenido de materia orgánica, así como la cantidad y tipo de arcillas presentes. Además, influyen otras propiedades edáficas que afectan la estructura del suelo y el movimiento del agua en su interior (Cisneros et al., 2012).

2.14.3. Clima

La precipitación es uno de los factores que influye en la erosión hídrica y la energía cinética. Dependiendo de las precipitaciones, que pueden clasificarse en ciclónicas, convectivas y orográficas es el tipo de erosión. La variabilidad temporal de la erosión está determinada principalmente por los cambios de precipitación. Asimismo, climas con estaciones contrastadas después del periodo

seco, con la llegada de las primeras lluvias se pueden producir tasas muy elevadas de erosión (Cisneros et al., 2012).

2.14.4. Cobertura vegetal

La erosión incide sobre la vegetación de manera directa o indirecta. Directamente ocasiona el desarraigo de las plantas y la pérdida de redistribución de semillas y por otro lado, indirectamente altera o elimina el horizonte superficial del suelo, esencial para el establecimiento de plántulas, como reserva de agua y nutrientes (García-Fayos, 2004).

El incremento en la cobertura vegetal, combinado con un aumento en la compactación del suelo, conlleva a un aumento en el porcentaje de escorrentía, pero al mismo tiempo reduce la carga de sedimentos, lo que significa una disminución de la erosión hídrica del suelo (Serrato et al., 1999). El espesor y la densidad de la cobertura vegetal y del mantillo, están estrechamente relacionadas con la tasa de pérdida de suelo, mostrando una relación exponencial. Es por ello que un manejo adecuado de la cobertura vegetal puede reducir la erosión hídrica del suelo (Pérez Nieto et al., 2012).

La cobertura vegetal actúa como un elemento protector del suelo frente a la lluvia, la sequía, la compactación y los procesos erosivos. Favorece la formación de un suelo más suelto, con estructura acolchada y elevada capacidad de retención hídrica, lo que propicia condiciones óptimas para el desarrollo de cultivos agroecológicos (Guamán et al., 2023). Por lo tanto, la lluvia puede promover tanto la vegetación como la erosión, pero simultáneamente la erosión puede ser contrarrestada por la cobertura vegetal, mientras que, la erosión puede dificultar el desarrollo de la vegetación (García-Fayos, 2004).

2.15. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas tecnológicas que integran datos espaciales, como coordenadas, imágenes satelitales o mapas, para analizar y representar información georreferenciada (Bermeo Almedia et al.,

2025). Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten analizar variables como la litología, la pendiente y la cobertura vegetal, lo que es esencial para identificar áreas prioritarias para la conservación y restauración de los cuerpos hídricos.

2.16. Literatura citada

- Acevedo, I., Sánchez, A., & Mendoza, B. (2021). Evaluation of the level of soil degradation in two productive systems in the Quibor depression. II. soil quality. *Bioagro*, 33(2), 127–134. <https://doi.org/10.51372/BIOAGRO332.6>
- Alfonso, I., Rodríguez, B., Óscar, I., Chaves, S., Gilmar, I., Chacón, N., & Rivera Gómez, I. A. (2013). *Créditos: Seguimiento técnico y aprobación de la guía*.
- Álvarez Ticllasuca, A. (2020). Estimación de la perdida de suelo por erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología USLE en la subcuenca del río Ichu. *TAYACAJA*, 3(2). <https://doi.org/10.46908/rict.v3i2.97>
- Ardila-García, V., Plazas-Navarro, L. P., & Vallejo, V. E. (2022). Conservation Agriculture as a Potential Strategy to Increase Soil Quality in Colombian Agroecosystems. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 23(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2674
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). *DERIVATION OF SOIL QUALITY INDICATORS IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE AGRICULTURE*.
- Bermeo Almedia, O. X., Dávila Vargas, J. W., & Guevara Arias, V. I. (2025). Aplicación de SIG en análisis de NDVI para cultivos de cacao con precisión geográfica. *Revista Alfa*, 9(26), 331–349. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.350>
- Blair, J., Nippert, J., & Briggs, J. (2014). Grassland ecology. In *Ecology and the Environment* (pp. 389–423). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7501-9_14
- Bonfante, A., Terribile, F., & Bouma, J. (2019). Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production: An Italian case study. *SOIL*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.5194/soil-5-1-2019>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Degioanni, A. (2012). *EROSION HIDRICA Principios y técnicas de manejo* (UnRío, Ed.; 1a ed.). www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/

- Clemente-Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 36(2), 180–196. <https://doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1797>
- Del Ángel-Gerónimo, M., Vite-Cristóbal, C., Pech-Canché, J. M., Ortega-Vargas, E., & Arrieta-González, A. (2022). DIVERSIDAD Y ABUNDANCIA DE VEGETACIÓN NATIVA E INTRODUCIDA EN PASTIZALES DE TANTOYUCA, VERACRUZ, MÉXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(3). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4037>
- Durand-Chávez, L. M., Vásquez Pérez, H. V., Ushiñahua-Ramírez, D., Carrasco Chilón, W., Depaz-Hizo, B. A., & Saucedo-Uriarte, J. A. (2022). Yield Performance of Forage Shrubs and Effects on Milk Production and Chemical Composition under the Tropical Climatic Conditions of Peru. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912774>
- Echavarría-Cháirez, F. G., Medina-García, G., & Ruiz-Corral, J. A. (2020). Effects of rainfall pattern changes due to global warming on soil water erosion in grasslands and other vegetation types in the state of Zacatecas, Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 11, 63–74. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11S2.4694>
- Echeverría Pérez, E. G., Castañeda Hidalgo, E., Robles, C., Martínez Gallegos, V., Santiago Martínez, G. M., & Rodríguez-Ortiz, G. (2023). INDICADORES DE CALIDAD COMO HERRAMIENTAS ÚTILES PARA EVALUAR EL ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(1). <https://doi.org/10.60158/rma.v10i1.376>
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012a). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso Soil quality indicators: A new way to evaluate this resource. In *Pastos y Forrajes* (Vol. 35, Number 2).
- García-Fayos, P. (2004). *Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica*.
- Guamán, P., Basante, C., & Mármol, J. L. (2023). Ventajas de la aplicación de cobertura vegetal en los cultivos agroecológicos. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1032>
- Luna Robles, E. O., Cantú Silva, I., & Bejar Pulido, S. J. (2022). Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 16(3), e1097. <https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1097>
- Muñoz-Rojas, M., Delgado-Baquerizo, M., & Lucas-Borja, M. E. (2021). Soil biodiversity and organic carbon are essential to reverse desertification. In

Ecosistemas (Vol. 30, Number 3). Asociacion Espanola de Ecologia Terrestre. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>

Núñez-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). <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148>

Pérez Nieto, J., Valdés Velarde, E., & Ordaz Chaparro, V. M. (2012). COBERTURA VEGETAL Y EROSIÓN DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ BAJO SOMBRA. *Terra Latinoamericana*, 249–259.

Petit-Aldana, J., Uribe-Valle, G., Casanova-Lugo, F., Solorio-Sánchez, J., & Ramírez-Avilés, L. (2012). DESCOMPOSICIÓN Y LIBERACIÓN DE NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA EN HOJAS DE *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Guazuma ulmifolia* Lam. Y *Moringa oleifera* Lam. EN UN BANCO MIXTO DE FORRAJE. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(1), 5–25. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.03.025>

Portuguez M., D. M. (2015). ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO SIGUAS UTILIZANDO GEOINFORMATICA. *Anales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>

Quispe, T. (2018). *Influencia de la cobertura vegetal en la erosión hídrica del suelo en la comunidad de San Mateo, Perú*. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.

Rayo Estrada-Herrera, I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., José, J., Suárez, A., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO PARA EVALUAR SU FERTILIDAD SOIL QUALITY INDICATORS TO EVALUATE SOIL FERTILITY.

Saucedo-Uriarte, J. A., Diaz-Quevedo, C., Pino, M. E. M., Chávez, L. M. D., Rivera, J. L. L., Pérez, H. V. V., & Quispe-Ccasa, H. A. (2023). Productive sustainability of the installation of silvopastoral systems: A systematic review based on the reality of Peru and Colombia. In *Ciencia Tecnología Agropecuaria* (Vol. 24, Number 2). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoica. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:3048

Serrato, B., Romero Díaz, F., & López Bermúdez, A. (1999). EFECTOS SOBRE LA CUBIERTA VEGETAL, LA ESCORRENTÍA Y LA EROSIÓN DEL SUELO, DE LA ALTERNANCIA CULTIVO-ABANDONO EN PARCELAS EXPERIMENTALES. <https://doi.org/10.14198/INGEO1999.22.01>

- Valera, Á. R. (2019). *Obtención de Clases de Fertilidad de Suelos con Técnicas Geoestadísticas y Lógica Difusa en Campos Experimentales. Obtaining soil fertility classes with geostatistic techniques and.* <https://doi.org/10.13141/RG.2.2.26529.02560>
- Villalba Martínez, C. J., Merino García, A., & Etchevers Barra, J. (2020). Diagnosis of the chemical fertility of soils (Rhodic Paleudult) in agricultural and forest systems of the Eastern region of Paraguay. *Investigación Agraria*, 22(2), 92–99. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.diciembre.2202658>
- Villaseñor, J. L., & Ortiz, E. (2017). EL BOSQUE HÚMEDO DE MONTAÑA EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO. *Agro Productividad*, 10(1), 19–23. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/933>
- Workman, S. W., Thevathasan, N. V., & Gordon, A. M. (2002). North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice. H. E. Garrett, W. J. Rietveld and R. F. Fisher (eds.). American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI, USA. *Agroforestry Systems*, 54(1), 83–85. <https://doi.org/10.1023/A:1014226707754>

3. ESTADO DE LOS ELEMENTOS FISICOQUÍMICOS DEL SUELO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES, UN SISTEMA NATURAL Y UN PASTIZAL DE LA MICROCUENCA DOS PUENTES³

3.1. Resumen

Los suelos tropicales son más susceptibles a la pérdida de capacidad para el uso agrícola, debido a la convergencia de procesos de degradación física, química y biológica, esta combinación afecta negativamente las propiedades y procesos del suelo, una reducción en sus funciones y servicios ecosistémicos. Es por ello que el objetivo de este estudio fue determinar el estado de los elementos físicos y químicos esenciales del suelo en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal en la microcuenca Dos Puentes, Huatusco para identificar el estado funcional del recurso edáfico. La metodología consistió en un diseño de muestreo de suelos en una parcela de 25 x 25 m, tomando 12 submuestras a una profundidad de 0-30 cm, distribuidas de manera aleatoria. Estas se homogenizaron para conformar una muestra compuesta representativa. Posteriormente, se realizó el análisis en laboratorio y finalmente el análisis de varianza y prueba de Tukey ($p < 0.05$). El análisis de varianza evidenció que cada uso de suelo tuvo efecto significativo sobre la mayoría de las propiedades químicas evaluadas ($p < 0.05$), excepto del Boro (B). En la prueba Tukey ($\alpha = 0.05$). La mayoría de las propiedades tuvo diferencias significativas entre sistemas, excepto las arenas, limos y CH. La DA mostró valores que oscilan de 0.77 a 1.09 gr.cm⁻³. La CC mostró valores de 41.51 a 70.54 %, los valores de PMP oscilan de 31.54 a 49.78 %. El pH mostró valores de 5.37 a 6.06, la concentración de MO mostró valores de 8.62 a 11.30 %, la concentración de P dio valores de 1.48 a 18.07 mg kg⁻¹, el K osciló de 75.85 a 531.36 mg kg⁻¹. La CIC presentó valores de 12.44 a 19.09 (cmol + kg⁻¹), Fe mostró valores de 32.20 a 124.12 mg kg⁻¹, y el Fe mostró valores de 32.20 a 124.12 mg kg⁻¹. Finalmente se demostró que el mejor sistema evaluado fue el SSP, ya que mostró la combinación más favorable de propiedades físicas y químicas esenciales.

Palabras clave: Suelos tropicales, Propiedades fisicoquímicas del suelo, sistema silvopastoril, bosque mesófilo de montaña, fertilidad del suelo.

⁴ Tesis de maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el desarrollo sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Ana Karen Hetnández Juan

Director de tesis: David Cristóbal Acevedo

STATUS OF SOIL PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES IN TWO AGROFORESTRY SYSTEMS, A NATURAL SYSTEM, AND A GRASSLAND IN THE DOS PUENTES MICRO-WATERSHED⁴

3.2. Abstract

Tropical soils are more susceptible to losing their suitability for agricultural use due to the convergence of physical, chemical, and biological degradation processes; this combination negatively affects biological soil properties and processes, leading to a reduction in their ecosystem functions and services. For this reason, the objective of this study was to determine the status of essential physical and chemical soil properties in two agroforestry system a natural system and a grassland in the Dos Puentes micro-watershed, Huatusco, to assess the functional status of the soil resource. The methodology involved a soil sampling design on a 25 x 25 m plot, with 12 subsamples taken at a depth of 0–30 cm and distributed randomly; these were homogenized to form a representative composite sample. Subsequently, laboratory analysis was performed, followed by analysis of variance and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). The analysis of variance showed that each land use had a significant effect on most of the chemical properties evaluated ($p < 0.05$), except for boron (B). In the Tukey test ($\alpha = 0.05$). most properties showed significant differences between systems except for sand, silt, and CH. The DA ranged from 0.77 to 1.09 g.cm⁻³. The CC ranged from 41.51 to 70.54 %, and the PMP ranged from 31.54 to 49.78 %. pH values ranged from 5.37 to 6.06; organic matter (OM) concentration ranged from 8.62 to 11.30%, phosphorus (P) concentration ranged from 1.48 to 18.07 mg kg⁻¹, and potassium (K) ranged from 75.85 to 531.36 mg kg⁻¹ and CIC ranged from 12.44 to 19.09 (cmol + kg⁻¹), Fe showed values ranging from 32.20 to 124.12 mg kg⁻¹ and Fe ranged from 32.20 to 124.12 mg kg⁻¹. Finally, THE SSP system was shown to be the best among those evaluated, as it exhibited the most favorable combination of essential physical and chemical properties.

Keywords: Tropical soils, Soil physicochemical properties, silvopastoral system, mesophilic forest, soil fertility.

⁴ Master's Thesis in Science. Master of Science Program in Agroforestry for Sustainable Development. Universidad Autónoma de Chapingo, Mexico.

Author: Ana Karen Hetnández Juan

Thesis Advisor: David Cristóbal Acevedo

3.3. Introducción

El suelo constituye un recurso fundamental para el ser humano, especialmente en la producción agropecuaria, ya que su estado influye directamente en muchas actividades y en la aplicación de prácticas de manejo orientadas a alcanzar niveles óptimos de rendimiento (Fernández Ojeda et al., 2016).

Orellana Salas & Llvy Portilla (2018) mencionan que uno de los principales factores que están asociados a la baja capacidad productiva del suelo en diversos ecosistemas de cultivo es la pérdida de fertilidad del suelo, siendo esta el conjunto de procesos dinámicos físicos, químicos y biológicos que abonan a la sustentabilidad de los agroecosistemas; lo cual puede provocar graves problemas en la producción, rendimiento y degradación de suelos (Echeverría Pérez et al., 2023b). En este contexto, los suelos tropicales son más susceptibles a la pérdida de capacidad para el uso agrícola, debido a la convergencia de procesos de degradación física, química y biológica. Esta combinación afecta negativamente las propiedades y procesos del suelo, generando una reducción en sus funciones y servicios ecosistémicos (Ardila-Garcia et al., 2022). Tal es el caso de la microcuenca Dos Puentes, donde existen diversos sistemas de uso de suelo, como los sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, pastizales y bosque mesófilo de montaña. Estos presentan diferentes niveles de intervención y manejo, los cuales influyen directamente sobre las características fisicoquímicas del suelo.

En este contexto, las propiedades físicas y químicas le confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva de tierras agrícolas (Fernández Ojeda et al., 2016) sin embargo, estas funciones pueden verse afectadas de manera negativa por procesos de degradación como la erosión acelerada, degradación de pastizales, la compactación, la acidificación, la pérdida de materia orgánica, pérdida de fertilidad, salinización, alcalinización y biodiversidad edáfica (Barra et al., 2024).

Conocer las propiedades físicas de un suelo ayuda a valorar las condiciones de este, ya que revela información sobre el cambio de uso y el impacto que tienen las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales sobre su funcionamiento y desgaste (Estrada-Herrera et al., 2017). De igual manera conocer las propiedades químicas como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, así como el contenido de macro y micronutrientes nos ayuda a conocer el estado de la relación suelo-planta y el efecto del uso de suelo (Yáñez Díaz et al., 2018).

La Microcuenca Dos Puentes, pertenece al Municipio de Huatusco, Veracruz, ubicada en una región montañosa, donde coexisten distintos usos del suelo, Sistemas Agroforestales de Café, Sistemas Silvopastoriles, Pastizales, Bosque Mesófilo de Montaña, la que convierte en un área estratégica para analizar el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo y determinar qué sistema favorece mejor su conservación. Por lo dicho anteriormente, en este estudio se trabajó con cuatro sistemas de uso del suelo: Sistema Agroforestal, Sistema Silvopastoril, Bosque Mesófilo de Montaña y un Pastizal, para ver el efecto de las propiedades fisicoquímicas sobre cada sistema y determinar cuál de ellos presenta las mejores condiciones y eficiencia nutrimental.

En este sentido, el objetivo fue determinar el estado de las propiedades físicas y químicas esenciales del suelo en dos sistemas agroforestales, un sistema natural y un pastizal de la microcuenca Dos Puentes para identificar el estado funcional del recurso edáfico.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la microcuenca Dos Puentes, dentro del municipio de Huatusco, Veracruz, la cual colinda con la microcuenca Citlalapa-Aguacapa, Capulapa y con la Subcuenca Colonia Manuel González. Se ubica entre los paralelos 19° 04' y 19° 13' de latitud norte y los meridianos 96° 41' y 97° 04' de longitud oeste, en la zona central montañosa del estado de Veracruz, sobre las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Su altitud oscila entre 400 y 2,000 m (Figura 1) y su clima es del tipo semicálido-húmedo con una temperatura media anual de 16 a 26 °C y una precipitación media anual de 2,000 mm. Sus suelos son principalmente de origen volcánico. El municipio tiene una extensión de 202.5 km² que representa el 0.28% de la superficie del estado y posee 71 localidades (70 rurales y 1 urbana). Su cabecera municipal es Huatusco de Chicuellar (INEGI, 2010).

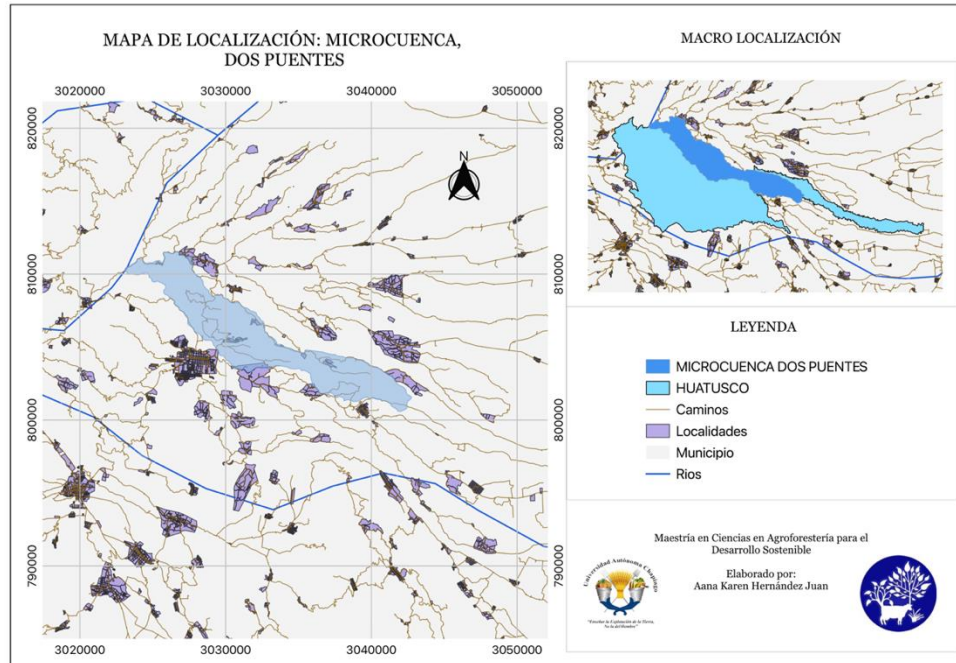


Figura 1. Mapa de localización de la microcuenca Dos puentes de Huatusco, Veracruz.

3.4.2. Caracterización de la zona de estudio

Clima

Los climas predominantes son; los semicálidos húmedos (A)C(fm) y (A)C(m), los cuales abarcan el 48% y 43% de la superficie total del municipio respectivamente. También se encuentra el clima tipo Aw2(w) cálido subhúmedo de mayor humedad con un 4% y el Aw1(w) cálido subhúmedo de humedad media, que abarca el 5% del municipio.

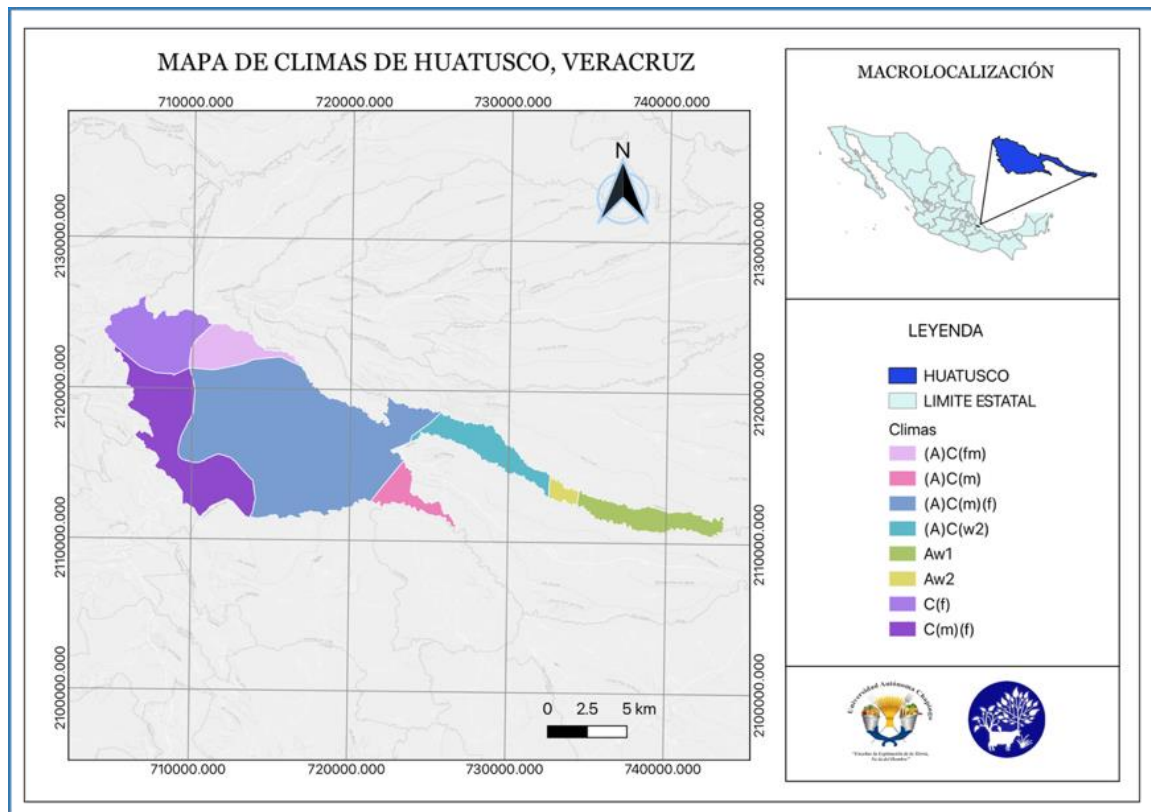


Figura 2. Climas de Huatusco, Veracruz

Suelo

Los suelos que predominan en el área de estudio son los Luvisoles crómicos, los cuales ocupan más del 60% del área, seguido del cambisol eútrico que abarca el 23% de la superficie total del municipio. También se encuentran los suelos acrisol órtico y vertisol pélico.

Uso de suelo y vegetación

Del análisis del uso del suelo y la cobertura vegetal en el municipio de Huatusco, se identificó que la mayor parte del territorio está destinado a actividades agropecuarias, principalmente la agricultura de temporal semipermanente y permanente que representa un total de 5,410.03 ha, lo que equivale al 26.64 % del total de la superficie del municipio. Continuando con la vegetación arbórea de bosque mesófilo de montaña con 4,652.57 ha (22.91 %) lo cual evidencia una importante transformación del bosque original hacia una cobertura secundaria, posiblemente derivada del cambio de uso de suelo por prácticas agrícolas o pecuarias.

Otro uso de suelo con alta representación es la agricultura de temporal permanente, que abarca 2,734.88 ha (13.47 %) y pastizales cultivados, que cubren 1,856.94 ha (9.15 %). Estas actividades reflejan una fuerte presión sobre el paisaje especialmente en zonas de pendiente pronunciada.

Los asentamientos humanos ocupan una superficie de 1,343.79 ha (6.62 %), seguidos por áreas de vegetación secundaria en distintas fases de recuperación, que en conjunto abarcan aproximadamente 6.52 % del territorio. Por otro lado, la presencia de bosque de encino, es reducida, con solo 201.01 ha (0.99 %), lo cual indica una pérdida significativa de cobertura arbórea primaria. Por otro lado la superficie destinada a actividades mineras y cuerpos de agua superficiales es mínima, con valores inferiores a 0.1 %.

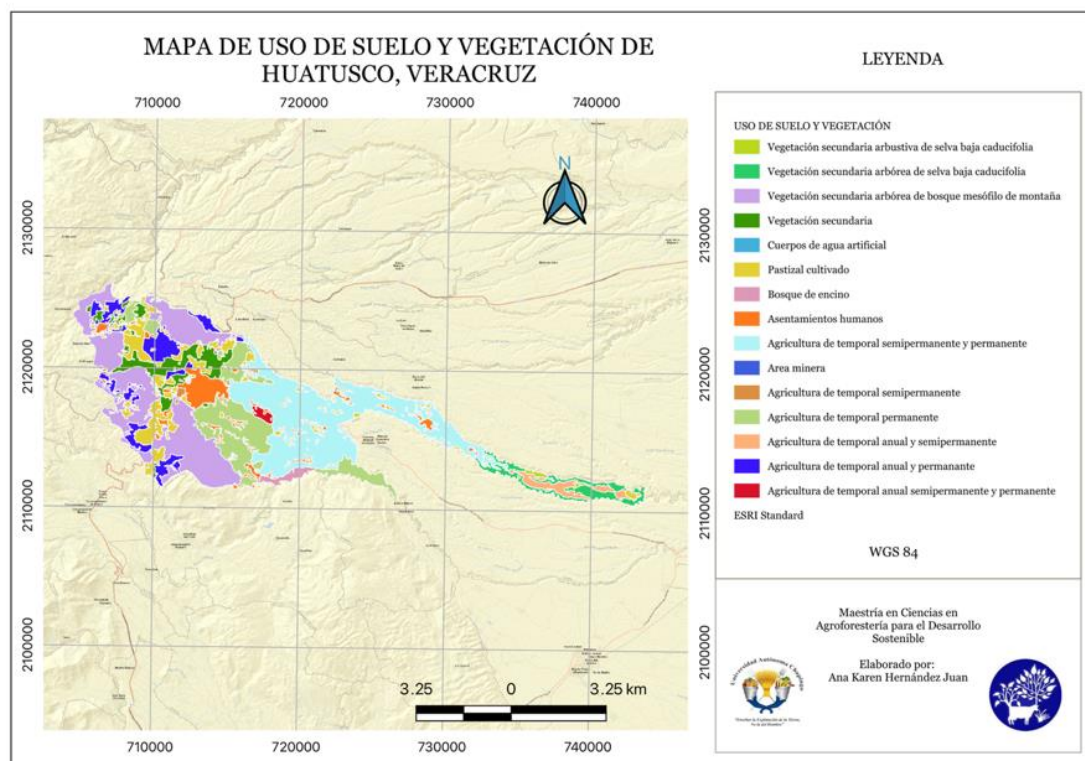


Figura 3. Mapa de uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz

3.4.3. Descripción de los sistemas

Sistema agroforestal bajo sombra

El sistema agroforestal es un sistema especializado, se localiza en las coordenadas latitud 19.175850°N y longitud 96.967580°O, en una ladera de pendiente suave (0-15 %), orientada hacia el norte, dentro de una zona de bosque mesófilo de montaña. La composición vegetal de este sistema incluye especies arbóreas utilizadas para sombra, entre ellas *Grevillea* (*Grevillea robusta*) (altura de 15 m), Vainillo (*Inga spp.*) (altura de 6 m), Nogal (*Junglans spp.*) e Ixpepe (*Inga spp.*).

El cafeto arábico (*coffea arabica*) se encuentra a una altura de 3.5 m. La distancia entre planta es de 2 x 2 m, mientras que los árboles de sombra presentan una separación de 2 m entre sí y 5 m entre surcos, aunque cabe mencionar que el

arreglo espacial no es completamente homogéneo ni simétrico. Por otro lado, el sotobosque está cubierto por especies herbáceas y hojarasca.

El manejo agronómico es completamente agroecológico, y el manejo nutrimental es mediante prácticas agroecológicas, destacando el uso de composta elaborada a partir de pulpa de café. No se realiza remoción de suelo y en algunas áreas se mantiene el material de podas, lo cual aporta materia orgánica adicional.



Figura 5. Sistema agroforestal especializado.



Figura 4. Sistema agroforestal de café bajo sombra

Sistema silvopastoril

El sistema silvopastoril se localiza en las coordenadas latitud 19.176290°N y longitud 96.966310°O. La composición vegetal de este sistema incluye especies de Huizache de 5 m de altura, cacahuatillo y diversas herbáceas. Este sistema está destinado a la producción lechera y en él se crían vacas Holstein, para la producción de leche.



Figura 7. Sistema silvopastoril (Huizache).



Figura 6. Sistema silvopastoril

Bosque mesófilo de montaña

El bosque mesófilo de montaña (BMM) se encuentra en las coordenadas latitud 19.179510°N y longitud 96.6900°O. Este sistema natural también conocido como bosque de niebla, es un ecosistema clave, que se encuentra en zonas montañosas con alta humedad y temperaturas moderadas.

Este jardín botánico natural cuenta con una gran composición florística dispersa en cuatro estratos, dosel o estrato superior: Formado por árboles altos, generalmente de 20 a 30 metros, como encinos (*Quercus spp.*), y Liquidámbar (*Liquidámbar styraciflua*). El estrato intermedio, dominado por árboles más pequeños, arbustos como *Pipper spp.* y *Siparuna* y plantas trepadoras como lianas. El estrato inferior está compuesto por hierbas, helechos, musgos, líquenes y epífitas como bromelias y orquídeas.

Su diversidad está conformada por 45 familias, 78 especies y 64 géneros, entre ellas están: Hoja santa o acuyo (*Piper auritum*), Limoncillo (*Siparuna thecaphora*), Helecho arborescente (*Nephelea mexicana*), Encino chicalaba (*Quercus insignis*), Helecho peshma (*Cyatheaceae*), Ala de ángel (*Begonia incarnata*), Planta de uso ornamental (*Syngonium*), Macuixóchilt (*Oreopanax*), Palma

camedor (*Chamaedora elegans*), Selanellaceae (*Selaginella spp*). El diseño del BMM es heterogéneo, con gradientes de luz que favorecen la coexistencia de una gran diversidad de especies.



Figura 8. Bosque Mesófilo de Montaña.

Pastizal

El pastizal se encuentra en las coordenadas geográficas 19.177240°N de latitud norte y 96.965240°O de longitud oeste. La composición vegetal del sistema de producción pecuaria cuenta con la presencia de especies forrajeras como Cacahuatillo (*Arachis pintoï*) y Pasto estrella africana (*Cynodon nlemfunensis*). Este espacio se destina principalmente al aprovechamiento por parte del ganado, mediante pastoreo directo.



Figura 9. Pastizal

3.4.4. Diseño de muestreo de suelos

El diseño de muestreo se realizó estableciendo un área de 25 x 25 m, donde se estableció una cuadrícula de 5 x 5 m generándose 25 posibles puntos de muestreo, estos 25 puntos se numeraron del 1 al 25 y de manera aleatoria se establecieron 12 puntos para el muestreo. Por lo tanto, en cada unidad experimental, se tomaron 12 submuestras de suelo, a una profundidad de 0-30 cm, las cuales se homogenizaron para conformar una muestra compuesta biológica representativa. Este procedimiento se repitió tres veces, generando tres muestras compuestas independientes para su posterior análisis en laboratorio.

3.4.5. Determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo.

La determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo se realizó en el laboratorio central de la Universidad Autónoma Chapingo, bajo procedimientos de la (NOM-021-RECNAT-2000).

Cuadro 1. Determinación de las propiedades físicas.

Atributos a medir de las variables físicas	Técnicas utilizadas
Densidad aparente (DA)	Método AS-03, utilizando parafina y método del cilindro de volumen conocido
Densidad Real (DR)	Método AS-04, picnómetro
Capacidad de Campo (CC)	Método de la olla de presión
Punto de marchitez permanente (PMP)	Método de la olla de presión
Estabilidad de agregados (EA)	Prueba de estabilidad de agregados por Tamizado Húmedo
Textura (Arenas, limos, arcillas)	Método AS-09 Procedimiento de Bouyoucus.
Conductividad Hidráulica (CH)	Método de permeámetro de carga constante
Porosidad Total	$PT(\%) = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$ Donde Da corresponde a la Densidad aparente y Dr a la densidad real.

Cuadro 2. Determinación de las propiedades químicas.

Atributos a medir de las variables químicas	Técnicas utilizadas
pH	Potenciómetro, Relación Suelo-Agua, 1:2
Conductividad eléctrica (CE)	Puente de conductividad eléctrica en suspensión 1:2
Materia orgánica (MO)	Walkley and Black
N Total (NT)	Método AS-08, Micro- Kjeldahl.
Amonio (NH_4^+)	Oxidación con óxido de magnesio y destilado por arrastre de vapor.
Nitratos (NO_3^-)	Reducción con aleación de Devarda y destilación por arrastre de vapor
Fósforo (P)	BRAY P-1.
Potasio (K)	Método AS-19 Extracción con acetato de amonio 1.0N y espectrofotometría de emisión de flama.
Calcio (C) Magnesio (Mg)	Extraídos con acetato de amonio 1.0 N, pH 7.0, relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica.
Sulfatos (SO_4)	Turbidimetría de cloruro de bario en el extracto de la pasta de saturación.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Extracción con Tiourea de plata 0.01 M y cuantificado por espectrofotometría de absorción atómica.
Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso (Fe, Cu, Mn)	Extraídos con DTPA relación 1:4 y cuantificada por espectrofotometría de absorción atómica.
Boro (B)	Extraído con CaCl_2 1.0M y determinado por fotolorimetría con azometina-H.

3.4.6. Análisis Estadístico

Las determinaciones de las propiedades físicas y químicas se sometieron a un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar para determinar si se tenía efecto de los sistemas (sistema agroforestal especializado, sistema silvopastoril, bosque mesófilo de montaña y pastizal) sobre las variables físicas y químicas. Posteriormente se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

3.5. Resultados y discusión

En el Cuadro 3 se presenta el análisis de varianza de las propiedades físicas del suelo.

Cuadro 3. ANOVA de las propiedades físicas del suelo.

VARIABLES FÍSICAS	p-valor
Densidad Aparente (gr.cm ⁻³)	0.0014
Capacidad de campo (%)	0.001
Punto de marchitez permanente (%)	0.0001
Densidad Real (gr/cm ³)	0.0285
Estabilidad de agregados (%)	0.0001
Conductividad Hidráulica (cm/h)	0.0838
Porosidad Total (%)	0.0002
Arenas (%)	0.1434
Limos (%)	0.5757
Arcillas (%)	0.0111

Efecto de los sistemas sobre las propiedades físicas

El análisis de varianza evidenció que se tuvo efecto significativo de los sistemas sobre la mayoría de las propiedades físicas evaluadas (Cuadro 4). Se observó efecto altamente significativo en DA, CC, PMP, EA, PT, y CH ($p < 0.01$) lo cual indica que las condiciones físicas del suelo responden al manejo y cobertura vegetal presentes en cada sistema.

Cuadro 4. ANOVA de las propiedades químicas del suelo.

VARIABLES QUÍMICAS	p-valor
pH	0.0001
CE (dS/m)	0.0041
MO (%)	0.0149
NT (%)	0.0001
Nmin (mg kg ⁻¹)	0.0014
NO (mg kg ⁻¹)	0.0001
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	0.0249
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	0.0010
P (mg kg ⁻¹)	0.0001
K (mg kg ⁻¹)	0.0001
Ca (mg kg ⁻¹)	0.0001
Mg (mg kg ⁻¹)	0.0001
SO ₄ (mg kg ⁻¹)	0.0001
CIC (cmol + kg ⁻¹)	0.0003
Fe (mg kg ⁻¹)	0.0001
Cu (mg kg ⁻¹)	0.0001
Zn (mg kg ⁻¹)	0.0001
Mn (mg kg ⁻¹)	0.0001
B (mg kg ⁻¹)	0.1711

Efecto de los sistemas sobre las propiedades químicas

El análisis de varianza evidenció que cada uso de suelo (SAF, PAS, BMM, SSP) tuvo efecto significativo sobre la mayoría de las propiedades químicas evaluadas ($p < 0.05$). Por el contrario, el B no tuvo efecto significativo, lo cual podemos decir que, los distintos usos de suelo no tuvieron efecto sobre esta variable en particular, es decir, permaneció relativamente homogénea en SAF, PAS, BMM y SSP. Las pruebas de comparación de medias de Tukey para las propiedades físicas del suelo se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Prueba de comparación de medias de Tukey de las propiedades físicas del suelo.

PRUEBA DE COMPARACION DE MEDIAS DE TUKEY ($\alpha = 0.05$).				
VARIABLES FÍSICAS	SAF	PAS	BMM	SSP
Densidad aparente (gr.cm^{-3})	0.77b	0.97a	0.94a	1.09a
Capacidad de Campo (%)	70.54a	53.48b	54.09b	41.55c
Punto de Marchitez Permanente (%)	49.78a	37.42b	35.81bc	31.54c
Densidad real (gr.cm^{-3})	2.28a	2.18ab	2.15ab	2.01b
Estabilidad de Agregados (%)	73.03c	83.32b	80.95b	87.11a
Conductividad Hidráulica (cm/h)	6.06a	19.71a	9.93a	6.09a
Porosidad total (%)	65.96a	55.33b	55.81b	45.39c
Arenas (%)	58.09a	62.76a	50.76a	52.09a
Limos (%)	33.28a	23.94a	28.61a	25.28a
Arcillas (%)	8.62b	13.29ab	20.62a	22.62a

Medias con la misma letra sobre las hileras no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)

SAF= Sistema agroforestal; PAS= Pastizal; BMM= Bosque Mesófilo de Montaña; SSP= Sistema silvopastoril.

Densidad aparente (DA)

La DA mostró valores que oscilan de 0.77 a 1.09 gr.cm⁻³, lo cual indica una DA baja. En cuanto a la prueba de comparación de medias de Tukey, se presentaron diferencias significativas en los sistemas ($p < 0.05$). El SAF obtuvo el menor valor seguido de BMM, PAS y SSP. La densidad es un indicador muy importante, ya que refleja el grado de compactación y espacio poroso del suelo, en sistemas agroforestales, los valores bajos de densidad aparente suelen asociarse con mayores concentraciones de MO, mejor agregación y actividad biológica, en comparación con los pastizales y sistemas sometidos a pisoteo que presentan un valor más alto de densidad aparente debido a la compactación del suelo (René Fernández Ojeda et al., 2016).

Otros autores reafirman esta idea indicando que cuando hay menores concentraciones de MO es mayor la DA, es decir disminuye la porosidad total y principalmente los poros de mayor tamaño (Quiroga et al., 2017). Un estudio obtuvo valores más altos de DA (1.43 gr.cm⁻³), en comparación con nuestro estudio en suelos con altos valores de arcilla y conforme el paso del tiempo, hubo un descenso de DA y un aumento de MO, PT y CC. Asimismo, se reafirma que la textura del suelo está relacionada con las concentraciones de MO, ya que ésta aumenta en suelos arcillosos (textura fina) (Núñez et al., 2011).

Con lo dicho anteriormente, podemos concluir que los sistemas con menor valor de DA son mejores a los de mayor valor, y el orden queda así SAF>BMM>PAS>SSP.

Capacidad de Campo (CC)

La CC mostró valores de 41.51 a 70.54 %, que indican una alta variación entre los sistemas evaluados. En cuanto a la prueba de comparación de medias hubo diferencias significativas en los sistemas ($p < 0.05$), SAF fue diferente de PAS, BMM y SSP. Los resultados obtenidos coinciden con los valores reportados por Nuñez-Peñaloza et al. (2022) quienes destacan que los sistemas de uso del suelo influyen significativamente sobre la retención de la humedad. Ellos mencionan

que los valores altos de CC favorecen una mayor humedad aprovechable y están asociados con mejores condiciones físicas del suelo, altos contenidos de MO y menor proporción de arenas.

Considerando que valores altos de CC son mejores, ordenando los sistemas del mayor valor al de menor valor en cuanto a CC, el orden es SAF>PAS>BMM>SSP.

Punto de marchitez permanente (PMP)

El PMP mostró valores que oscilan de 31.54 a 49.78 %, estos valores presentan una alta capacidad del suelo para retener humedad. En cuanto a la prueba de comparación de Tukey, los resultados mostraron diferencias significativas en los sistemas ($p<0.05$), SAF fue diferente de PAS, BMM, PAS y SSP. Estos resultados de PMP coinciden con lo reportado por Pulido et al. (2020) en suelos Andosoles bajo distintos usos de suelos, donde mencionan que una alta porosidad, altos contenidos de MO y presencia de minerales amorfos favorecen la retención de humedad, mientras que los sistemas con cobertura forestal y agroforestal presentan mejores propiedades hidrofísicas, lo cual puede almacenar mayor contenido de agua. Por otro lado, mencionan que el PMP incrementa cuando se tiene alto contenido de arcillas en el suelo. Sin embargo, en este estudio, el mayor valor de PMP y también el mayor contenido de arcillas, corresponde al SAF, esto debido a que se ejerce mayor fuerza de retención de agua (Weil & Brady, 2017).

Considerando que valores bajos de PMP son mejores, el orden de los sistemas es SSP>BMM>PAS>SAF.

Densidad real (DR)

En cuanto a la DR, mostró valores entre 2.01 a 2.28 (gr.cm^{-3}), mostrando diferencias significativas entre sistemas con la prueba de medias Tukey ($p<0.05$), el SAF registró el valor más alto, siendo diferente de PAS y BMM con valores intermedios y finalmente SSP el menor valor. La densidad DA y DR son buenos indicadores para establecer el estado actual de la distribución de la porosidad, ya que permiten conocer el grado de compactación, la capacidad de

almacenamiento de agua y aire (Sharma et al., 2005). Un estudio reportó valores de DR entre 2.15 y 2.39 (gr.cm^{-3}) en sistemas agroforestales similares a los del presente estudio, donde se menciona que la densidad y la porosidad están estrechamente relacionadas con el contenido de MO y el uso de suelo (Furcal-Berguete et al., 2023). Esto concuerda con otros autores que mencionan que suelos bajo cobertura agroforestal presentan menores densidades debido al alto contenido de MO, elevada retención de humedad y presencia de estructuras biológicas estables (Omar Hernández Ordoñez et al., 2017). El orden de mayor a menor en cuanto a los valores de DR queda SAF>BMM>PAS>SSP.

Estabilidad de agregados (EA)

La EA mostró valores entre 73.03 a 87.11 %, lo cuales son valores considerados de altos a muy altos, indicando buena estabilidad estructural, estos valores muestran diferencias significativas en las medias de la prueba Tukey ($p<0.05$), SSP fue diferente de PAS, BMM y SAF. La microcuenca Dos Puentes se encuentra en zona montañosa, por lo que se considera una región húmeda, en este contexto, Weil & Brady (2017) mencionan que en regiones muy húmedas, cuando los valores de EA son altos, se debe a la acción de componentes inorgánicos (como óxidos de hierro), lo cual favorecen la agregación de las partículas del suelo. Diversos estudios han mencionado la importancia de la estabilidad de agregados del suelo. La MO, la actividad microbiana y el desarrollo radicular están directamente relacionadas ya que favorecen la formación y estabilidad de agregados, lo cual ayuda a la infiltración, aireación y retención de humedad (Núñez et al., 2011).

Considerando que valores altos son mejores, ordenando los sistemas del mayor al menor en EA es SSP>PAS>BMM>SAF.

Conductividad hidráulica (CH)

La CH mostró valores de 6.06 a 19.71 (cm/h), lo cual indica diferencias importantes en la capacidad de infiltración y movimiento del agua entre los sistemas. No se presentaron diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p > 0.05$). Resultados similares fueron reportados por Pérez Gómez & García (2015) en sistemas agroforestales de café en Nicaragua, donde señalaron que la presencia de poros y raíces favorece de manera positiva el flujo del agua en el suelo. Así mismo destacan que a mayor porosidad el suelo aumenta la conductividad hidráulica (cm/h). La conductividad hidráulica también está influenciada por el tipo de manejo del suelo, los suelos con pradera como en el caso del pastizal en la microcuenca Dos Puentes presentan valores mayores de CH, comparado con sistemas con labranza convencional (Fertililab, 2021, citado por Victoria et al., 2023). Por otro lado, valores bajos de CH, puede deberse a un contenido bajo de MO y alto contenido de sodio (FAO, 2012, citado por Victoria et al., 2023).

La CH está estrechamente relacionada con la textura del suelo, debido a que el tamaño y distribución de las partículas controlan la porosidad y movimiento del agua. Los suelos con mayores contenidos de arena tienen mayor infiltración y CH por los macroporos, mientras que los suelos arcillosos presentan menor CH, por los microporos y mayor retención de agua.

De acuerdo a González et al. (2021) señaló que la textura si influye significativamente ya que en su estudio comprueba que los suelos franco arenosos tienen altos valores de CH. Por otro lado, Gallegos-Fonseca G et al. (2011) menciona la distribución de partículas determina el comportamiento hidráulico, principalmente en suelos arenosos y limosos.

Por lo dicho anteriormente, en este estudio no se presentaron diferencias significativas entre los sistemas, por lo que estos resultados podrían estar relacionados con las diferencias texturales registradas en los sistemas. En este sentido, el orden de mayor a menor es PAS>BMM>SSP>SAF.

Porosidad Total (PT)

En cuanto a la Porosidad Total se muestran valores que oscilan de 45.39 a 65.96 %, mostrando diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p>0.05$). La textura y el contenido de MO están relacionadas entre sí, ya que ejercen una gran influencia clara sobre la porosidad de aireación y contribuye a la formación de agregados del suelo (Pérez Gómez & García, 2015).

De acuerdo a, Núñez et al. (2011) en su estudio reportan que a medida que aumentan los valores de arcillas, aumenta la porosidad total y también la concentración de MO señalando que en sistemas agroforestales el valor de la porosidad se eleva debido a la aporte constante de MO y actividad biológica.

Considerando que valores altos son óptimos el orden del mayor al menor es SSP>PAS>BMM>SAF.

Arenas, limos y arcillas

En cuanto a los porcentajes de arenas, limos y arcillas el PAS mostró porcentajes más altos de arenas, seguido de SAF, finalmente SSP y BMM. En cuanto al los valores de limos el SAF mostró valores más altos, seguido de BMM, SSP y PAS, en cuanto al valor de arcillas, SSP tuvo mayor valor seguido de BMM, PAS y SAF. De acuerdo a la prueba de comparación de medias las arenas y limos no presentaron diferencias significativas ($p>0.05$), caso contrario con las arcillas que si presentan diferencias significativas ($p<0.05$).

De acuerdo a estos resultados, SAF corresponde a un suelo franco-arenoso, BMM a un suelo franco arcilloso-arenoso, SSP a un suelo franco; y PAS es un

suelo franco-arenoso. La textura de los suelos franca limosa y franca suelen ser de colores más oscuros en la superficie por el alto contenido de MO y tienden a ser más claros en horizontes superficiales principalmente en bosques y en sistemas agroforestales (Omar Hernández Ordoñez et al., 2017).

De acuerdo a Victoria et al. (2023) el valor de arcillas es la fracción más activa que determina el proceso de retención de agua, estabilidad de agregados, almacenamiento de carbono nutrientes, capacidad de intercambio catiónico y la fertilidad en los cultivos (Camacho-Tamayo et al., 2013). Estas características texturales correspondientes a suelos francos en los sistemas agroforestales favorecen de manera positiva los diversos procesos ecosistémicos, relacionados con la disponibilidad de nutrientes y actividad microbiana, esto debido a que las fracciones de arenas, limos y arcillas mejoran las propiedades del suelo como la DA, Porosidad, retención de humedad, mayor concentración de MO en comparación con los monocultivos (Ramachandran Nair et al., 2010). Por ello se puede decir que, los suelos con valores altos de arenas, de partículas mayores, presentan mayor macroporosidad, favorecen la infiltración, pero al mismo tiempo tienen baja retención de humedad. Los suelos arcillosos, de partículas pequeñas, tienen mayor retención hídrica, mayor capacidad de intercambio catiónico pero menor infiltración. Los limos presentan baja cohesión, altamente susceptibles a erosión hídrica y pueden compactarse fácilmente (Gallegos-Fonseca G et al., 2011).

De acuerdo con los resultados del ANOVA, el efecto de los cuatro sistemas sobre las variables químicas de respuesta fue estadísticamente significativo. La prueba de comparación de medias de Tukey se muestra en el siguiente Cuadro 6.

Cuadro 6. Prueba de comparación de medias de Tukey de las propiedades químicas del suelo.

PRUEBA DE COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY ($\alpha = 0.05$).				
VARIABLES QUÍMICAS	SAF	PAS	BMM	SSP
pH	5.37c	6.05a	5.48c	5.77b
CE (dS/m)	0.27a	0.22ab	0.13b	0.13b
MO (%)	10.93a	8.62b	11.30a	9.20ab
NT (%)	0.56a	0.37b	0.23c	0.25c
Nmin (mg kg ⁻¹)	29.33a	26.91a	29.16a	21.33b
NO (mg kg ⁻¹)	0.56a	0.37b	0.23c	0.25c
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	12.25a	9.00b	12.08a	10.83ab
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	17.08a	17.91a	17.08a	10.50b
P (mg kg ⁻¹)	1.48c	18.06a	2.83c	14.80b
K (mg kg ⁻¹)	113.15bc	531.36a	140.32b	75.85c
Ca (mg kg ⁻¹)	855.9c	1943.6a	930.7bc	1188.8b
Mg (mg kg ⁻¹)	1323.7d	2874.7b	1678.1c	3758.0a
SO ₄ (mg kg ⁻¹)	12.00ab	2.70c	11.357b	13.89a
CIC (cmol + kg ⁻¹)	12.44c	19.09a	12.84bc	15.46b
Fe (mg kg ⁻¹)	32.20b	124.12a	32.28b	123.73a
Cu (mg kg ⁻¹)	0.13d	2.06b	0.66c	3.03a
Zn (mg kg ⁻¹)	1.27b	3.17a	0.80b	3.42a
Mn (mg kg ⁻¹)	6.59c	116.18a	12.53c	61.13b
B (mg kg ⁻¹)	0.41a	0.22ab	0.27a	0.13a

Medias con la misma letra sobre las hileras no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)

SAF= Sistema agroforestal; PAS= Pastizal; BMM= Bosque Mesófilo de Montaña; SSP= Sistema silvopastoril.

pH

En el Cuadro 6 se puede observar que el pH del suelo presentó valores que oscilan de 5.37 a 6.05 clasificándose como suelos ligeramente ácidos a ácidos de acuerdo a la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000. En cuanto a la comparación de medias, SAF mostró diferencias significativas con PAS y con SSP ($p < 0.05$). El sistema con el valor más alto de pH fue PAS (6.05), y el sistema con valor más bajo fue SAF (5.37). El pH bajo tiene efecto sobre la disponibilidad de algunos elementos como P, ya que se encuentra cerca de el pH óptimo de 6.5 y 7.0.

Valores similares fueron reportados en sistemas agroforestales de café con valores de 5.6 a 7.2 clasificados como suelos ácidos y se menciona que se debe a que se encuentran en zonas altas (Márquez et al., 2020). De acuerdo con Escobar Montenegro et al. (2017), en sistemas silvopastoriles se obtuvieron valores de 6.17 y en bosques reporta valores de 6.36.

La acidificación de suelos en sistemas tropicales es causada especialmente por la producción de ácidos asociados al ciclo del N, C y una limitación de azufre. Además se menciona que cerca de un tercio de área total de los trópicos son suelos ácidos, lo cual limita la disponibilidad de P y unido a grandes cantidades de aluminio limita el desarrollo de raíces (Wong, 2005, citado por (Ramírez-Builes, 2007).

En cuanto a la disponibilidad de nutrientes en el suelo respecto al pH, el Nitrógeno se presenta con mayor disponibilidad en suelos ácidos como en el SAF, BMM y PAS, mientras que el fósforo alcanza su máxima disponibilidad en suelos ligeramente ácidos como en el caso de PAS. En este contexto, se puede decir que se encuentra relativamente estable en función del rango de pH (Weil & Brady, 2017). Con lo anterior podemos concluir que, con relación a los valores de pH, ordenando los sistemas en cuanto a pH es PAS>SSP>BMM>SAF.

Conductividad eléctrica (CE)

La CE mostró valores de 0.13 a 0.27 dS/m clasificando a los suelos como no salinos a moderadamente salinos, en la comparación de medias hubo diferencias significativas entre sistemas ($p < 0.05$), SAF fue estadísticamente diferente BMM y SSP. Estos resultados concuerdan con un estudio realizado en sistemas agroforestales de café donde obtuvieron valores similares clasificados como suelos no salinos, con valores que oscilan de 0.04 a 0.18 (dS/m) (Acosta Trinidad et al., 2025). Otro estudio reporta valores de 0.28 y 0.14 (dS/m) similares a los de la presente investigación (Martínez Atencia, 2019).

Por otro lado, otros autores como Vásquez et al. (2021) mencionan que la CE puede variar dependiendo de la profundidad y que este comportamiento se atribuye a una mayor acumulación de MO, nutrientes y actividad biológica. En pastizales ocurre lo opuesto donde la CE aumenta con la profundidad, debido a mayor contenido de limos y a la dinámica de acumulación de sales en horizontes inferiores (Cantú Silva et al., 2018). Estas diferencias sugieren que la textura del suelo, el manejo y el tipo de cobertura vegetal pueden modificar el comportamiento de la CE.

Diversos estudios señalan que la CE puede variar en función de la profundidad del suelo, debido a cambios en la acumulación de MO, nutrientes y actividad biológica. Generalmente, los horizontes superficiales presentan mayores valores de CE por la acumulación de residuos orgánicos y actividad microbiana, mientras que en algunos pastizales puede aumentar con la profundidad debido al contenido de limos y acumulación de sales en horizontes inferiores (Cantú Silva et al., 2018; Vásquez et al., 2021). Estas diferencias sugieren que la textura, el manejo y la cobertura vegetal modifican significativamente el comportamiento de la conductividad eléctrica.

De acuerdo con los valores obtenidos se puede concluir que, con relación a los valores de CE, ordenando los sistemas considerando que valores bajos son

mejores el orden es BMM>SSP>PAS>SAF, aunque se sabe que en los suelos ácidos no se tiene problemas de salinidad debido a que ocurre un lavado de sales.

Materia orgánica (MO)

La concentración de Materia orgánica (MO) mostró valores de 8.62 a 11.30 % y de acuerdo a la norma NOM-021-RECNACT-2000 los sistemas presentan altas concentraciones de MO, diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($p<0.05$), en donde BMM fue diferente de PAS.

Un estudio realizado por Cantú Silva et al. (2018), en suelos del noreste de México, reporta valores de MO altos en BMM y sistemas agroforestales de café con valores de 14.41 y 11.31 % similar al presente estudio y esto se traduce a que cuando se presentan mayores concentraciones de MO por diversidad florística, se acumula constantemente hojarasca, las condiciones de humedad son altas y hay menor perturbación del suelo (Williams-Linera, 2015). En los sistemas silvopastoriles la conservación de la MO del suelo se da gracias al aporte de residuos vegetales, raíces arbóreas y al ciclaje de nutrientes generado por la presencia de árboles, mientras que en pastizales el contenido de materia orgánica es menor por los procesos de compactación, erosión o el manejo intensivo del pastoreo (Yáñez Díaz et al., 2023).

Por lo anterior, ordenando los sistemas considerando que el que tiene mayor valor es el mejor es BMM>SAF>SSP>PAS. Los menores contenidos de materia orgánica observados en el pastizal y BMM pueden atribuirse a las diferencias en la estructura y complejidad de la vegetación.

Nitrógeno Total (NT)

La concentración de NT presentó valores de 0.56 a 0.23 %, valores que van de alto a muy altos de acuerdo a la norma. La comparación de medias mostró diferencias significativas entre los sistemas ($p<0.05$), siendo el SAF estadísticamente diferente del PAS. En cuanto a la concentración de Nmin mostró

valores de 29.33 a 21.33 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas entre las medias de SAF y SSP únicamente ($p < 0.05$). Valores similares de NT fueron reportados en un sistema de producción de café tradicional donde el porcentaje fue el mismo de 0.57 % que en el SAF del presente estudio y en BMM obtuvo un porcentaje mayor de 0.72 %, siendo el valor más alto. Los valores de NT presentaron una mayor variación en comparación con el Nmin, aunque algunos sistemas mostraron mayores concentraciones de NT, el Nmin se mantuvo relativamente estable, lo cual indica que solo una pequeña fracción del nitrógeno total se encuentra disponible para las plantas en forma de amonio y nitrato. Diversos estudios han señalado que esta dinámica puede estar influenciada por procesos biológicos de mineralización, actividad microbiana y de las condiciones fisicoquímicas del suelo, al igual que el contenido de MO y pH (Zagal et al., 2002).

Por lo anterior el orden en que quedarían en cuanto a mejor concentración de NT sería, SAF>PAS>BMM>SSP y en Nmin sería SAF>BMM>PAS>SSP.

El NO mostró diferencias significativas entre tratamientos, con valores que oscilan de 0.56 a 0.23 mg kg⁻¹. El SAF fue distinto de PAS, BMM y SSP, mientras que BMM y SSP fueron iguales. Diversos autores señalan que la disponibilidad de nitrógeno depende de procesos de mineralización, asociado a las partículas finas del suelo (arcilla y limo) llevados a cabo por los microorganismos del suelo, mediante estos procesos, el nitrógeno orgánico es transformado a formas minerales disponibles para las plantas, lo cual no solo depende de la textura sino también del grado de saturación de la MO presentes en las partículas minerales (Matus & Maire G., 2000).

Por lo anterior el orden del mayor a menor concentración de NO es SAF>PAS>SSP>BMM.

Amonio (NH_4^+)

La concentración de Amonio nos muestra valores de 9.00 a 12.25 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas entre sistemas ($p < 0.05$). SAF, fue diferente de PAS y PAS fue diferente de BMM. El amonio constituye una de las principales formas de Nmin disponible para las plantas y está influenciado por contenidos de MO, la textura, la CIC. De acuerdo a Nieder et al. (2011) menciona que el amonio puede permanecer adsorbido temporalmente en minerales arcillosos y posteriormente liberarse a la solución del suelo, favoreciendo su disponibilidad para las plantas. Diversos estudios en café agroforestal muestran que se acumula más N inorgánico (incluido amonio) que en bosques o monocultivos, esto debido a que hay mayor contenido de MO y actividad microbiana (Soilueang et al., 2023). Por otro lado, en Sistemas silvopastoriles el NT y la biomasa microbiana aumentan mientras que el amonio disminuye como fue el caso en este estudio, el SSP tiene menor contenido de amonio en comparación con los demás sistemas (Barros et al., 2018).

En conclusión, se puede decir que, los sistemas presentan un adecuado contenido de N amoniacal, donde el tipo de uso de suelo está modulando como se produce y consume el amonio, en este contexto, sistemas agroforestales contribuyen a una mejor fertilidad y menores pérdidas de Nitrógeno.

En este contexto, se puede concluir que el orden de la mayor a menor concentración de Amonio es SAF>BMM>SSP>PAS.

Nitratos (NO_3^-)

Las concentraciones de nitratos oscilan de 10.50 a 17.91 mg kg^{-1} mostrando diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p < 0.05$). El PAS obtuvo el valor más alto y en menor concentración el SSP.

Un estudio realizado por Torres et al., (2020) obtuvo valores de 1.92 a 17.55 mg kg^{-1} muy similares a los del presente estudio, en un bosque obtuvo valores de 4.3 a 4.5 mg kg^{-1} , mientras que en pasturas valores de 2 a 9 mg kg^{-1} .

El pastizal presentó altas concentraciones de nitratos, lo que podría estar asociado a una mayor tasa de mineralización y nitrificación favorecida por condiciones de mayor exposición solar y temperatura del suelo (Elrys et al., 2023). También la presencia del ganado puede aumentar la disponibilidad de nitrógeno mediante la incorporación de excretas que favorecen la formación de nitratos. Caso contrario puede suceder en los sistemas agroforestales y bosques donde parte del nitrógeno puede concentrarse inmovilizado en la biomasa arbórea (Liu et al., 2020). El SSP, es un sistema más conservador con menor concentración de nitratos, debido a la absorción de N por pasto, árboles y condiciones que lo limitan como fertilización o nitrificación (Mettauer et al., 2024). El orden en cuanto a concentración de nitratos fue PAS>>BMM>SAF>SSP.

Fósforo (P)

La concentración de P dio valores de 1.48 a 18.06 mg kg^{-1} , mostrando en la prueba de Tukey diferencias significativas ($p < 0.05$). Siendo el SAF de menor concentración y el PAS con el mayor valor. PAS presentó diferencias significativas respecto a SAF.

Diversos estudios demuestran que la intensificación hacia pasturas aumenta el contenido de P disponible, debido a varias razones, ya sea por fertilización, el contenido de estiércol y reciclaje de nutrientes dado en el sistema (Ferreira et al., 2022). Varios estudios realizados en SAF demuestran que la mayor

concentración de MO, raíces finas y C orgánico favorecen la acumulación de P orgánico y recalcitrante. Asimismo, en SAF se conserva mejor la concentración de P y carbono en el suelo, aun con menor disponibilidad de P extraíble inmediato (Ferreira et al., 2022).

En este contexto, se puede concluir que el orden del mejor al peor en cuanto a concentración de P es PAS>SSP>BMM>SAF.

Potasio (K)

Los valores de las concentraciones de K oscilan de 75.85 a 531.36 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas entre tratamientos. En la prueba de comparación de medias si hubo diferencias significativas entre los sistemas ($p < 0.05$). PAS fue diferente de SAF, BMM y SSP. En los suelos agrícolas y ganaderos, el contenido de K disponible puede variar en rangos similares o mayores según el uso del suelo (Guillaume Blanchet et al., 2017). Aunque en algunos estudios los SSP y SAF pueden favorecer la conservación de nutrientes, en este estudio el pastizal presentó el mayor contenido de K, esto puede atribuirse que la presencia de árboles no siempre incrementa el K disponible y que su efecto depende del sistema. En sistemas silvopastoriles y agroforestales tienden a mejorar o mantener la concentración de K en contraste con los pastizales, en algunos casos un monocultivo tiene mayor concentración de K intercambiable que en sistemas silvopastoriles, esto debido a la exportación de K en la biomasa arbórea (Santos et al., 2021).

La concentración de K suele estar estrechamente relacionada con la profundidad y la textura del suelo. Los suelos más arenosos y degradados pierden mayores cantidades de K si no hay cobertura vegetal y reciclaje de nutrientes (Saucedo-Uriarte et al., 2025). Mientras que suelos arcillosos tienden a aumentar el K intercambiable y no intercambiable; por el contrario, suelos con alto contenido de arenas menos presentan mayores pérdidas de K (Akbas et al., 2017).

Los iones intercambiables K, Ca y Mg mantienen una estrecha relación con el pH. En pastizales cuando el pH es ácido el K disponible se mantiene en niveles

medios. Esta acidez limita el rendimiento y la disponibilidad de nutrientes lo cual aumenta la toxicidad. En el presente estudio, el pH fue ligeramente ácido, donde de acuerdo con la literatura un pH óptimo de 6.0 a 6.5 favorece la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, valores fuera de este rango pueden disminuir la disponibilidad de algunos elementos y favorecer la fijación P y K (Paramisparam et al., 2021).

Aunque la literatura no reporta rangos óptimos para todos los sistemas agroforestales, en los distintos usos del suelo, para algunos cultivos el rango óptimo es de 130 a 170 mg kg⁻¹. El orden en cuanto a concentración de mayor a menor es PAS>BMM>SAF>SSP.

Calcio (Ca)

Las concentraciones de Ca mostraron valores de 855.9 a 1188.8 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas entre los sistemas ($p<0.05$). El SAF obtuvo el menor valor de Ca, mientras que el PAS tuvo el valor más alto. SSP fue diferente de SAF, y PAS. Estos resultados indican un nivel medio a alto de fertilidad cálcica, con variación entre sistemas. PAS presentó mayor concentración de Ca, lo cual puede deberse al ciclaje de nutrientes, acumulación de residuos y dinámica de bases intercambiables dentro del sistema (Reis et al., 2010).

Caso contrario sucede en el SAF con menor concentración de Ca. Algunos sistemas agroforestales pueden mostrar Ca inferior si hay mayor extracción en los cultivos, menor aporte de residuos ricos en Ca o más lixiviación en suelos ácidos o con menor CIC, características de ecosistemas forestales (V et al., 2023). De acuerdo con Granados Sánchez et al. (2010) en bosques el Ca puede perderse por lixiviación debido a la elevada precipitación y la acción de ácidos orgánicos.

En este contexto, se puede decir que el orden del mayor al menor contenido de Ca es PAS>SSP>BMM>SAF.

Magnesio (Mg)

La concentración de Mg mostró valores de 1323.7 a 3758 mg kg⁻¹ mostrando diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p < 0.05$). El SSP obtuvo el mayor valor, mientras que SAF tuvo el menor valor en Mg. Estos datos indican una reserva importante de Magnesio en el suelo. Varios estudios demuestran que en sistemas silvopastoriles aumenta la concentración de Mg intercambiable y la saturación de bases respecto a pasturas tradicionales, al combinar árboles, pasto y prácticas de manejo (Jiménez et al., 2025).

Otro estudio menciona que cuando se pasó de pastura a SSP elevó significativamente las concentraciones de Ca, Mg y la saturación de bases de 17 a 55 % (Olaya-Montes et al., 2020). Esta relación coincide con este estudio, donde sistemas silvopastoriles pueden mejorar la reserva de bases y la calidad química del suelo frente a sistemas sin árboles o con menor manejo (Moreno-Perez et al., 2025).

En SAF pueden registrar menor concentración de Mg cuando existe mayor extracción de biomasa comercial, menor aporte de residuos ricos en bases, pero manteniendo la calidad química general. En este contexto podemos concluir que, el orden del mayor a la menor concentración de Mg es SSP>PAS>BMM>SAF.

Sulfatos (SO₄)

La concentración de sulfatos con valores de 2.70 a 13.89 mg kg⁻¹, presentando diferencias significativas entre SSP con BMM y PAS de acuerdo a la prueba Tukey ($p < 0.05$). PAS tuvo menor valor, mientras que SSP obtuvo el mayor valor. Estos resultados colocan a los suelos dentro de los valores reportados en muchos sistemas agrícolas y de distintos usos, en donde la concentración de sulfatos oscila entre 3 y 25 mg kg⁻¹ (Suri et al., 2021). Valores cercanos a 3 mg kg⁻¹ se aproximan a niveles bajos potencialmente limitantes en varios estudios (Santos Rheinheimer et al., 2005). Los valores cercanos a 14 mg kg⁻¹ son medios del rango óptimo, compatibles con una disponibilidad moderada de S, similar a

suelos con mayores concentraciones de MO o mejor manejo nutricional (Gottwald et al., 2022).

La disponibilidad de sulfatos en el suelo, está relacionada con la dinámica de la MO y actividad microbiana, derivado de a que gran parte del azufre del suelo se encuentra en formas orgánicas que deben mineralizarse para convertirse en disponibles para ser aprovechadas por las plantas. Factores como el pH la textura y la lixiviación influyen en este mecanismo y retención de sulfatos (Paniagua-Vargas & García-Oliva, 2023).

Ordenando del mayor al menor en cuanto a concentración de sulfatos queda así, SSP>SAF>BMM>PAS.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La CIC mostró diferencias significativas en la prueba Tukey ($p<0.05$), con valores que oscilan de 12.44 a 19.09 cmol (+) kg⁻¹. En la prueba de medias de Tukey hubo diferencias significativas ($p<0.05$) PAS con SSP y SAF. El valor mayor de CIC corresponde a PAS mientras que el menor valor lo obtuvo SAF. De acuerdo a a la NOM-021-RECNAT-2000, los valores de CIC son medios. La CIC es una propiedad que depende de la textura del suelo y la concentración de MO. Entre mayor sea el valor de arcillas y MO, la CIC es mayor (Approach, 2005).

En casi todos los suelos la CIC se eleva cuando el pH aumenta. Un estudio desataca que la implementación de SSP favorece la acumulación de MO y CIC entre el 25 y 29 % más que en monocultivos (Luis Contreras-Santos et al., 2023). Los suelos con mayor CIC tienen mayor capacidad de almacenar nutrientes y liberarlos para las plantas, lo cual impide pérdidas por lixiviación, como es el caso de PAS que tiene valores altos de CIC, por lo que tiene mayor capacidad de retención de nutrientes (Weil & Brady, 2017).

Entonces podemos concluir que el orden del mayor a menor concentración es PAS>SSP>BMM>SAF.

Fierro (Fe)

La concentración de Fe mostró valores de 32.20 a 124.12 mg kg⁻¹ indicando diferencias significativas entre los sistemas PAS con BMM y con SAF en la prueba Tukey ($p < 0.05$). Las mayores concentraciones se registraron en PAS, mientras que SAF obtuvo valores más bajos.

La concentración de Fe en sistemas agroforestales, bosques y pastizales, está relacionado con diversos factores tales como, el pH, la concentración de MO, la humedad, la aireación, la textura y el grado de perturbación del suelo (Moreno-Galván et al., 2023).

La bajas concentración de Fe en el SAF se relaciona con el pH y con en el aumento de Zinc debido a la adsorción de coloides orgánicos (Marín et al., 2017). De igual manera en BMM se ve favorecida la disponibilidad de Fe especialmente en condiciones de pH ácido, como en el caso del presente estudio, donde el pH es ácido y oscila entre los 5 y 6 (Weil & Brady, 2017). En este contexto, el orden del mejor al peor es PAS>SSP>BMM>SAF.

Cobre (Cu)

La concentración de Cu con valores de 0.66 a 3.06 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas entre sistemas ($p < 0.05$). SSP mostró diferencias con PAS, BMM y SAF. La mayor concentración la obtuvo SSP, mientras que el menor valor corresponde a SAF. Las concentraciones de Cu son necesarias para la producción, pero en concentraciones muy elevadas puede alterar la actividad microbiana y la funcionalidad del suelo (J.L.A. Shaw et al., 2020).

Luis Cabrera et al. (2014) mencionan que en sistemas agroforestales las concentraciones de Fe, Cu, Zn y Mn pueden variar conforme cambia la dinámica del suelo y la absorción de nutrientes por las plantas. Ellos mencionan que a través del tiempo existe una disminución de algunos micronutrientes, debido al establecimiento vegetal y reciclaje de nutrientes, lo que evidencia la influencia del

al manejo y cobertura vegetal sobre la disponibilidad de micronutrientes en el suelo.

La baja concentración de Cu observada en SAF podría relacionarse con proceso de lixiviación ya que se encuentra en una zona de pendiente, donde la capacidad de adsorción puede ser menor. Por otro lado, las altas concentraciones de Cu como en SSP y PAS pueden relacionarse con una mayor retención de los micronutrientes debido a valores altos de arcillas, MO y reciclaje de nutrientes. En cuanto al orden de las concentraciones de Cu podemos decir que, el orden es SSP>PAS>BMM>SAF.

Zinc (Zn)

La concentración de Zn mostró de 0.8 a 3.42 mg kg⁻¹, mostrando diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p<0.05$), SSP con SAF y BMM. Estos resultados indican la influencia del uso y manejo de este micronutriente. Los sistemas con mayor concentración de Zn suelen asociarse a altos valores de MO, y una mejor capacidad de retención de nutrimentos. Asimismo, partículas más finas del suelo, especialmente las arcillas que ayudan a la adsorción y retención de Zn (Mares et al., 2006). Al hacer una breve comparación sobre lo que dice este autor, el incremento de la concentración de Zn coincide con mayores concentraciones de MO y arcillas. En cuanto al contenido de arcillas, los resultados coinciden con lo reportado por el autor, ya que el PAS presentó el valor más alto, lo que indica una mayor proporción de este componente en comparación con los otros sistemas.

Por lo dicho anteriormente, el orden de la mayor a menor concentración en cuanto a concentración de Zn es SSP>PAS>SAF>BMM.

Manganeso (Mn)

Las concentraciones de Mn mostraron valores de 6.59 a 116.18 mg kg⁻¹, indicando diferencias significativas entre sistemas en la prueba de Tukey

($p < 0.05$), PAS con SSP y BMM. PAS obtuvo la mayor concentración de Mn y SAF la menor concentración.

De acuerdo con Simon Mundus et al. (2012) las concentraciones de Mn están estrechamente relacionados con la textura, aireación, MO puesto que alteran la disponibilidad de Mn para las plantas. La deficiencia primaria de la concentración de Mn en el suelo está presente en suelos arenosos, donde ocurre lixiviación y pérdida de Mn soluble en la solución del suelo. La concentración de Mn también está relacionada fuertemente con el pH, aumentando su disponibilidad en suelos ácidos como ocurre en el presente estudio. Asimismo, condiciones de humedad y anaerobiosis favorecen la disponibilidad de Mn al igual que el contenido de MO (Rolón Galeano et al., 2022).

En este sentido el orden del mejor al peor en cuanto a contenido de Mn sería PAS>SSP>BMM>SAF.

Boro (B)

La concentración de B, con valores de 0.13 a 0.41 mg kg⁻¹, no mostró diferencias significativas entre sistemas en la prueba Tukey ($p < 0.05$). SAF tuvo la concentración más alta de B, mientras que SSP obtuvo el menor valor. La concentración de B en el suelo depende de diversos factores como la MO, la textura, pH y condiciones de lixiviación. Generalmente está controlada por reacciones con superficies adsorbentes que incluyen óxidos de aluminio y hierro, hidróxido de magnesio, minerales de arcilla, carbonato de calcio y MO (Malavé Acuña, 2005). En este contexto, cuando las concentraciones de B son bajas, hay escasa MO, en suelos arcillosos y con mayor MO retienen más el micronutriente. Por otro lado, en suelos arenosos existe mayor pérdida de B debido a la lixiviación.

Podemos concluir que el orden del mejor al peor sería de esta manera, SAF>BMM>PAS>SSP.

3.6. Conclusiones

Los diferentes usos de suelo en la Microcuenca Dos Puentes (Sistema agroforestal, Pastizal, Bosque Mesófilo de Montaña y Sistema Silvopastoril) mostraron diferencias significativas en la mayoría de las propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual indica que el manejo y la cobertura vegetal son factores determinantes del estado funcional del recurso edáfico en la microcuenca.

En términos físicos, el SSP mostró las condiciones más favorables para la conservación de humedad y estructura presentando menor DA, mayor CC, bajo PMP, mayor porosidad. Mientras tanto, SAF, PAS y BMM registraron valores menos favorables asociados a compactación y almacenamiento hídrico.

En cuanto a las propiedades químicas, los usos distintos de suelo mostraron diferencias importantes, sistema que presento las mejores concentraciones fue PAS seguido de SAF en cuanto a pH, Nitratos, P, K, Ca, CIC, Fe y Mn. Asociadas a la textura más fina y procesos de acumulación o manejo que favorecen esos elementos. Mientras que BMM y SSP mostraron concentraciones menores.

El SAF y BMM mostraron mayores contenidos de MO y NT, señalando mayor reciclaje de nutrientes y mejores condiciones de fertilidad biológica en sistemas con mayor cobertura arbórea. Por su parte, PAS y SSP presentaron concentraciones más altas de P, K y varios micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn) posiblemente asociadas a diferencias texturales, dinámica de nutrientes manejo del sistema. En cuanto a la CIC, PAS presentó el mayor valor, lo que indica mayor potencial de retención de nutrientes.

Los valores de pH y CE variaron entre sistemas reflejando diferencias en disponibilidad y dinámicas de nutrientes.

El sistema silvopastoril registró la DA más alta con 1.09 g.cm^{-3} , además menor CC y PMP, con 41.55 y 31.54 % respectivamente. Esto sugiere un suelo con mayor compactación y menor retención de humedad, posiblemente asociado al

pisoteo del ganado y a una menor protección del suelo. Aunque este sistema presentó mayor EA, con un 87.11 %, estos valores no compensan completamente la menor capacidad de almacenamiento hídrico observada en otras variables físicas.

El pastizal y el Bosque Mesófilo de montaña mostraron valores intermedios, aunque el BMM tendió a mantener mejores condiciones físicas que el pastizal en variables como DA, PMP y CH. El pastizal destacó más por sus altos contenidos de nitratos, fósforo, potasio, Calcio, capacidad de intercambio catiónico, Fierro y magnesio.

Por lo anterior podemos decir que el mejor sistema en cuanto al mejor estado de las propiedades físicas es el sistema silvopastoril y en cuanto a propiedades químicas el que tuvo las mejores concentraciones fue el pastizal.

Los resultados muestran que los sistemas con mayor cobertura vegetal y manejo más conservacionista tienden a mantener mejores condiciones del suelo, mientras que los sistemas con mayor presión de uso o menor protección superficial presentan señales de degradación física o desequilibrio químico. Esto respalda la importancia de promover prácticas agroforestales como una alternativa sostenible para conservar y mejorar la calidad del suelo en la microcuenca Dos Puentes.

3.7. Literatura citada

- Acosta Trinidad, L. T., Acosta Huaman, G. C., Arizapana Soto, N., Victorio Piedra, C. A., Davila Ordaya, A., & Cespedes Ratto, J. B. (2025). Relación entre características químicas del suelo y desarrollo vegetativo del cafeto en diferentes arreglos agroforestales. *Revista Alfa*, 9(26), 380–397. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.353>
- Akbas, F., Gunal, H., & Acir, N. (2017). Spatial variability of soil potassium and its relationship to land use and parent material. *Soil and Water Research*, 12(4), 202–211. <https://doi.org/10.17221/32/2016-SWR>
- Approach, A. I. (2005). *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*.
- Ardila-Garcia, V., Plazas-Navarro, L. P., & Vallejo, V. E. (2022). Conservation Agriculture as a Potential Strategy to Increase Soil Quality in Colombian Agroecosystems. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 23(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2674
- Barra, E., Gaistardo, C., & Lancho, G. (2024). LA DEGRADACIÓN DEL SUELO Y EL FUTURO DE LA HUMANIDAD SOIL DEGRADATION AND THE FUTURE OF HUMANITY. *Revista MIX-TEC*, 4(6), 28–39.
- Barros, F. M. do R., Fracetto, G. G. M., Fracetto, F. J. C., Mendes Júnior, J. P., Araújo, V. L. V. P. de, & Lira Junior, M. A. (2018). Silvopastoral systems drive the nitrogen-cycling bacterial community in soil. *Ciência e Agrotecnologia*, 42(3), 281–290. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018423031117>
- Camacho-Tamayo, J. H., Rubiano Sanabria, Y., & Santana, L. M. (2013). Management units based on the physical properties of an Oxisol. In *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (Vol. 13, Number 4).
- Cantú Silva, I., Díaz García, K. E., Yañez Diaz, M. I., Gonzalez Rodriguez, H., & Martínez Soto, R. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.153>
- Echeverría Pérez, E. G., Castañeda Hidalgo, E., Robles, C., Martínez Gallegos, V., Santiago Martínez, G. M., & Rodríguez-Ortiz, G. (2023). INDICADORES DE CALIDAD COMO HERRAMIENTAS ÚTILES PARA EVALUAR EL ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(1). <https://doi.org/10.60158/rma.v10i1.376>

- Elrys, A. S., Uwiragiye, Y., Zhang, Y., Abdel-Fattah, M. K., Chen, Z. xiong, Zhang, H. min, Meng, L., Wang, J., Zhu, T. bin, Cheng, Y., Zhang, J. bo, Cai, Z. cong, Chang, S. X., & Müller, C. (2023). Expanding agroforestry can increase nitrate retention and mitigate the global impact of a leaky nitrogen cycle in croplands. *Nature Food*, 4(1), 109–121. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00657-x>
- Escobar Montenegro, A. del C., Bartolomé Filella, J., & González Valdivia, N. A. (2017). Estudio comparativo macrofauna del suelo en sistema agroforestal, potrero tradicional y bosque latifoliado en microcuenca del trópico seco, Tomabú, Nicaragua. *FAREM-Estelí. Medio Ambiente, Tecnología y Desarrollo Humano*, 11.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suarez, J. J., Suárez, A., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO PARA EVALUAR SU FERTILIDAD SOIL QUALITY INDICATORS TO EVALUATE SOIL FERTILITY. *Agrociencia*, 51, 813–831.
- Fernández Ojeda, P. R., Acevedo, D. C., Morales, A. V., & Uribe Gómez, M. (2016). State of the essential chemical elements in the soils of natural, agroforestry and monoculture systems. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77.
- Ferreira, A. C. F., Andrade, F. V., Mendonça, E. de S., & da Rocha Júnior, P. R. (2022). Land use and altitude: how do they influence the phosphorus fractions? *Acta Scientiarum - Agronomy*, 44. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.54801>
- Furcal-Berguete, P., Robles-Arguello, Z., & Salazar-Díaz, R. (2023). Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestales con Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tecnología En Marcha*, 36 N°2, 20–31.
- Gallegos-Fonseca G, Rojas-González, E., & Leal-Vaca, J. C. (2011). Conductividad hidráulica de una arena limosa obtenida a partir de la curva característica Hydraulic Conductivity of a Silty Sand Obtained from the Soil Water Characteristic Curve. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3, 285–290.
- González, A., Rodríguez, G., & Fábrega Duque, J. (2021). Impacto de la cobertura boscosa y uso de suelo sobre la textura y conductividad hidráulica del suelo en la subcuenca del río Estibaná. *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, 257–262. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3194>
- Gottwald, F.-T., Hossain, A., Mahmoud, E. A., Meena, V. S., Meena, S. K., Dwivedi, B. S., Meena, M. C., Datta, S. P., Singh, V. K., Mishra, R. P., & Chakraborty, D. (2022). *Long-term nutrient management in an intensive*

rice-wheat cropping system improves the quantities, qualities, and availability of soil sulfur. <http://www.fao.org>

Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). LA LLUVIA ÁCIDA Y LOS ECOSISTEMAS FORESTALES. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 16(2), 187–206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022>

Guillaume Blanchet, Zamir Libohova, Stéphane Joost, Nicolas Rossier, André Schneirder, Bernard Jeangros, & Sokrat Sinaj. (2017). *Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland*. 290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.002>

INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Huatusco Veracruz de Ignacio de la Llave*. www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia

Jiménez, L., Capa-Mora, D., Fierro, N., Lasso, J., Roa, J., Bermeo, J., & Merino, J. (2025). Uncovering the Potential of Carbon Stocks and Nutrients in Livestock Systems in Zamora Chinchipe. *Applied and Environmental Soil Science*.

J.L.A. Shaw, J.G. Ernakovich, J.D. Judy, M. Farrell, M. Whatmuff, & J. Kirby. (2020). *Long-term effects of copper exposure to agricultural soil function and microbial community structure at a controlled and experimental field site*.

Luis Cabrera, J. C., Efraín Muñoz, H. A., & Alberto Vélez, J. L. (2014). *Evaluation of some soil chemical properties in a settlement agroforestral Morella pubescens H.B.K And Lupinus mutabilis L. Pasto, Nariño*.

Luis Contreras-Santos, J., Martínez-Atencia, J., Luis Rodríguez-Vitola, J., Barragán-Hernandez, W., Garrido-Pineda, J., & Katherine Falla-Guzman, C. (2023). *Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia Soil Quality Index for Agricultural Systems in the Tropical Dry Forest-Colombia*. <https://doi.org/10.28940/terra>

Malavé Acuña, A. (2005). *Los suelos como fuente de boro para las plantas Soils as boron source for plants*.

Mares, F. M., Jasso Mata, J., Palma-López, D. J., Salgado García, S., & González Hernández, V. A. (2006). DINÁMICA DE MATERIA ORGÁNICA. In *Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 29, Number 3).

Márquez, F. R., Quispe, P., Molleapaza, N., Cabrera, S., & Peña, J. (2020). Relationship between soil characteristics and altitude with the sensory quality of coffee grown under agroforestry systems in Cusco, Peru. *Scientia*

- Martínez Atencia, J. (2019). *EVALUACIÓN INTEGRAL DE SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO EN DOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE SUCRE*.
- Matus, F. J., & Maire G., C. R. (2000). RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO, TEXTURA DEL SUELO Y TASAS DE MINERALIZACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO. *Agricultura Técnica*, 60(2). <https://doi.org/10.4067/S0365-28072000000200003>
- Mettauer, R., Beule, L., Bednar, Z., Malige, M., Godinot, O., & Le Cadre, E. (2024). Influence of two agroforestry systems on the nitrification potential in temperate pastures in Brittany, France. *Plant and Soil*, 494(1–2), 651–667. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06309-8>
- Moreno-Galván, A. E., Romero-Perdomo, F., Pardo-Díaz, S., Dávila-Mora, L. L., Castro-Rincón, E., Rojas-Tapias, D. F., & Estrada-Bonilla, G. A. (2023). Long-term implementation of a silvopastoral system enhances soil P availability and bacterial diversity. *Geoderma*, 433. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116458>
- Moreno-Perez, C., Mora-Motta, D., Ortiz-Morea, F. A., Blesh, J., & Silva-Olaya, A. M. (2025). Transitioning from extensive pastures to silvopastoral systems improves multiple soil ecosystem services in Colombian Amazon. *Science of the Total Environment*, 974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179185>
- Nieder, R., Benbi, D. K., & Scherer, H. W. (2011). Fixation and defixation of ammonium in soils: A review. In *Biology and Fertility of Soils* (Vol. 47, Number 1, pp. 1–14). <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0506-4>
- NOM-021-RECNAT-2000. (n.d.). *NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*.
- Núñez, M. R., Serrano, B. J., Jimenez, H. A., Benítez, O. M., Paredes, G. J., Aguilar, G. R., Guerra, O. H., & Ortega, A. J. (2011). EFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE LA LLANURA COSTERA NORTE DE NAYARIT, MÉXICO. In *Revista Bio Ciencias Julio* (Vol. 1).
- Nuñez-Peñaloza, J. L., Cristóbal-Aceved, D., Acosta, E. H., & Villanueva-Morale, A. (2022). Effect of three production systems on the physical fertility status of the soil. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 55–81. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279>

- Olaya-Montes, A., Llanos-Cabrera, M. P., R. Cherubin, M., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Moreno, F., & Silvia-Olaya, A. (2020). Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. *Ecological Geochemistry and Land Conservation*, 32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.3832>
- Omar Hernández Ordoñez, J., Del Carmen Gutiérrez Castorena, M., Carlos, ‡, Solorio, A. O., Guzmán, P. S., & Cervantes, E. Á. (2017). The quality of Andosols under forestry, agroforestry and agricultural management in Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 12.
- Orellana Salas, J. A., & Llvay Portilla, T. (2018). Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador Use and importance of the natural resources and their impact on tourism development. Case of Chilla Canton, El Oro, Ecuador. *Tatiana Lalvay Portilla*, 14, 65–79.
- Paniagua-Vargas, A., & García-Oliva, F. (2023). La mineralización e inmovilización microbiana determinan la dinámica del azufre en el suelo. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.523>
- Paramisparam, P., Ahmed, O. H., Omar, L., Ch'ng, H. Y., Johan, P. D., & Hamidi, N. H. (2021). Co-application of charcoal and wood ash to improve potassium availability in tropical mineral acid soils. In *Agronomy* (Vol. 11, Number 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102081>
- Pérez Gómez, L. N., & García, G. A. (2015). *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA FACULTAD DE AGRONOMÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA*.
- Pulido, S. J. B., Silva, I. C., Díaz, M. I. Y., & Robles, E. O. L. (2020). Moisture retention curves and pedotransfer models in Andosol under different land uses. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Quiroga, A., Oderiz, A., Uhaldegaray, M., Alvarez, C., Scherger, E., Fernández, R., & Frasier, L. (2017). INFLUENCE OF USE OF SOIL ON PHYSICAL INDICATORS COMPACTION. *Semiárida: Revista de La Facultad de Agronomía UNLPam*, 26(2). [https://doi.org/10.19137/semiarida.2016\(02\).19-26](https://doi.org/10.19137/semiarida.2016(02).19-26)
- Ramachandran Nair, P. K., Nair, V. D., Mohan Kumar, B., & Showalter, J. M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. In *Advances in Agronomy* (Vol. 108, Number C). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)

- Ramírez-Builes, V. H. (2007). *LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL TRÓPICO Y LA FERTILIDAD DEL SUELO*.
- Reis, G. L., Lana, Â. M. Q., Maurício, R. M., Lana, R. M. Q., Machado, R. M., Borges, I., & Neto, T. Q. (2010). Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant and Soil*, 329(1–2), 185–193. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0144-5>
- René Fernández Ojeda, P., Acevedo, D. C., Morales, A. V., & Uribe Gómez, M. (2016). State of the essential chemical elements in the soils of natural, agroforestry and monoculture systems. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77.
- Rolón Galeano, M. P., Ortiz Grabski, C. E. A., Rolón Paredes, G. A., Leguizamón Rojas, C. A., Fatecha Fois, D. A., & Rasce Alvarez, J. W. (2022). Disponibilidad de manganeso en suelos de la región oriental del Paraguay. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica*, 6(1), 58–69. [https://doi.org/10.36003/rev.investig.cient.tecnol.v6n1\(2022\)5](https://doi.org/10.36003/rev.investig.cient.tecnol.v6n1(2022)5)
- Santos, A. C. dos, Rodrigues, M. O. D., Santos, J. G. D. dos, Nóbrega, E. B. da, Leite, R. da C., & Rodrigues, M. O. D. (2021). Temporal variability of soil chemical properties under conventional and silvopastoral cultivation systems. *Research, Society and Development*, 10(5), e4910514589. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14589>
- Santos Rheinheimer, D. dos, Rasche Alvarez, J. W., Osorio Filho III, B. D., Leandro Souza da Silva, & Campanhola Bortoluzzi, E. (2005). *Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada*.
- Saucedo-Uriarte, J. A., Ampuero-Trigoso, G., Pasquel-Barzola, K. K., Quispe-Ccasa, H. A., Chuquimia-Valdez, D. S., & Arévalo-Aranda, Y. G. (2025). Effect of silvopastoral systems with integrated forest species from the Peruvian tropics on the soil chemical properties. *Open Agriculture*, 10(1). <https://doi.org/10.1515/opag-2025-0434>
- Sharma, K. L., Mandal, U. K., Srinivas, K., Vittal, K. P. R., Mandal, B., Grace, J. K., & Ramesh, V. (2005). Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.002>
- Simon Mundus, Enzo Lombi, Peter E. Holm, Hao Zhang, & Søren Husted. (2012). *Assessing the plant availability of manganese in soils using Diffusive Gradients in Thin films (DGT)*. 92–99.
- Soilueang, P., Jaikrasen, K., Chromkaew, Y., Buachun, S., Yimyam, N., Sanjunthong, W., Kullachonphuri, S., Wicharuck, S., Mawan, N., & Khongdee, N. (2023). Dynamics of soil nitrogen availability following

- conversion of natural forests to various coffee cropping systems in northern Thailand. *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22988>
- Suri, D., Sharma, V. K., Kumar, P., Upadhayay, R. G., Nazir, G., & Anjali. (2021). Sulphur Dynamics under different land uses of Outer Himalayan region of Himachal Pradesh. *Environment Conservation Journal*, 22(3), 265–270. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2021.22331>
- Torres, C. M., Pinheiro, A. D. D. S., Hungria, L. C. da, El-Husny, J. C., Sacramento, P. P., & Andrade, I. P. (2020). Inorganic Nitrogen Fractions in Soil Under Different Uses and Management Systems in the Brazilian Eastern Amazon. *Journal of Agricultural Studies*, 8(4), 32. <https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17080>
- V, G., Murthy, K., N, Bhavya, Kumar, U., & K, P. (2023). Vertical distribution of soil chemical properties under different land use systems of Biligirirangana Hills, Karnataka. *Journal of Theoretical Biology Forum*, 12(2), 260–271. <https://doi.org/10.61739/tbf.2023.12.2.260>
- Vásquez, H. V., Valqui, L., Bobadilla, L. G., Arbizu, C. I., Alegre, J. C., & Maicelo, J. L. (2021). Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon*, 7(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07725>
- Victoria, L., Torre, G., Dolores, J., & Crisóstomo, L. (2023). *EFEECTO DE SISTEMAS AGROFORESTALES Y MONOCULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L.), EN LOS INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO.*
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils*. Pearson.
- Williams-Linera, G. (2015). *El bosque mesófilo de montaña, veinte años de investigación ecológica ¿qué hemos hecho y hacia dónde vamos?* 21.
- Yáñez Díaz, M. I., Cantú Silva, I., & González Rodríguez, H. (2018). Effect of land use change on chemical properties of a vertisol. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 369–379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>
- Yáñez Díaz, M. I., Silva, I. C., & Ocañas, F. G. (2023). Effect on the physicochemical properties of a Regosol from land use change. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 58–79. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1359>
- Zagal, E., Rodriguez, N., Vidal, I., & Quezada, L. (2002). ACTIVIDAD MICROBIANA EN UN SUELO DE ORIGEN VOLCANICO BAJO DISTINTO MANEJO AGRONÓMICO. *Agricultura Técnica*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000200012>

4. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DOS PUENTES MEDIANTE LA ECUACIÓN USLE Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA⁵

4.1. Resumen

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo en México, especialmente en las zonas montañosas del estado de Veracruz donde se presentan pendientes pronunciadas y actividades agrícolas intensivas. En este estudio se estimó la pérdida de suelo por erosión hídrica en la Microcuenca Dos Puentes, ubicada en el municipio de Huatusco Veracruz, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) integrada con Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo fue cuantificar y analizar la distribución espacial de la erosión en función de factores climáticos, edáficos, topográficos y de cobertura vegetal. La metodología consideró la integración de los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (longitud e inclinación de la pendiente), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de conservación), utilizando información geoespacial procesada en el programa QGIS. Los resultados evidenciaron una alta variabilidad espacial de la erosión hídrica dentro de la microcuenca. El factor R mostró valores que oscilan de 9, 663.22 a 16, 741.1 MJ.mm/ha⁻¹.año⁻¹, indicando precipitaciones con elevado potencial erosivo. El factor K mostró valores de 0.02 a 0.04 t. ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹, asociados principalmente a suelos andosoles y acrisoles con susceptibilidad moderada a alta. El factor LS alcanzó valores máximos de 43.92 y el Factor C un rango de 0.01 a 0.3. El mapa final de erosión hídrica mostró que el 53.47 % de la superficie presenta erosión crítica (>200 t ha⁻¹ año⁻¹), mientras que solo el 5.87 % corresponde a niveles muy bajos. Las zonas con mayores pérdidas de suelo se relacionan con pendientes elevadas, cobertura vegetal limitada y alta erosividad de la lluvia. Los resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo para disminuir los procesos erosivos en la Microcuenca Dos Puentes.

Palabras clave: degradación de tierras, pérdida de suelo, SIG, factores de erosión.

⁵ Tesis de maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Ana Karen Hernández Juan

Director de tesis: David Cristóbal Acevedo

ESTIMATION OF WATER EROSION ON THE DOS PUENTES MICRO-WATERSHED USING THE USLE EQUATION AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS⁶

4.2. Abstract

Water erosion is one of the main causes of soil degradation in Mexico, particularly in the mountainous regions of the state of Veracruz, where their steep slopes and intensive agricultural activities. This study estimated soil loss due to water erosion in the Dos Puentes Micro-Watershed, located in the municipality of Huatusco, Veracruz, using the Universal Soil Loss Equation (USLE) integrated with Geographic Information Systems (GIS). The objective was to quantify and analyze the spatial distribution of erosion based on climatic, edaphic, topographic, and vegetation cover factors. The methodology involved the integration of the factors R (rainfall erosivity), K (soil erodibility), LS (slope length and steepness), C (vegetation cover), and P (conservation practices), using geospatial information processed in the QGIS software. The results revealed high spatial variability in water erosion within the micro-watershed. The R factor ranged from 9,663.22 to 16,741.1 MJ.mm/ha⁻¹.year⁻¹, indicating rainfall with erosive potential. The K factor ranged from 0.02 to 0.04 t. ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹, primarily associated with Andosols and Acrisols with moderate to high susceptibility. The LS factor reached maximum values of 43.92, and C factor ranged from 0.01 to 0.3. The final water erosion map showed that 53.47 % of the area exhibits critical erosion (>200 t ha⁻¹ year⁻¹), while only 5.87% corresponds to very low erosion levels. These results highlight the need to implement conservation and sustainable soil management strategies to reduce erosion in the Dos, Puentes micro-watershed.

Keywords: land degradation, soil loss, GIS, erosion factors.

⁶ Master's Thesis in Science. Master of Science Program in Agroforestry for Sustainable Development. Universidad Autónoma de Chapingo, Mexico.

Author: Ana Karen Hernández Juan

Thesis Advisor: David Cristóbal Acevedo

4.3. Introducción

En México, uno de los principales tipos de degradación del suelo es la erosión hídrica (37 %) seguido de la erosión eólica (14.9 %) y degradación química; en tanto que el 36 % de la superficie se encuentra sin grado de degradación. Con base en el nivel de degradación el 30.9 % corresponde a una condición moderada, seguido del 19 % ligera, el 12 % severa y un 0.9 % a nivel extremo (SEMARNAT, 2002). La erosión hídrica es un proceso natural que incide en los ecosistemas agrícolas y naturales, en el cual las partículas del suelo son desprendidas y transportadas por acción del agua. Este fenómeno se traduce en la pérdida acelerada de la capa superficial del suelo, lo que puede reducir su fertilidad, favorecer el arrastre de nutrientes esenciales (N, P, K, C), así como la contaminación de cuerpos de agua con microorganismos y sustancias tóxicas, incluidos metales pesados (Lee et al., 2021). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), reporta que cerca del 52.86 % de la superficie de México presenta erosión hídrica (INEGI, 2014). Sin embargo, estimaciones posteriores del mismo organismo señalan que esta proporción asciende al 66 % del territorio nacional, del cual el 6 % presenta erosión hídrica fuerte o extrema, aproximadamente el 24 % moderada y el 36 % de manera leve, en tanto que cerca del 34 % se mantiene como suelo estable (INEGI, 2015).

El impacto de la erosión en zonas montañosas, caracterizadas por pendientes irregulares y pronunciadas, es cada vez más evidente, especialmente por la creciente intensidad e irregularidad de los fenómenos climáticos. Como consecuencia de este tipo de erosión, los suelos agrícolas degradados pierden progresivamente su capacidad productiva, lo que a su vez genera efectos negativos en los ámbitos económico, social y ambiental (Portuguez M., 2015b). En el estado de Veracruz se estima que el 46 % del estado presenta una erosión hídrica potencial, el 9.11 % del territorio tiene una erosión potencial hídrica ligera, el 19.5 % moderada, el 10.11 % severa y el 7.2 % muy severa (SEMARNAT & Universidad Autónoma Chapingo, 2001). Esta problemática se refleja particularmente en las zonas montañosas del estado de Veracruz, los cuales

constituyen sistemas complejos debido a su fisiografía y vegetación natural en donde albergan infinidad de sistemas productivos, tal es el caso del municipio de Huatusco, Veracruz, donde se localiza la microcuenca Dos Puentes, en donde existen aproximadamente 6,286 sistemas agroforestales (Calderon et al., 2018). Gran parte de estos sistemas se encuentran en pendientes escarpadas donde está latente el riesgo de erosión hídrica y la posible degradación de la productividad de los terrenos donde se encuentran (Rosas Arellano et al., 2008).

Debido a esta problemática es necesario emplear herramientas que permitan estimar la pérdida de suelo. La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) se utiliza ampliamente para evaluar la erosión hídrica debido a su capacidad para integrar factores climáticos, topográficos, edáficos y de cobertura vegetal. Asimismo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas útiles ya que permite almacenar, procesar y manipular bases de datos para el análisis espacial y la generación de mapas de riesgo erosivo, contribuyendo a la toma de decisiones para el manejo y conservación de los recursos naturales (Bonilla et al., 2010)

Con base en lo anterior, el objetivo principal de la presente investigación es cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca Dos Puentes, mediante la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en función del tipo de uso y cobertura vegetal.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en los paralelos 19° 04' y 19° 13' de latitud norte; y los meridianos 96° 41' y 97° 04' de longitud oeste; ubicado en la zona central montañosa del Estado, sobre las estribaciones de la Sierra madre Oriental. Con una altitud entre 400 y 2,000 m (Figura 10). El clima es del tipo semicálido-

húmedo con una temperatura media anual de 16 a 26 °C y una precipitación media anual de 2000 mm. Los suelos son principalmente de origen volcánico (INEGI, 2010). La microcuenca Dos Puentes se localiza dentro del municipio de Huatusco, colinda con la microcuenca Citlalapa- Aguacapa, Capulapa y con la Subcuenca Colonia Manuel González.

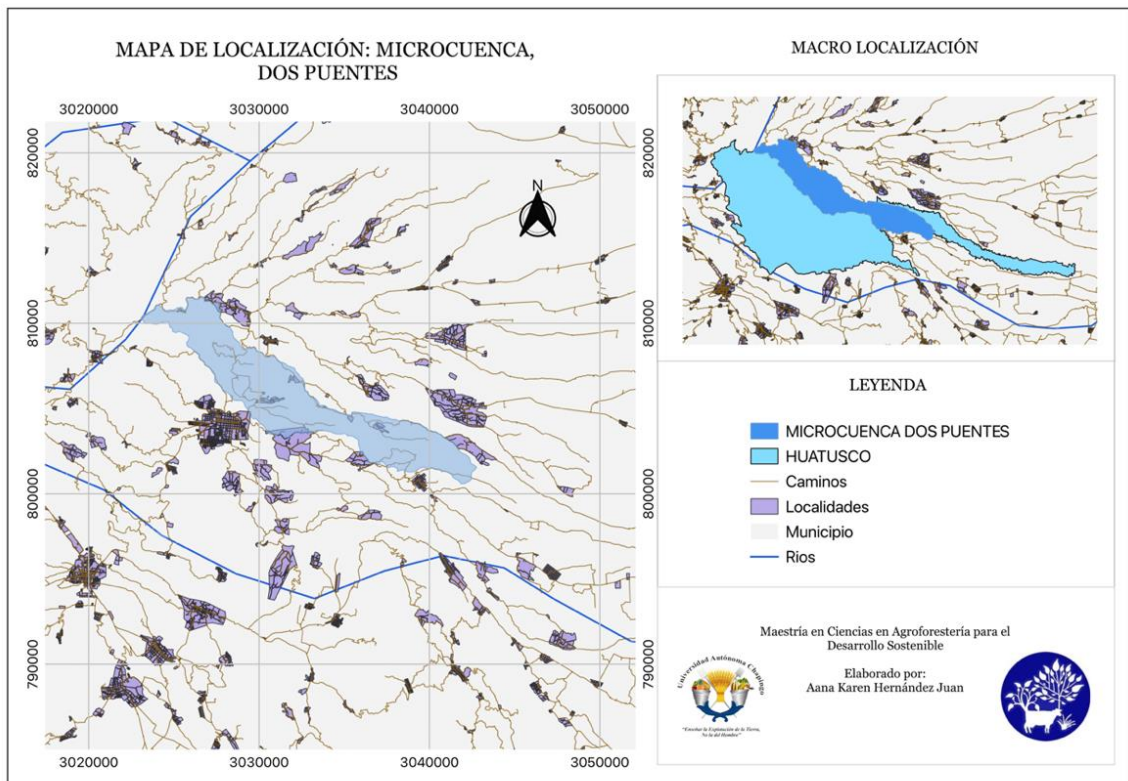


Figura 10. Mapa de localización de la Microcuenca Dos puentes

4.4.2. Cuantificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica

Para la cuantificación de erosión hídrica de la Microcuenca Dos Puentes se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS o USLE por su siglas en inglés) (Wischmeier & Smith, 1978). Adaptando esta metodología a los Sistemas de Información geográfica, en este caso se utilizó el programa QGIS en su versión 4.0.1 “Norrköping”, lo que permitió la integración de herramientas de análisis geoespacial y modelado de datos.

La evaluación de la erosión hídrica requiere integrar diversos tipos de información, entre los que destacan datos climáticos, hidrológicos, topográficos, de cobertura vegetal, características del suelo y prácticas de conservación, todos ellos en datos en formato ráster. A partir del procesamiento de estos insumos se determinan los factores de la USLE con base en la siguiente ecuación:

$$A = R * K * S * L * C * P$$

Donde:

A= Es la pérdida de suelo por unidad de superficie ($\text{tha}^{-1} \text{año}^{-1}$).

R= Es el factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ. mm/ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).

K= Es el factor erodabilidad del suelo ($\text{t.ha.h/ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$).

LS= Es el factor longitud y grado de la pendiente (adimensional).

C= Es el factor de cubierta vegetal (adimensional).

P= Es el factor de prácticas conservación del suelo (adimensional).

4.4.3. Factor de erosividad de la lluvia R

El factor R expresa la erosividad de la lluvia, la cual está directamente relacionada con las condiciones climáticas de un sitio específico. Su importancia como agente de erosión radica en características como la intensidad de la precipitación (cantidad de lluvia por unidad de tiempo), el tamaño de las gotas y la velocidad con la que impactan el suelo. Asimismo, intervienen otros elementos como el ángulo de la caída de las gotas de lluvia que en conjunto influyen en el potencial erosivo de cada evento de precipitación (Flores Islas, 2016).

Para calcular el valor del factor R se utilizó el mapa isoyetas de CONABIO que representa la distribución anual de la precipitación. Con la precipitación media anual se aplicó la ecuación de acuerdo a la zona a la que pertenece la Microcuenca Dos Puentes; en este caso corresponde a la región 14 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Ecuaciones regionalizadas del factor R para la República Mexicana.

Región	Ecuación	R ²
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
5	$3.4880 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$(-0.0334) * P + 0.0061 * P^2$	0.98
8	$1.9967 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
9	$7.0458 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
10	$6.8938 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
11	$3.7745 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
12	$2.4619 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
13	$10.7427 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
14	$1.5005 * P + 0.002640 * P^2$	0.95

P es la precipitación media anual (mm)

Fuente: (Becerra, 1997, citado por (Montes-León et al., 2011))

4.4.4. Factor de erodabilidad del suelo K

Este factor indica la erodabilidad del suelo y se refiere a la susceptibilidad del suelo frente a agentes erosivos, es decir, a su capacidad para resistir el impacto directo de la gota de lluvia y escurrimiento superficial (efecto cortante) que actúan en el suelo (Montes-León et al., 2011). Este factor depende de ciertas características del suelo como el tamaño de los poros del suelo, contenido de materia orgánica, resistencia de agregados y tamaño de las partículas (Flores Islas, 2016).

Para obtener el valor del factor K se empleó el conjunto de datos vectorial edáfico escala 1:250,000, serie II (Continuo Nacional), con la información actualizada. Para determinar los valores del factor K se consideró el tipo de suelo y la textura (Cuadro 8).

Cuadro 8. Factor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB.

Orden	Textura		
	Gruesa (G)	Media (M)	Fina (F)
Acrisol (AC)	0.026	0.04	0.013
Alisol (AL)	0.026	0.04	0.013
Andosol (AN)	0.026	0.04	0.013
Arenosol (AR)	0.013	0.02	0.007
Chernozem (CH)	0.013	0.02	0.007
Calcisol (CL)	0.053	0.079	0.026
Cambisol (CM)	0.026	0.04	0.013
Durisol (DU)	0.053	0.079	0.026
Fluvisol (FL)	0.026	0.04	0.013
Ferralsol (FR)	0.013	0.02	0.007
Gleysol (GL)	0.026	0.04	0.013
Gypsisol (GY)	0.053	0.079	0.026
Histosol (HS)	0.053	0.02	0.007
Kastanozem (KS)	0.026	0.04	0.013
Leptosol (LP)	0.013	0.02	0.007
Luvisol (LV)	0.026	0.04	0.013
Lixisol (LX)	0.013	0.02	0.007
Nitisol (NT)	0.013	0.02	0.007
Phaeozem (PH)	0.053	0.079	0.007
Planosol (PL)	0.026	0.04	0.026
Plinthosol (PT)	0.026	0.04	0.013
Regosol (RG)	0.026	0.04	0.013
Solonetz (SN)	0.053	0.079	0.026
Umbrisol (UM)	0.026	0.04	0.013
Vertisol (VR)	0.053	0.079	0.026

Fuente: (FAO, 2006).

4.4.5. Factor longitud e inclinación de la pendiente LS

El factor LS, también es conocido como factor topográfico, dado por el componente de longitud de la pendiente (L) (Cheng et al., 2024), mientras que el componente (S) indica el ángulo de la pendiente (Montes-León et al., 2011). En particular, el factor L corresponde a la distancia que recorre el flujo superficial desde su punto de inicio donde la pendiente disminuye lo suficiente para que ocurra la deposición de sedimentos, o bien hasta el punto en que el escurrimiento se concentra y se integra a un canal de drenaje claramente definido (Montes-León et al., 2011).

Para el cálculo del factor LS se utilizó la herramienta de QGIS “LS Factor-Field base” y como insumo cartográfico el modelo digital de elevación (MDE) del estado de Veracruz en formato ráster con un tamaño de pixel de 15 m.

4.4.6. Factor de cobertura vegetal C

Este factor considera la protección de la cobertura vegetal al suelo cuando intercepta las gotas de lluvia amortiguando su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo, y los valores se determinan a partir del mapa temático de cobertura (Portuguez M., 2015b). Los valores del factor C (Cuadro 9) oscilan entre 0 y 1, en donde los valores cercanos a 0 indican una alta cobertura vegetal y los valores cercanos a 1 indican sitios en donde el suelo se encuentra sin cubierta vegetal (Cheng et al., 2024). Para determinar los valores del factor C se utilizó el mapa de uso de suelo y vegetación serie VII de INEGI.

Cuadro 9. Valores del factor C con base en los usos de suelo y tipos de vegetación.

Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de Ayarin	0.01
Bosque de cedro	0.01
Bosque de encino	0.10
Bosque de encino-pino	0.01
Bosque de galería	0.10
Bosque de oyamel	0.01
Bosque de pino	0.01
Bosque de pino-encino	0.01
Bosque de tascate	0.01
Bosque de mesófilo de montaña	0.01
Chaparral	0.65
Manglar	0.10
Matorral crasicaule	0.65
Matorral de coníferas	0.20
Matorral desértico microfilo	0.25
Matorral desértico rosetófilo	0.25
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45
Matorral resetofilo costero	0.25
Matorral sarcocaulle	0.25
Matorral sarco-crasicaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25
Matorral submontano	0.35
Matorral subtropical	0.12
Mezquital	0.65
Palmar inducido	0.75
Palmar natural	0.75

Vegetación y/o uso de suelo	C
Pastizal gipsofilo	0.25
Pastizal halofilo	0.25
Pastizal inducido	0.02
Pastizal natural	0.07
Popal	0.85
Pradera de alta montaña	0.05
Sabana	0.54
Sabanoide	0.54
Selva alta perennifolia	0.45
Selva alta subperennifolia	0.45
Selva baja caducifolia	0.50
Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Selva mediana caducifolia	0.45
Selva mediana perennifolia	0.45
Selva mediana subcaducifolia	0.45
Tular	0.10
Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Vegetación de dunas costeras	0.85
Vegetación de galería	0.85
Vegetación halófila	0.85
Zona urbana	0.005
Cuerpos de agua	1.0
Agricultura en riego	0.55
Agricultura de temporal	0.75
Agricultura de humedad	0.25

Fuente: (Renard, 1997; Montes, 2002; Becerra 1997, citado por Montes-León et al., 2011).

4.4.7. Factor de prácticas de conservación P

Este factor de conservación (P) representa el efecto de las técnicas de manejo del suelo para la disminución de la erosión del suelo. Considera prácticas como cultivos en contorno, cultivos en franjas, terrazas y otras prácticas mecánicas que ayudan a disminuir la velocidad de la escorrentía. Los valores que toma el factor P van de 0 a 1, donde 0 indica una protección máxima frente a la erosión y 1 corresponde a la ausencia de medidas de conservación (Kanwar et al., 2026).

En este trabajo se consideró el valor de este factor igual a 1 ya que se carece de información cartográfica con la ubicación de estas prácticas de control de la erosión y del manejo de las actividades productivas. Esto evita introducir sesgos no comprobados el modelo y mantiene la estimación en un escenario conservador.

4.4.8. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE):

Para obtener el mapa final de la erosión hídrica del suelo de la Microcuenca Dos Puentes se multiplicaron los factores (R, K, LS, C y P), para lo cual se unificaron en formato ráster y se utilizó la calculadora ráster en QGIS para obtener el producto final. Los resultados del mapa de erosión se categorizaron con base en los criterios de tolerancia de pérdida de suelos (Cuadro 10).

Cuadro 10. Categorías de erosión hídrica.

Categoría	Rango de Pérdida de suelos (t ha⁻¹ año⁻¹)	Interpretación
Muy baja	0.0 – 5.0	Suelos no susceptibles al proceso erosivo
Baja	5.0 - 10.0	Suelos con niveles de erosión baja y pérdidas tolerables
Moderada	10.0 - 25.0	Zonas con procesos erosivos leves
Media	25.0 – 50.0	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables
Alta	50.0 – 100.0	Suelos con procesos erosivos graves
Muy alta	100.0 – 200.0	Sitios donde la erosión se aprecia con frecuencia
Crítica	>200.0	Zonas con procesos erosivos extremos

Fuente: Ramos (2001); Velázquez (2008) y Ramírez (2010) citado por (Jaya-Santillán, 2023).

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Factor R

El mapa del factor R (Figura 11) muestra la distribución espacial de la erosividad de la lluvia en la Microcuenca Dos puentes. Los valores obtenidos varían entre 9,663.22 y 16,741.1 MJ.mm/ha⁻¹.año⁻¹, lo cual muestra diferencias importantes en la capacidad potencial de la precipitación para generar erosión hídrica. La erosividad está representada en tres zonas principales dentro de la cuenca. La zona con erosividad severa (16,741.1) localizada en la zona occidental del área de estudio. En la figura 11 se puede observar que las zonas en color azul en el mapa muestran las áreas en donde las precipitaciones son más intensas y con mayor energía cinética. La zona representada en color rojo que se encuentra en la parte central de la microcuenca presenta condiciones muy altas de erosividad

(12,381.3), donde la lluvia aún puede generar procesos erosivos, aunque en menor intensidad que en la zona occidental. Finalmente, la zona de menor erosividad, representada en color amarillo mostró menor agresividad de las precipitaciones por lo que el potencial de la erosión asociado a la lluvia es relativamente menor (9,663.22). El análisis espacial del factor R evidenció una variación significativa de la erosividad de la lluvia dentro del área de estudio, con valores máximos en la zona occidental y mínimos hacia el oriente. Las áreas con mayor riesgo potencial de erosión hídrica, por lo que requieren estrategias de manejo y conservación del suelo.

Los valores superiores a los 10,000 MJ.mm/ha⁻¹.año⁻¹ son comparables con países de África central con altos valores de erosividad, se reportan valores entre 7 000 a casi 20,000 MJ.mm/ha.año, característicos de regiones tropicales húmedas con alta susceptibilidad a erosión hídrica (Panagos et al., 2017). El comportamiento de la agresividad de la lluvia está influenciado por el clima y el relieve del área así como de las barreras topográficas (Melchor-Marroquín & Chagoya-Fuentes, 2016). Este comportamiento puede variar incluso bajo condiciones similares de cobertura vegetal, pendiente y tipo de suelo. Esto se debe a que la intensidad de los eventos de precipitación influye directamente en la energía cinética de las gotas de lluvia y en la generación de escurrimiento superficial. De tal forma que las lluvias intensas tienen potencial de generar un mayor desprendimiento y transporte de partículas del suelo, incrementando erosión hídrica, aun cuando las condiciones del terreno sean constantes (Castelan Vega et al., 2015). Los valores de R obtenidos en la microcuenca dos Puentes, son comparables con los de regiones tropicales húmedas del sureste de México. Tal es el caso de Puebla, en la subcuenca del río San Marcos donde obtuvieron una erosividad muy alta y severa (Castelan Vega et al., 2015).

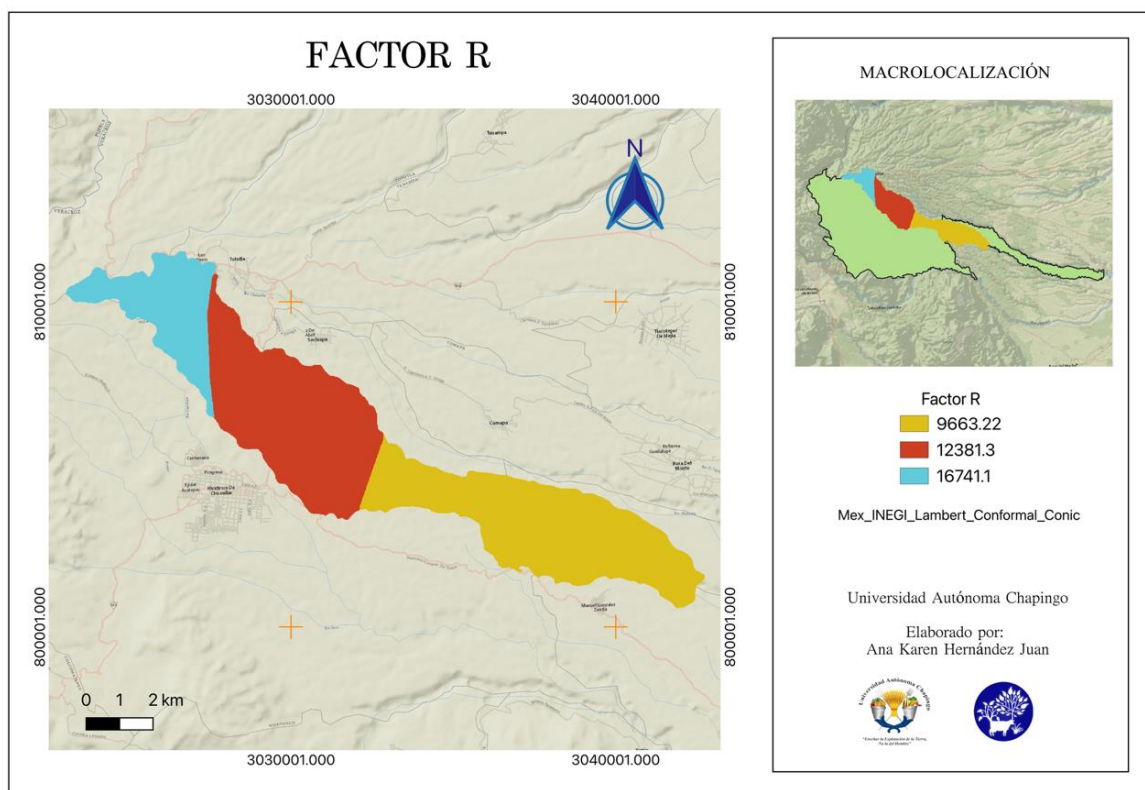


Figura 11. Factor R, microcuenca Dos Puentes.

4.5.2. Factor K

El mapa del factor K representa la erodabilidad del suelo en la microcuenca Dos Puentes y muestra una erodabilidad que oscilan 0.02 y 0.04 $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ lo cual indica una variación espacial moderada en la vulnerabilidad del suelo frente a la erosión hídrica. Se observan dos niveles principales. El primero con alta erodabilidad representado en color café (0.04). Estos valores indican suelos con mayor susceptibilidad a procesos erosivos, asociados a texturas medias o finas, bajo contenido de materia orgánica o menor estabilidad estructural. Lo anterior indica que en estas zonas existe mayor probabilidad de pérdida de suelo ante eventos de lluvia intensa. El segundo nivel representado en color verde (0.02) localizado en áreas pequeñas, nos indica que estos suelos presentan mayor resistencia a la erosión. Estos resultados muestran un predominio de

valores medios del factor K dentro de la microcuenca, lo cual indica que gran parte de la superficie posee una susceptibilidad considerable a la erosión hídrica. Esto sugiere que, bajo condiciones de lluvia intensa y pendientes pronunciadas, podrían generarse pérdidas importantes de suelo.

En la microcuenca Dos Puentes los valores de K cercanos a $0.04 \text{ t.ha.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, asociados a suelos Andosol y Acrisol están ligados a texturas medias a moderadamente finas, como francos, francos-limosos o francos-arenosos los cuales. De acuerdo con la clasificación textural de la FAO, los suelos de textura media y mayor contenido de limo presentan alta susceptibilidad moderada a alta a la erosión hídrica cuando se encuentran expuestos a lluvias intensas y pendientes pronunciadas (FAO, 2015). Por otro lado, los valores de 0.02 relacionados con suelos leptosoles, localizados en menor proporción suelen relacionarse con suelos con mejor estructura, mayor contenido de arcilla y mayor materia orgánica. Estas características favorecen la formación de agregados y aumentan la infiltración, reduciendo así el escurrimiento superficial y el desprendimiento de partículas (Hamza et al., 2025).

Un estudio realizado en la cuenca del río Caplina al sur de Perú obtuvo valores que oscilan de 0.022 a $0.0228 \text{ t.ha.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ similares a los valores bajos en este estudio (Calderón Cárdenas et al., 2024a). Otro trabajo realizado en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, reportó valores que oscilan entre 0.013 a 0.030 considerados como valores medios de erodabilidad más similares a los de la microcuenca Dos Puentes (De León, 2011)

Estos resultados indican que los valores de erodabilidad obtenidos en la Microcuenca Dos puentes son consistentes con los reportados en otras regiones tropicales y montañosas de America Latina, donde las características edáficas, las pendientes pronunciada y las condiciones climáticas son factores que inciden en la susceptibilidad moderada a alta a la erosión hídrica. Además, como la textura del suelo es un factor determinante en la magnitud de la pérdida por erosión hídrica.

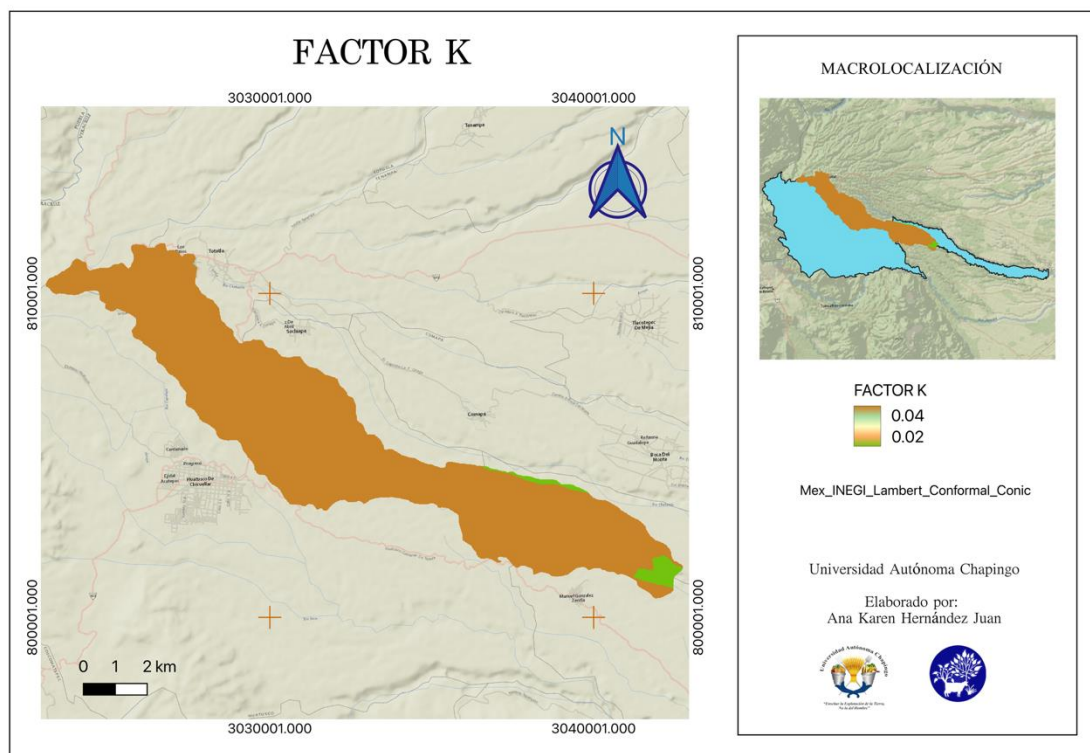


Figura 12. Factor K, microcuenca Dos Puentes.

4.5.3. Factor LS

El mapa del factor LS representa el efecto combinado de la longitud pendiente (L) y la inclinación de la pendiente (S) sobre los procesos de la erosión hídrica. Los valores obtenidos oscilan entre 0.030001 y 43.920761, evidenciando una marcada variabilidad topográfica dentro del área de estudio. La distribución espacial está representada en áreas con valores bajos de LS (0.03) que corresponden a los tonos rojizos. Estas son áreas con pendientes suaves y recorridos cortos de flujo superficial. Dichas zonas presentan menor capacidad para generar erosión, debido a que el agua escurre con menor velocidad y energía. Los valores de medios a altos de LS son los tonos amarillos y claros que se distribuyen siguiendo cauces, laderas pronunciadas y zonas de concentración de flujo. Estas zonas poseen mayor potencial erosivo ya que el agua adquiere mayor velocidad, aumenta la capacidad de arrastre de sedimentos y se incrementa la pérdida potencial de suelo. Por otro lado, son escasas las zonas

asociadas a pendientes fuertes y trayectorias largas de escurrimientos estas representadas (color azul) que alcanzan valores de 43.920761. Estas áreas son más susceptibles a erosión hídrica dentro de la Microcuenca Dos puentes.

El estado de Veracruz se caracteriza por tener gran variedad de sistemas agroforestales, especialmente de café. Un estudio realizado en Chocamán, Veracruz reporta que la pendiente de los terrenos es un factor importante sobre la erosión hídrica, terrenos con pendientes entre 10 a 55% tienen mayor riesgo de pérdida de suelo (Pérez-Vázquez et al., 2024). Los resultados obtenidos indican que la topografía de la Microcuenca Dos puentes representa uno de los principales factores que favorecen los procesos erosivos, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas y escurrimientos concentrados.

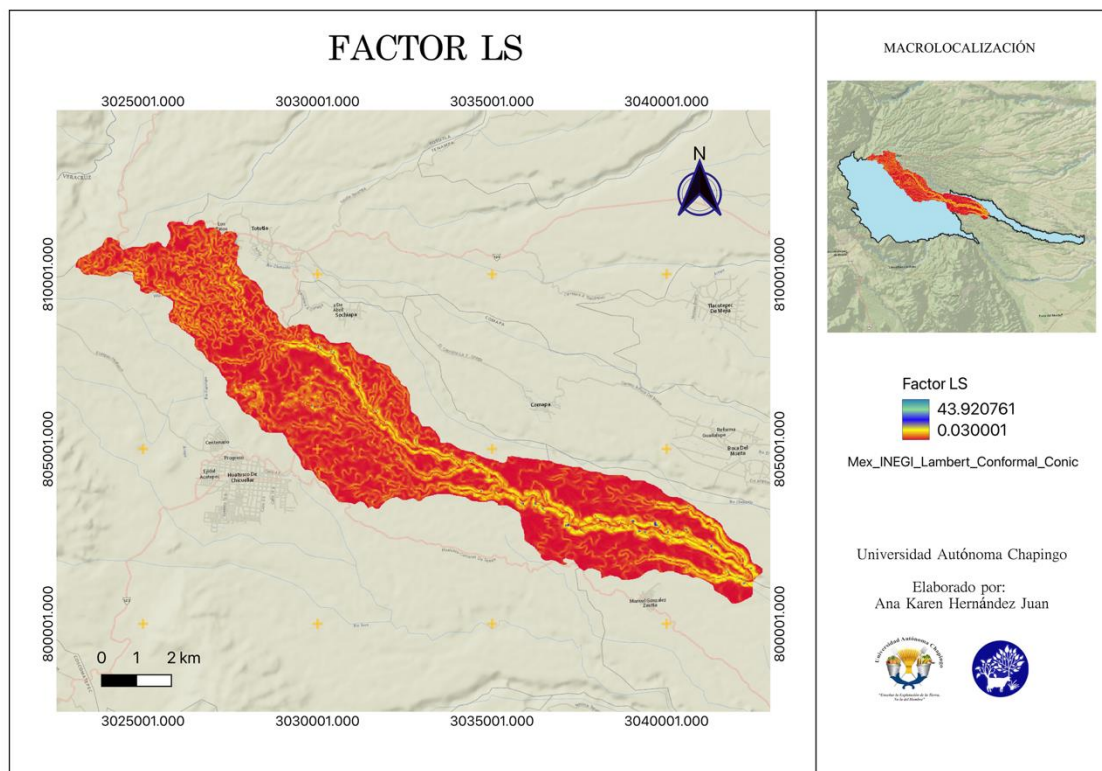


Figura 13. Factor LS, microcuenca Dos Puentes.

4.5.4. Factor C

El mapa del factor C representa el efecto de la cobertura y manejo del suelo sobre la erosión hídrica. Los valores de este factor variaron entre 0.01 y 0.30 indicando diferencias en la capacidad de protección del suelo de la Microcuenca Dos Puentes. Los valores bajos en tonos rojos corresponden a zonas con mayor cobertura vegetal y mejor protección del suelo. Estas áreas presentan menor susceptibilidad a la erosión, ya que la vegetación disminuye la velocidad del escurrimiento superficial, el impacto de las gotas de lluvia y el desprendimiento de partículas del suelo. Por otro lado, los valores altos del factor C (0.30) representados en color verde claro, ocupan la mayor parte de la microcuenca, lo cual indica que hay menor protección vegetal y mayor exposición del suelo a procesos erosivos. Estas áreas corresponden a suelos con menor cobertura vegetal o con mayor grado de perturbación. Valores similares a los reportados en el estudio en una cuenca del arroyo Comallo, Argentina, donde se obtuvieron valores de 0.3 a 0.8 (Calderón Cárdenas et al., 2024b).

Los valores de 0.01 corresponden a vegetación de bosque mesófilo de montaña, seguido de los valores de 0.02 asociados a pastizal cultivado. Los valores más altos correspondieron a agricultura de temporal anual y permanente, agricultura temporal semipermanente y permanente, y agricultura de temporal permanente.

Los resultados muestran que los sistemas con mayor cobertura vegetal presentan menor susceptibilidad a erosión hídrica, debido a que la vegetación funciona como barrera protectora frente al impacto de la lluvia y disminuye el escurrimiento superficial. En este contexto, los sistemas agroforestales y el bosque mesófilo de montaña pueden contribuir significativamente a la conservación del suelo dentro de la Microcuenca Dos Puentes.

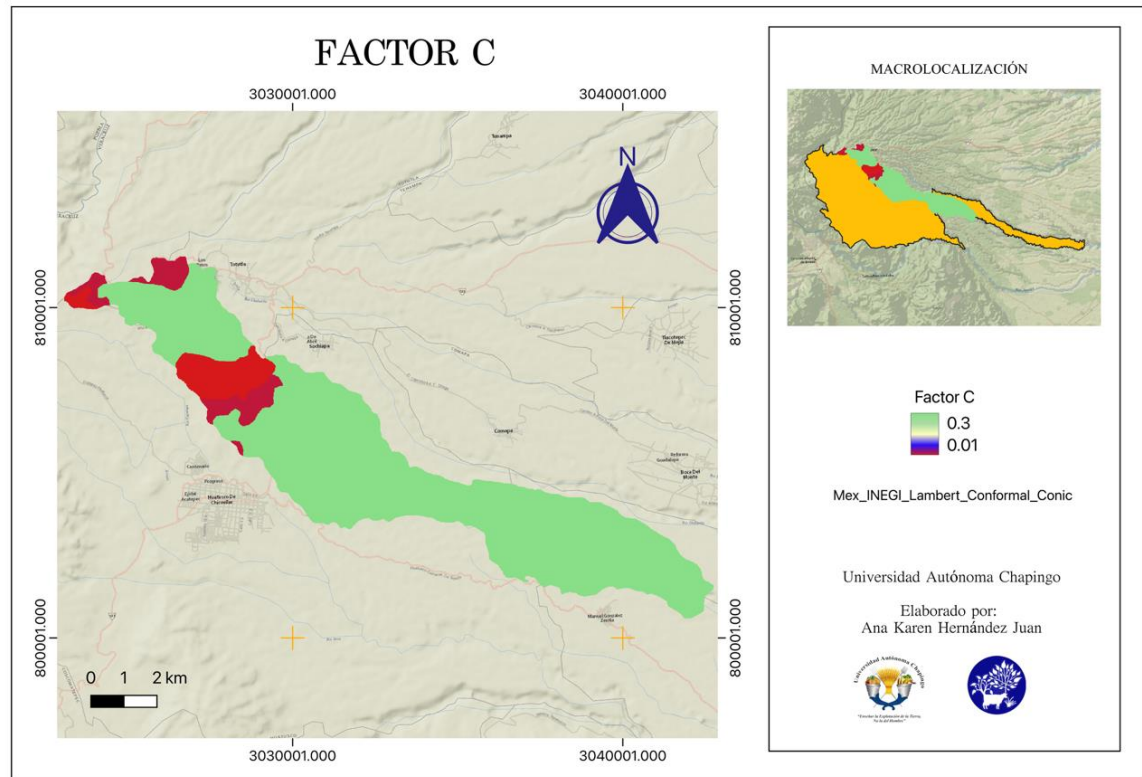


Figura 14. Factor C, microcuenca Dos Puentes.

4.5.5. Erosión Hídrica de la Microcuenca Dos Puentes

El mapa final de la erosión hídrica (Figura 15) presenta la pérdida potencial de suelo de la Microcuenca Dos Puentes, obtenida mediante la integración de los factores de la ecuación USLE (R, K, LS, C y P). Los resultados muestran una marcada variabilidad espacial en la intensidad de la erosión, con valores que van desde pérdidas nulas o muy bajas hasta valores superiores a 100 y hasta más de 200 t ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 11).

Las zonas representadas en color rojo intenso son las predominantes en la microcuenca, lo cual indica áreas con erosión alta a crítica. Estas áreas presentan las mayores pérdidas potenciales de suelo y están asociadas principalmente por pendientes pronunciadas, alta longitud de escurrimiento, cobertura vegetal limitada, y una alta erosividad de la lluvia. Resultados similares se dieron en la microcuenca del río Muchacho, Ecuador, en donde se obtuvo una pérdida de suelo de 74.4 t ha⁻¹ año⁻¹, clasificada como erosión alta, esto debido a pendientes

pronunciadas, lluvias intensas y frecuentes, vegetación escasa y actividades de pastoreo como lo menciona el autor (Jaya-Santillán, 2023). Otro estudio reporta tasas de erosión altas en la cuenca de Citarium Hulu, Indonesia con valores de 61 a 180 t.ha⁻¹. año¹ (Khairunnisa et al., 2020).

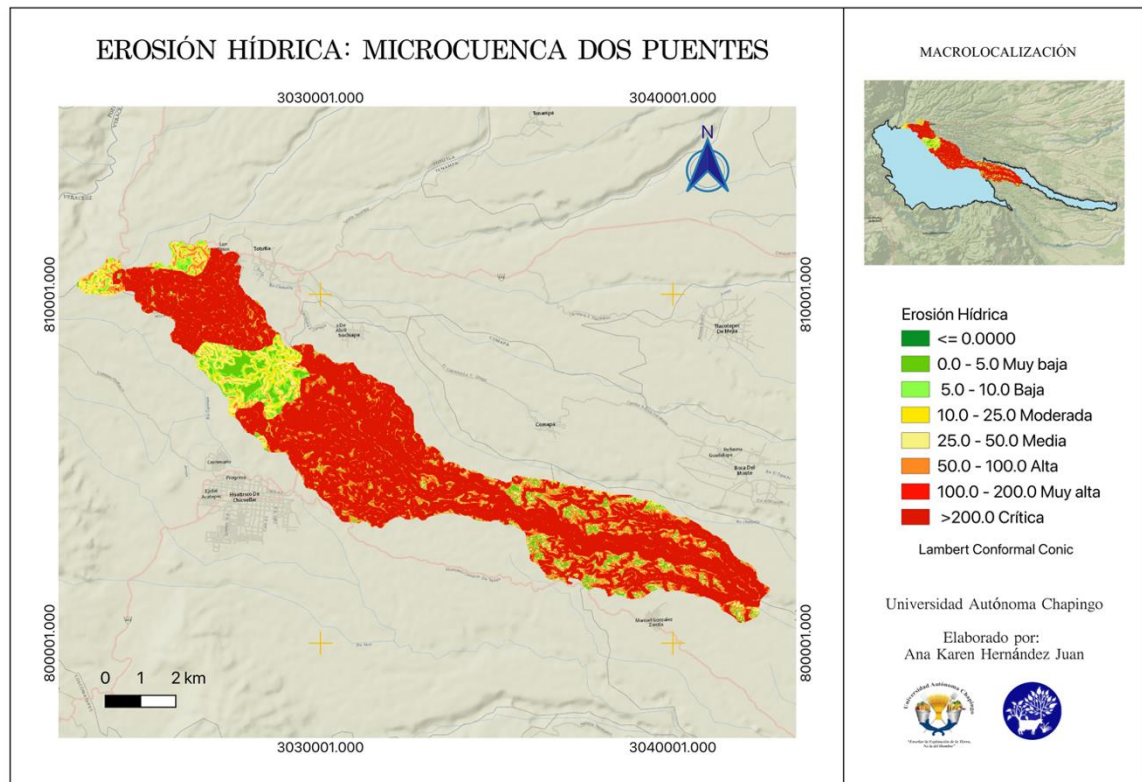


Figura 15. Erosión hídrica, microcuenca Dos Puentes.

De acuerdo con el Cuadro 11, el 53.47 % de la superficie de la microcuenca presenta erosión crítica (>200 t ha⁻¹ año⁻¹), mientras que únicamente el 5.87 % corresponde a erosión muy baja. Estos resultados evidencian un severo problema de degradación del suelo dentro de la Microcuenca Dos Puentes. La elevada proporción de áreas con erosión crítica sugiere que las condiciones topográficas, climáticas y de cobertura vegetal favorecen procesos intensos de pérdida de suelo. Asimismo, la presencia de pendientes pronunciadas y usos agrícolas en zonas vulnerables incrementa significativamente el riesgo erosivo. En contraste, las áreas con mayor cobertura vegetal, especialmente bosque

mesófilo de montaña y sistemas agroforestales, presentan menores niveles de erosión debido a la protección que ejerce la vegetación sobre el suelo.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo orientadas a disminuir el escurrimiento superficial, incrementar la cobertura vegetal y reducir la pérdida de suelo en las zonas más vulnerables de la microcuenca.

Cuadro 11. Clasificación de la erosión de acuerdo a los rangos de tasas de erosión para suelos tropicales.

Categoría	Rango de Pérdida de suelos (t ha⁻¹ año⁻¹)	Superficie (Hectáreas)	%	Interpretación
Muy baja	0.0 – 5.0	293.732167610995	5.87	Suelos no susceptibles al proceso erosivo
Baja	5.0 - 10.0	115.914877154821	2.32	Suelos con niveles de erosión baja y pérdidas tolerables
Moderada	10.0 - 25.0	211.115920083122	4.22	Zonas con procesos erosivos leves
Media	25.0 – 50.0	413.407268607539	8.26	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables
Alta	50.0 – 100.0	633.369495647575	12.65	Suelos con procesos erosivos graves
Muy alta	100.0 – 200.0	662.060220913688	13.22	Sitios donde la erosión se aprecia con frecuencia
Crítica	>200.0	2676.5621071598	53.47	Zonas con procesos erosivos extremos
Total		5006.162057	100	

Fuente: Ramos (2001); Velázquez (2008) y Ramírez (2010) citado por (Jaya-Santillán, 2023).

4.6. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en la Microcuenca Dos Puentes se demuestra que la erosión hídrica constituye un problema de alta relevancia ambiental, particularmente en zonas con pendientes pronunciadas, cobertura vegetal limitada y elevada erosividad de la lluvia. Asimismo, el análisis de los factores que integran el modelo mostró que la combinación de una elevada erosividad pluvial, una erodabilidad moderada a alta de los suelos y condiciones topográficas desfavorables incrementa significativamente el riesgo de pérdida de suelo. Los valores de R evidencian un potencial erosivo considerable de la precipitación, mientras que el factor LS confirmó que las pendientes pronunciadas y la longitud de escurrimiento constituyen los principales controladores de la dinámica erosiva en el área de estudio.

La distribución de K mostró que la microcuenca presenta una vulnerabilidad edáfica moderada a alta, cuya respuesta frente al impacto de lluvia y al escurrimiento superficial favorece la desagregación y transporte de partículas. El factor C reflejó una limitada cobertura protectora en gran parte de la microcuenca, lo que incrementa la exposición del suelo a los procesos de desprendimiento y arrastre de sedimentos.

En este sentido, los resultados confirman que la dinámica erosiva no responde a un solo factor, sino a la interacción de variables climáticas, edáficas, topográficas y de uso de suelo.

De acuerdo con el mapa final de erosión hídrica, el 53.47 % de la superficie presentó erosión crítica ($>200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), lo cual evidencia un escenario severo de degradación del suelo en la Microcuenca Dos Puentes. Estas condiciones representan un riesgo importante para la conservación del recurso edáfico, la productividad agrícola y la estabilidad ambiental de la microcuenca.

Se concluye que la microcuenca Dos Puentes requiere la implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo, orientadas a disminuir la escorrentía superficial y a mejorar la protección vegetal en las áreas más susceptibles. Entre las principales estrategias destacan el fortalecimiento de sistemas agroforestales, el incremento de cobertura vegetal, prácticas de conservación en laderas y el manejo sostenible del suelo en zonas agrícolas con pendientes pronunciadas. Por otro lado el uso de la metodología USLE junto con la herramienta SIG demostró ser una herramienta muy útil para la evaluación espacial del riesgo erosivo y apoyar la toma de decisiones en la planificación territorial y la conservación de los recursos naturales.

4.7. Literatura citada

- Bonilla, C. A., Reyes, J. L., & Magri, A. (2010). WATER EROSION PREDICTION USING THE REVISED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (RUSLE) IN A GIS FRAMEWORK, CENTRAL CHILE. In *CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH* (Vol. 70, Number 1).
- Calderón Cárdenas, J. M., Vizcarra Soto, S. D. del P., & Román Arce, C. R. (2024a). Modelado de la erosión hídrica del suelo mediante la metodología USLE en la cuenca del río Caplina al sur de Perú. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 6. <https://doi.org/10.47796/ing.v6i00.1033>
- Calderón Cárdenas, J. M., Vizcarra Soto, S. D. del P., & Román Arce, C. R. (2024b). Modelado de la erosión hídrica del suelo mediante la metodología USLE en la cuenca del río Caplina al sur de Perú. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 6. <https://doi.org/10.47796/ing.v6i00.1033>
- Calderon, E. A. B., Castorena, E. V. G., Chaparro, V. M. O., del Carmen Gutiérrez Castorena, M., & Bontemps, L. C. (2018). Coffee agroforestry systems in Veracruz, Mexico: Spatial identification and quantification using GIS, remote sensing and local knowledge. In *Terra Latinoamericana* (Vol. 36, Number 3, pp. 261–273). Mexican Society of Soil Science. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>
- Castelan Vega, R., Tamariz Flores, V., Linares Fleites, G., & Cruz Montalvo, A. (2015). Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, 0(83). <https://doi.org/10.14350/rig.33480>
- Cheng, J., Zhang, X., Jia, M., Su, Q., Kong, D., & Zhang, Y. (2024). Integrated Use of GIS and USLE Models for LULC Change Analysis and Soil Erosion

- Risk Assessment in the Hulan River Basin, Northeastern China. *Water (Switzerland)*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/w16020241>
- De León, S. (2011). ESTIMATE OF WATER EROSION AND ITS RELATIONSHIP TO LAND USE IN THE COHOACAN RIVER BASIN, CHIAPAS, MEXICO. *Aqua-LAC*, 3(1).
- FAO. (2006). *World Soil Resources Reports World reference base for soil resources 2006*.
- FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources Report*.
- Flores Islas, E. (2016). *ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN TRES CUENCAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA, UTILIZANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Hamza, A., Karčauskienė, D., Mockevičienė, I., Repšienė, R., Tahir, M. A., Manzoor, M. Z., Kousar, S., Lodhi, S. S., Rasool, N., & Ullah, I. (2025). Soil Aggregate Dynamics and Stability: Natural and Anthropogenic Drivers. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 15, Number 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agriculture15232500>
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Huatusco Veracruz de Ignacio de la Llave*. www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia
- INEGI. (2014). *Erosión de suelos en México, escala 1: 250 000*.
- INEGI. (2015). *Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre)*.
- Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26–39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Kanwar, H., Kumar, P., Agrawal, G., & Kumar, R. (2026). Assessment of soil erosion using geospatial techniques and USLE in the Shamli watershed of Shimla district, northwestern Himalaya. *Discover Soil*, 3(1), 43. <https://doi.org/10.1007/s44378-026-00201-4>
- Khairunnisa, F., Tambunan, M. P., & Marko, K. (2020). Estimation of soil erosion by USLE model using GIS technique (A case study of upper Citarum Watershed). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 561(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/561/1/012038>
- Lee, S., Chu, M. L., Guzman, J. A., & Botero-Acosta, A. (2021). A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage. *Journal*

- Melchor-Marroquín, J. I., & Chagoya-Fuentes, J. L. (2016). DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN, VERACRUZ, MÉXICO. *Aqua-LAC*, 8(2), 25–35. <https://doi.org/0.29104/phi-aqualac/2016-v8-2-03>
- Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). *Mapa Nacional de Erosión Potencial*.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., 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). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Pérez-Vázquez, A., Pérez-Sánchez, O., Lango-Reynoso, V., & Escamilla-Prado, E. (2024). The coffee agroecosystem: traditional polyculture versus commercial polyculture in Chocamán, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(2). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i2.3248>
- Portuguez M., D. M. (2015). ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO SIGUAS UTILIZANDO GEOINFORMATICA. *Anales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Rosas Arellano, J., Prado, E. E., & Rosado, O. R. (2008). *RELACIÓN DE LOS NUTRIMENTOS DEL SUELO CON LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y SENSORIALES DEL CAFÉ ORGÁNICO*.
- SEMARNAT. (2002). *Inventario Nacional de Suelos. México, D.F.*
- SEMARNAT, & Universidad Autónoma Chapingo. (2001). *EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL SUELO CAUSADA POR EL HOMBRE EN LA REPÚBLICA MEXICANA ESCALA 1:250 000*.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *PREDICTING RAINFALL EROSION LOSSES A GUIDE TO CONSERVATION PLANNING*. USDA / Science and Education Administration, Agriculture Handbook No. 537.

APÉNDICES

Apéndice 1. Climas de Huatusco, Veracruz

Clima tipo	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación
C(m)(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 % del total anual.
C(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18 % del total anual.
(A)C(w2)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.
(A)C(m)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.
(A)C(m)(f)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Con precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 % del total anual.

(A)C(fm)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18 % del total anual.
Aw2	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.
Aw1	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 2. Usos de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	Superficie (%)
Agricultura de temporal anual y semipermanente	477.72561	2.35
Bosque de encino	201.00619	0.99
Area minera	10.83092	0.05
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	822.88631	4.05
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	5410.02788	26.64
Agricultura de temporal anual semipermanente y permanente	95.59951	0.47
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	4652.5744	22.91
Vegetación secundaria	1257.78501	6.20
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	64.8324	0.32
Asentamientos humanos	1343.78252	6.62
Agricultura de temporal semipermanente	41.90675	0.21
Agricultura de temporal anual y permanente	1353.20267	6.66
Agricultura de temporal permanente	2734.88034	13.47
Pastizal cultivado	1856.93912	9.15
Cuerpos de agua artificial	1.27837	0.001

Fuente: Elaboración propia