



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

**VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO
AGROECOLÓGICO, CON BASE EN INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINARIA PARA
EL PARQUE NACIONAL LA MALINCHE**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

Josefina Cervantes Vargas

Directora de tesis:

D.C María Guadalupe Tenorio Arvide



Marzo 2024



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO, CON BASE EN INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINARIA PARA EL PARQUE NACIONAL LA MALINCHE

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

Josefina Cervantes Vargas

Comité tutorial:

Directora	D.C María Guadalupe Tenorio Arvide
Co-Director	D.C Miguel Ángel Valera Pérez
Tutora	D.C Elsa Iracena Castañeda Roldán †
Integrante Comité Tutorial	D.C Jorge Antonio Yañez Santos
Integrante Comité Tutorial	D.C Gabriela Pérez Osorio

Marzo 2024

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Director General de Bibliotecas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente

A través de este medio me dirijo a Usted para informarle que la tesis con título **VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO, CON BASE EN INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINARIA PARA EL PARQUE NACIONAL LA MALINCHE**, ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de tesis del estudiante:

Nombre del alumno: **Cervantes Vargas Josefina**
Matricula: **221470463**
Programa educativo: **Maestría**
Posgrado en: **Ciencias Ambientales**

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Zaragoza, a 20 de febrero de 2024



D.C Carolina Moran Raya
Directora
Instituto de Ciencias

D.C María Guadalupe Tenorio Arvide
Directora de Tesis

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca otorgada para el desarrollo del presente estudio.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), por permitirme volver a formar parte de esta gran institución.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales, por darme la oportunidad de contribuir a la conservación del medio ambiente a través del presente trabajo de investigación.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP, ya que este trabajo fue apoyado con recursos de los proyectos:

-) Restauración de los Servicios Ambientales y la Calidad de los Suelos degradados por efectos de la deforestación en la Sub Zona de Uso Tradicional del “Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl”, mediante la implementación del sistema agroecológico “Metepantle” (2021–2022, ID Proyecto: 00042).
-) Calidad y uso del suelo en los Parques Nacionales dentro del Estado de Puebla (2023, ID Proyecto: 00118).

También agradezco a la VIEP la beca recibida para la conclusión de tesis, con recursos del proyecto: Calidad y uso del suelo en los Parques Nacionales dentro del Estado de Puebla (2023, ID Proyecto: 00118).

Al grupo de trabajo Tleyolotli, que me permitió desarrollar los trabajos de campo en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

A la Dra. María Guadalupe Tenorio–Arvide, Profesora Investigadora Titular A. T. C. de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por su valiosa aportación a este trabajo de investigación.

Al Dr. Miguel Ángel Valera Pérez, Profesor Investigador Titular de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por compartirme parte de su conocimiento y conducirme a la conclusión satisfactoria de esta investigación.

A los integrantes de mi comité la Dra. Gabriela Pérez Osorio, La Dra. Elsa Iracena Castañeda Roldán (QEPD) y al Dr. Jorge Antonio Yáñez Santos; por sus importantes contribuciones a este proyecto.

A la Dra. Gladys Linares Fleites y al Dr. Ricardo Darío Peña Moreno, por su apoyo en el desarrollo estadístico de este trabajo; y a la Dra. Yaselda Chavarín Pineda por su apoyo en temas de sistemas información geográfica.

Al Pofr. César Calderón y al Mtro. Abel Cruz Montalvo, por su apoyo en las actividades de laboratorio.

A la familia Pérez, propietarios del predio Huey Tecoch, y de manera especial al Sr. Nicolás Pérez por su apoyo en los trabajos de campo, por considerarnos parte de su proyecto de conservación y por compartirme los conocimientos de agricultura tradicional de su comunidad.

Dedico este trabajo:

*A mis hijos Valentina, María José y Alejandro,
quienes son mi fuente de inspiración y motivación.*

*A mi compañero de vida Edgar Santiago,
quien ha estado conmigo siempre que lo he necesitado.*

*A mis padres Esteban y María,
quienes a través de sus distintas formas
me han motivado a salir adelante.*

*A mis hermanas
Verónica, Mariana, Ma. Elena,
Carmen, Flor, Susana, Teresa,
y en especial,
Andrea y Juana quienes me apoyan y me motivan.*

Resumen

A reserva de la vitalidad que representan los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo, estos están siendo amenazados por factores como la tala clandestina, deforestación, el cambio de uso de suelo, etc. En la actualidad, se vislumbra como solución a estos problemas los sistemas agrícolas de uso tradicional, por lo que en este estudio se evaluó la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo con manejo agroecológico, a través del fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria, en el Parque Nacional La Malinche.

Para lograr este objetivo se identificó el suelo de calidad inherente; se identificaron los diferentes servicios ecosistémicos que proporciona el sistema agroecológico; se estimó el carbono almacenado en el suelo de un sector de referencia; se estableció la línea base del servicio ecosistémico de prevención de la erosión; se determinó la influencia del manejo del suelo en la de conservación de la fertilidad; y, se fortaleció la investigación transdisciplinaria existente entre los integrantes del grupo Tleyolotli con investigadores y alumnos de la BUAP y otras instituciones.

De acuerdo a estos resultados se puede concluir que el suelo de la zona de estudio corresponde a un Andisol (Soil Taxonomy), cuyos servicios ecosistémicos identificados, en un sector de referencia con manejo agroecológico, destacan el almacenamiento de carbono, el control de la erosión y la fertilidad del suelo; algunas de las formas de manejo agrícola tradicionales, en lo referente al servicio ambiental de almacenamiento de carbono en los suelos, son benéficas para el sistema por lo que deberían ser promovidas por los gestores del Área Natural Protegida (ANP); las condiciones climáticas de la región, las características del tipo de suelo, y las pérdidas de suelo estimadas evidencian la necesidad de la aplicación de medidas de conservación que permitan detener el proceso erosivo, y, por tanto, la pérdida de la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos que este presta; el manejo de suelo es un factor importante en la conservación de la fertilidad del mismo; y, la investigación transdisciplinaria es indispensable en el estudio de los agroecosistemas, especialmente en los de uso tradicional de la región de la montaña Malinche, dado que fortalece la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo.

Productos obtenidos

Capítulo de libro

Libro: Ciencia y Transdisciplinariedad (ISBN: 978-84-19588-03-06).

Capítulo de libro: 2. Investigación Transdisciplinaria para la Evaluación de un Proyecto sobre los Servicios Ecosistémicos Prestados por el Suelo en el Parque Nacional La Malinche, México.

Autores: ¹Gladys Linares Fleites, ¹María Guadalupe Tenorio Arvide, ¹Josefina Cervantes Vargas, ¹Miguel Ángel Valera Pérez.

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
II.1	Problema de investigación	2
II.2	Delimitación.....	2
II.3	Pregunta de investigación	5
II.4	Hipótesis.....	5
II.5	Objetivos	5
II.5.1	General.....	5
II.5.2	Específicos	5
II.6	Justificación	6
III.	MARCO TEÓRICO.....	7
III.1	Sistemas agroforestales y agroecológicos	7
III.1.1	Elementos de los sistemas agroecológicos	8
III.2	El Suelo	10
III.2.1	Clasificación del suelo	12
III.2.2	Suelos de México.....	16
III.2.3	Calidad del suelo	17
III.2.3.1	Evaluación de la calidad del suelo	17
III.2.3.2	Indicadores de la calidad del suelo	18
III.2.4	Servicios ecosistémicos basados en el suelo.....	19
III.2.4.1	Almacenamiento de carbono.....	21
III.2.4.2	Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad	24

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO

III.3 La investigación transdisciplinaria	25
IV. ANTECEDENTES	27
IV.1 Estudios relevantes en el Parque Nacional La Malinche	27
IV.2 Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlacuéyatl.....	29
V. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
V.1 Aspectos físicos.....	30
V.1.1 Clima	30
V.1.2 Fisiografía.....	31
V.1.3 Orografía	32
V.1.4 Geología.....	32
V.1.5 Hidrografía.....	36
V.1.6 Suelos	38
V.2 Aspectos biológicos.....	40
V.2.1 Vegetación y flora	40
V.2.2 Fauna	44
V.3 Aspecto demográfico, económico y social	45
V.3.1 Demografía	45
V.3.2 Actividad económica	46
V.3.3 Sociedad	46
V.4 Aspecto biocultural.....	47
V.5 Uso de suelo y tenencia de la tierra	48
VI. MARCO METODOLÓGICO.....	49
VI.1 Tipo de investigación.....	49

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO

VI.2 Muestreo y análisis de suelos	50
VI.3 Suelos de calidad inherente	54
VI.3.1 Régimen de humedad y temperatura del suelo	54
VI.3.2 Suelo del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”	55
VI.4 Identificación de los servicios ecosistémicos del sistema agroecológico	57
VI.5 Estimación del almacenamiento de carbono	57
VI.6 Estimación de la pérdida de suelo.....	58
VI.7 Conservación de la fertilidad del suelo	61
VI.7.1 Análisis estadístico.....	62
VI.8 Fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria	64
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
VII.1 Caracterización fisicoquímica	66
VII.2 Suelo de calidad inherente del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”	74
VII.3 Servicios ecosistémicos del sistema agroecológico	88
VII.4 Almacenamiento de carbono	102
VII.5 Erosión	104
VII.6 Conservación de la fertilidad del suelo	107
VII.6.1 Análisis estadístico.....	109
VII.7 Fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria	114
VIII. CONCLUSIONES	119
LOGROS Y RECOMENDACIONES	120
IX. REFERENCIAS	122
ANEXO I.....	131

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO

Caracterización fisicoquímica del suelo agrícola convencional de referencia	131
ANEXO II.....	134
Gráficas de cumplimiento de supuestos MANOVA.....	134

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Localización del Sector de Referencia en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, en la porción correspondiente al Estado de Puebla del Parque Nacional La Malinche..... 4

Imagen 2. Principales grupos de suelo en México. 17

Imagen 3. Funciones del suelo y sus servicios ecosistémicos. 21

Imagen 4. El COS en el ciclo global del carbono. 22

Imagen 5. Sección estratigráfica del punto 389 cercano a la localidad de Canoa en el Parque Nacional La Malinche..... 34

Imagen 6. Mapa geológico de La Malinche. 35

Imagen 7. Subcuencas hidrológicas de la zona de estudio. 37

Imagen 8. Mapa de las unidades de suelo de la región donde se localiza el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, en la porción correspondiente al estado de Puebla, del Parque Nacional La Malinche. 39

Imagen 9. Tipos de vegetación en el Parque Nacional La Malinche, en la porción correspondiente al estado de Puebla donde se localiza el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”..... 43

Imagen 10. Localización de los puntos de muestreo en el Sector de Referencia. 51

Imagen 11. Intensidad de participación, de las partes interesadas, en una investigación transdisciplinaria..... 65

Imagen 12. Perfil de suelo conservado con vegetación natural..... 77

Imagen 13. Distribución de isotermas del Parque Nacional La Malinche, donde se localiza el Centro de Cultura Ambientla “Tezokihkall” (CCAT)..... 83

Imagen 14. Distribución de isoyetas del Parque Nacional La Malinche, donde se localiza el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall” (CCAT). 84

Imagen 15. Climograma del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, en el Parque Nacional La Malinche..... 86

Imagen 16. Elementos del sistema agroecológico en el Sector de Referencia del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, Canoa..... 88

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO

Imagen 17. Plantación del agave salmiana en el sistema de terrazas del sistema agroecológico.	90
Imagen 18. Elementos del sistema agroecológico del sector de referencia en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.	91
Imagen 19. Gráfica de prueba de t para COS, del sistema agroecológico y la capa C1 del perfil de suelo conservado	103
Imagen 20. Identificación de la altura de pérdida de suelos, en el sistema de terrazas, respecto al suelo conservado bajo vegetación natural.	105
Imagen 21. Localización del sistema agroecológico y de los predios con manejo agrícola convencional, en el paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.	108
Imagen 22. Portada preliminar del libro “Ciencia y Transdisciplinariedad”.	114
Imagen 23. Recorrido de la práctica de campo, del curso de materia orgánica, desarrollada en el “Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.	115
Imagen 24. Actividades desarrolladas en la Feria de la Milpa (1ª Ed.) en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.	116
Imagen 25. Siembra de maguey (Agave salmiana) para el restablecimiento del Sistema Agroecológico “Metepantle”.	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo. 19

Tabla 2. Algunas de las actividades permitidas y no permitidas en la Subzona de Uso Tradicional Tlaxcala–Puebla del Parque Nacional la Montaña Malinche o Matlacuéyatl. 30

Tabla 3. Municipios pertenecientes al Parque Nacional La Malinche. 45

Tabla 4. Indicadores de calidad de suelo considerados para evaluar fertilidad. 61

Tabla 5. Problema, causas, indicadores a evaluar y sugerencias de mejora de la calidad de suelo. 61

Tabla 6. Propiedades físicas del suelo con vegetación natural..... 66

Tabla 7. Propiedades físicas del suelo en el sistema agroecológico del Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche. 69

Tabla 8. Propiedades químicas del suelo con vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche. 72

Tabla 9. Propiedades químicas del suelo en el sistema agroecológico, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche..... 73

Tabla 10. Descripción del perfil de suelo bajo vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche. 78

Tabla 11. Descripción de la morfología del perfil de suelo bajo vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche..... 79

Tabla 12. Prueba de Fieldes y Perrot aplicada a los diferentes horizontes del perfil de suelo con vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche. 80

Tabla 13. Estaciones climatológicas de la ladera sur del Parque Nacional La Malinche. 81

Tabla 14. Fórmula del clima calculada en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkal”. 85

Tabla 15. Identificación de servicios ecosistémicos proporcionados en función de las prácticas realizadas en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch. 95

Tabla 16. Identificación de servicios ecosistémicos, de acuerdo con su clasificación, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche..... 98

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO CON MANEJO AGROECOLÓGICO

Tabla 17. Provisión de servicios ecosistémicos por potenciales prácticas implementadas en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch, en el Parque Nacional La Malinche.	99
Tabla 18. COS almacenado en el sistema de terrazas.	102
Tabla 19. Prueba de t para COS, del sistema agroecológico y la capa C1 del perfil de suelo conservado.	103
Tabla 20. Masa de suelo, para cada horizonte del perfil de suelo conservado.	105
Tabla 21. Pérdida de suelo total y para cada una de las terrazas del sistema.	106
Tabla 22. Estimación de la erosión potencial de suelo en el Sistema Agroecológico del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.	106
Tabla 23. Caracterización química de suelos de agricultura convencional, en el paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.	109
Tabla 24. MANOVA de un factor de dos niveles: SA y AGR, para el SE de fertilidad del suelo.	110
Tabla 25. Valores propios para el factor Manejo, de fertilidad del suelo.	111
Tabla 26. Vectores propios para el factor Manejo, de fertilidad del suelo.	111
Tabla 27. ANOVA para cada una de las variables respuesta, para el efecto Manejo.	112

I. INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos que proporciona la naturaleza a la sociedad son esenciales para la vida humana: proporcionan agua y alimentos; regulan el clima, favorecen la polinización de los cultivos y la formación de los suelos, brindan beneficios espirituales, culturales y recreativos, entre otros (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022).

Con respecto al suelo, algunos de los servicios ecosistémicos más importantes basados en este recurso son: regulación del clima, control de la erosión, control de plagas y enfermedades, disponibilidad y calidad del agua, producción de la biomasa, conservación de la biodiversidad, etc. (FAO, 2015a). Sin embargo, están siendo amenazados principalmente por la deforestación y el cambio de uso de suelo, causadas por presiones agrícolas o por el acelerado crecimiento de las ciudades sin una planeación (FAO, 2015b).

El Parque Nacional La Malinche, en el estado de Puebla y Tlaxcala, actualmente presenta graves problemas ambientales como el cambio de uso de suelo (de forestal a cultivo) y la erosión, lo cual afecta directamente a la calidad de este. Esta situación se debe principalmente a la deforestación en la zona, ocasionada por la tala clandestina, incendios forestales y la plaga del gusano descortezador (Mojica, 2021). Esta situación se corrobora con información de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018a), quien reporta en su informe que la mayor degradación de suelos en México es causada por la deforestación.

En este contexto, una solución que se vislumbran viable, y que apoya el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos asociados al suelo y al rescate de los saberes ancestrales, son las técnicas de agricultura tradicional, que, si bien se desarrollan desde tiempos prehispánicos, actualmente están desapareciendo (Moreno-Calles et al., 2013).

El desarrollo del presente proyecto de tesis coadyuvará:

- En el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo, mediante la investigación transdisciplinaria.

- En el rescate de los conocimientos ancestrales relacionados con técnicas de agricultura tradicional, realizadas por las comunidades originarias de la región.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

II.1 Problema de investigación

Los procesos de deforestación y cambio de uso de suelo tienen consecuencias ambientales, económicas y sociales, a diferente escala a nivel mundial (Galicia et al., 2007). De manera local, en el Parque Nacional La Malinche, uno de los principales problemas a los que se enfrenta este territorio es la deforestación debido a que la vegetación se está perdiendo por diversos factores, entre ellos: los cambios climatológicos, la tala clandestina, la plaga del escarabajo descortezador y los incendios (Mojica, 2021). Sin embargo, esta situación lleva a otro tipo de problemas ambientales en la zona, como la erosión por el cambio de uso de suelo, principalmente de forestal a agrícola; lo que ha ocasionado una disminución de la calidad del suelo (degradación) y por tanto afectaciones en los servicios ecosistémicos (Galicia et al., 2007).

Otros de los problemas identificados, y que suma en la problemática socioambiental de la zona, es el abandono de la implementación de técnicas agrícolas de uso tradicional, lo cual conlleva a una pérdida de conocimientos ancestrales de las comunidades originarias respecto de estas técnicas de conservación (Moreno-Calles et al., 2013).

II.2 Delimitación

A reserva de que el Parque Nacional La Malinche ocupa más de 46 mil hectáreas, el área de estudio se localiza en las inmediaciones de un centro de cultura ambiental (Imagen 1), en el paraje denominado Huey Tecoch, ubicado en el territorio correspondiente al estado de Puebla en la denominada Subzona de Uso Tradicional Tlaxcala-Puebla (CONANP, 2013). Esta región, considera una superficie de 27,192.614477 hectáreas, siendo esta, la subzona que ocupa mayor superficie dentro del Parque Nacional. Esta subzona comprende un polígono que forma un anillo alrededor de las faldas centrales de la Malinche, con un gradiente altitudinal que fluctúa entre los 2,400 y 2,900 m s.n.m.; área en la que ancestralmente se han desarrollado actividades

agropecuarias con el objetivo de satisfacer las necesidades de alimentación, sociales y económicas de las comunidades de la región (CONANP, 2013).

La zona de estudio corresponde al Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall” en el que se estableció un sector de referencia, consistente en un sistema agroecológico con terrazas de distinto manejo, siendo este administrado por los integrantes del Grupo Tleyolotli, en el que participan pobladores originarios de las comunidades aledañas, asociaciones civiles y académicos, con el objetivo de realizar acciones para la conservación sostenible de la región.

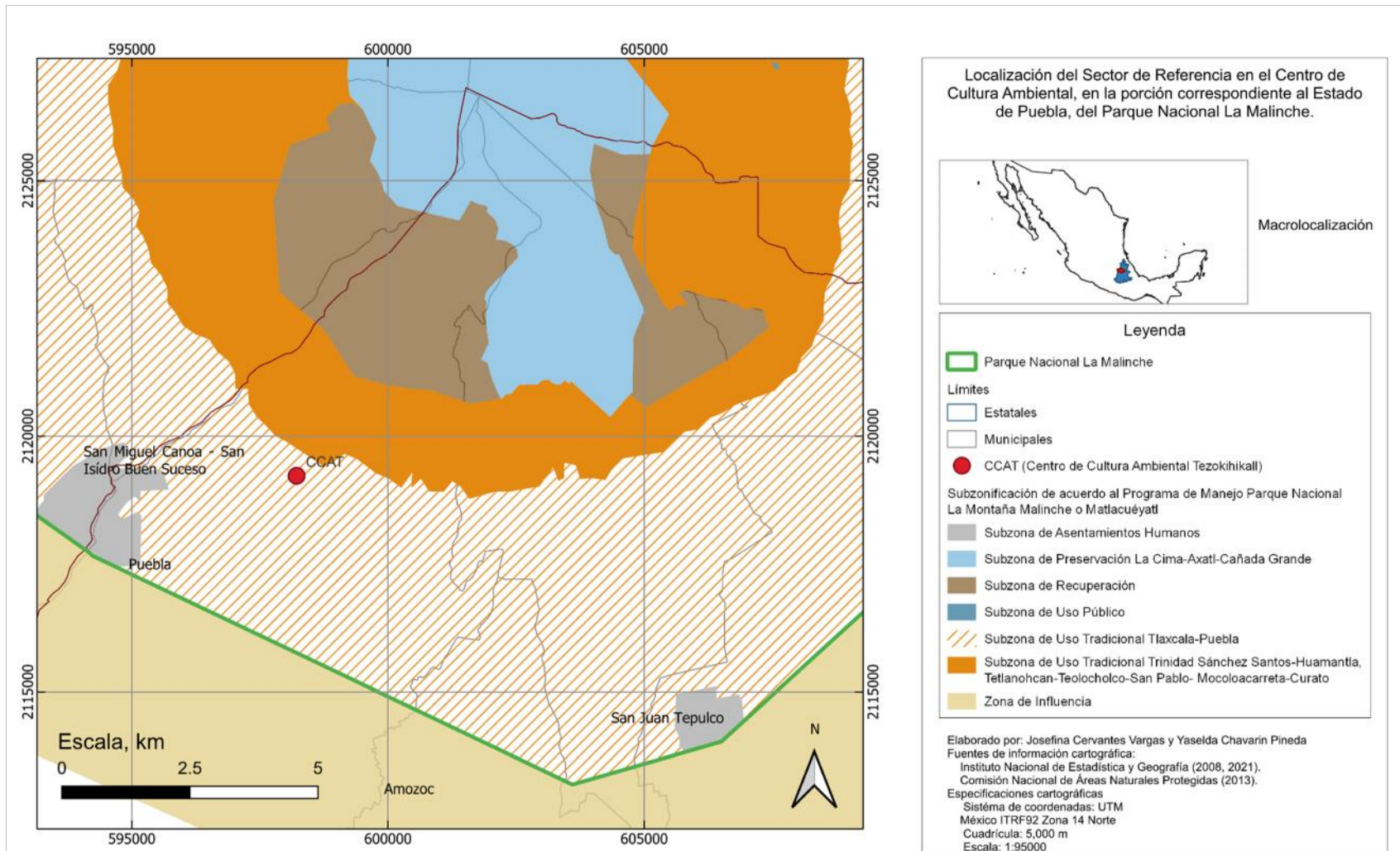


Imagen 1. Localización del Sector de Referencia en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, en la porción correspondiente al Estado de Puebla del Parque Nacional La Malinche.

Fuente: Elaboración propia con información de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y CONANP.

II.3 Pregunta de investigación

¿Cómo incide la investigación transdisciplinaria en la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo con manejo agroecológico en el Parque Nacional La Malinche?

II.4 Hipótesis

La investigación transdisciplinaria permite fortalecer la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo con manejo agroecológico, en el Parque Nacional La Malinche.

II.5 Objetivos

II.5.1 General

Evaluar la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo con manejo agroecológico, a través del fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria, en el Parque Nacional La Malinche.

II.5.2 Específicos

Objetivo Específico 1 (OE1): Identificar el suelo de calidad inherente, con base a criterios de la WRB y la Soil Taxonomy, en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall” del Parque Nacional La Malinche.

Objetivo Específico 2 (OE2): Identificar los servicios ecosistémicos prestados por el suelo de los sistemas agroecológicos implementados en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, en el Parque Nacional La Malinche.

Objetivo Específico 3 (OE3): Estimar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, en un sector de referencia del Parque Nacional La Malinche, estableciendo la línea base.

Objetivo Específico 4 (OE4): Establecer la línea base del servicio ecosistémico de prevención de la erosión, mediante la estimación de la pérdida de suelo, en un sector de referencia del Parque Nacional La Malinche.

Objetivo Específico 5 (OE5): Determinar la influencia del manejo del suelo, sistema agroecológico y agricultura convencional, en el servicio ecosistémico de conservación de la fertilidad, en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall” del Parque Nacional La Malinche.

Objetivo Específico 6 (OE6): Fortalecer la investigación transdisciplinaria existente entre los integrantes del Grupo Tleyolotli con los investigadores y alumnos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y otras instituciones.

II.6 Justificación

Como plan de acción mundial a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, la Agenda 2030, fue creada por diferentes actores de la sociedad para lograr atender los principales problemas que vive la humanidad, tales como la degradación ambiental (ONU, 2022).

Dado que, el ANP La Malinche presenta problemas de degradación ambiental, como la pérdida de suelo (Alvarado et al., 2007), lo que conllevan a la pérdida de sus funciones y por tanto de los servicios ecosistémicos (FAO, 2015b) que provee la naturaleza de la zona, es necesario realizar una evaluación de cómo incide en el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos basados en el suelo la investigación transdisciplinaria.

El desarrollo de este trabajo coadyuva en algunos de los principales Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030; la cual fue firmada y ratificada por nuestro país. Se puede identificar que el principal objetivo en el que se puede aportar para su cumplimiento con el tema de investigación es el ODS 15, denominado “Vida de ecosistemas terrestres”, y las metas 15.1 y 15.2; puesto que, en estas, se establece como prioridad el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, haciendo énfasis en los bosques y el manejo sustentable de los mismos, a lo cual se aspira con el desarrollo del tema de investigación (ONU, 2022).

Otro de los aspectos importantes, es que en las últimas décadas se han incrementado los estudios de formas de uso de la tierra tradicionales como estrategia para evitar la degradación de los suelos. En nuestro país, se han realizado diferentes investigaciones que identifican y clasifican los diversos sistemas agroforestales tradicionales que aún se conservan en algunas regiones de nuestro país, los cuales se considera ayudan a mantener las propiedades del suelo, mejorando la

calidad de dicho recurso edáfico y por tanto los servicios ecosistémicos que este provee (Moreno-Calles et al., 2013).

La zona de la Montaña Malinche también corresponde a una Región Terrestre Prioritaria de México, RTP-106 “La Malinche”; la cual fue catalogada así dada la importancia que posee la montaña para el estado de Tlaxcala, en cuanto a la gran cantidad y diversidad de los servicios ambientales que presta y a la necesidad de detener el acelerado deterioro de sus ecosistemas, ya que cuenta con un importante bosque de pino en buen estado de conservación (CONABIO, 1989). El desarrollo de este estudio sentará las bases para el desarrollo e implementación de sistemas agroecológicos tradicionales en la región, como instrumento de referencia para un uso sostenible de los recursos, y al mismo tiempo son acordes a lo establecido en los diferentes esquemas de planeación del Programa de Manejo del Parque Nacional para áreas que se encuentran en la subzona de uso tradicional (CONANP, 2013).

Esta tesis aporta información importante al Programa Nacional Estratégico de CONAHCYT, denominado Soberanía alimentaria, el cual busca conservar y promover la producción de alimentos básicos tomando en consideración la diversidad productiva y cultural de la comunidad (<https://conahcyt.mx/pronaces/>).

III. MARCO TEÓRICO

III.1 Sistemas agroforestales y agroecológicos

En 1982 el Consejo Internacional para la Investigación en la Agroforestería (Farrel & Altieri, 1992), acuñó el concepto de agroforestería como:

...un sistema sustentable de manejo de cultivos y de tierra que procura aumentar los rendimientos en forma continua, combinando la producción de cultivos forestales arbolados (que abarcan frutales y otros cultivos arbóreos) con cultivos de campo o arables y/o animales de manera simultánea o secuencial sobre la misma unidad de tierra, aplicando además prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local. (229)

Como complemento al concepto anterior, Farrel y Altieri (1992) indican que las características de la agroforestería deben considerar los siguientes aspectos:

-) Estructura, que considera árboles, cultivos y animales.
-) Sustentabilidad, al aplicar los modelos de los ecosistemas naturales a los sistemas agrícolas para mantenerse a largo plazo sin degradar la tierra.
-) Incremento en la productividad, al mejorar las interrelaciones entre los elementos del sistema.
-) Adaptabilidad cultural/socioeconómica ya que puede adaptarse a predios de diferentes dimensiones, tanto de grandes como pequeños agricultores, aunque siempre ha sido asociada a zonas marginadas y pobres dado que son mínimos los recursos tecnológicos necesarios en su implementación.

Por otro lado, la agroecología es descrita por la FAO (2023), como aquella forma en la que se interrelacionan los conocimientos científicos y los conocimientos tradicionales con el objetivo de producir alimentos de una manera sostenible. Con el objetivo de que los países adopten esta nueva forma de producción de alimentos, la FAO (2018) ha dado a conocer los 10 elementos de la agroecología, los cuales son interdependientes, están interrelacionados y son coincidentes a los elementos de la agroforestería, siendo estos los siguientes:

-) Aquellos que consideran las características de los sistemas agroecológicos, las prácticas y los criterios de innovación: diversidad, sinergias, eficiencia, resiliencia, reciclaje y la creación conjunta e intercambio de conocimientos.
-) Los relacionados al contexto: valores humanos y sociales y la cultura y tradiciones alimentarias.
-) Los referidos a un entorno propicio para su ejecución: economía circular y solidaria y la gobernanza responsable.

III.1.1 Elementos de los sistemas agroecológicos

En las terrazas y metepantles de Tlaxcala, los campesinos de la zona manejan el suelo a través de los siguientes elementos: bordos o muros de contención, vegetación (en bordos y zonas cultivables) y, zanjas y depósitos de agua o jagüeyes (Pérez et al., 2017).

Bordos o muros de contención

Existen diferentes tipos de bordos y sus dimensiones de largo y ancho varían de uno a otro en función de la pendiente del terreno y las dimensiones de este (González, 2014). Entre las especies que con mayor frecuencia se siembran en los bordos de tierra se tiene al maguey manso (*Agave salmiana*), aunque pueden existir otras especies de magueyes (*Agave spp.*), además de nopales (*Opuntia spp.*); árboles de la región como pino (*Pinus leiophylla*), encino (*Quercus castanea*), sabino (*Juniperus deppeana*), etc.); árboles frutales nativos como el tejocote (*Cartaegus mexicana*) y capulín (*Prunus capulí*); y otros de introducidos como el durazno (*Prunus pérsica*) y el chabacano (*Prunus armeniaca*); igualmente algunas especies arbustivas como palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*) y jarilla (*Secnecio salignus*); siendo algunas de las ventajas más importantes la resistencia a la sequía y a las heladas de los magueyes, árboles y arbustos, empleados en los bancales o terrazas (Moreno–Calles et al., 2013).

Cajetes o zanjas y depósitos de agua

Las condiciones de precipitación de la zona de la montaña de la malinche, con periodos de lluvia intensa, pueden ocasionar erosión severa en la zona; por lo cual los campesinos han adaptado sistemas de uso tradicional para evitar el problema de escorrentía superficial y erosión (Gliessman, 2002).

En las terrazas y bancales se construyen conjuntos de canales que conducen la escorrentía superficial del agua de lluvia y sedimentos del suelo, cuesta debajo de la pendiente, hasta llegar a zanjas o tanques construidas en el suelo a través de la extracción de este. La construcción de estos cajetes ayuda en la acumulación de agua, lo cual permite la infiltración, así como también la acumulan sedimentos de suelo que posteriormente son reintroducidos en las zonas cultivables ya que estos cuentan con muchos aportes nutrimentales (Gliessman, 2002; Pérez, 2012).

En algunas zonas del estado de Tlaxcala se construyen los cajetes de manera escalonada para regular la cantidad de agua almacenada y para que el exceso de esta sea conducido hacia depósitos naturales (jagüeyes) y barrancas (Pérez et al., 2017).

Zonas cultivables

Las zonas cultivables son aquellas zonas que se ubican en medio de dos bordos o muros de contención, y que es aprovechada para la siembra de diferentes cultivos. En el “Metepantle” de la zona, generalmente se establece el sistema de Milpa Nahua, que considera la siembra de maíz con frijol, calabaza, quelite y maguey, entre otros, lo cual se considera importante ya que es la base de una alimentación integral para los campesinos (Valera et al., 2020).

III.2 El Suelo

La FAO (2022a) define al suelo como un cuerpo natural integrado por horizontes o capas de suelo compuestas de minerales, producto de la meteorización de algunos materiales, material orgánico, así como aire y agua; también lo identifica como el producto final de la influencia de factores como el tiempo, el clima, la topografía, los organismos (flora, fauna y ser humano), y el material parental (rocas y minerales originarios), el cual lo diferencia en sus propiedades biológicas y fisicoquímicas. De acuerdo con lo anterior, las propiedades físicas, químicas y biológicas que caracterizan al suelo, son el resultado de su génesis, así como de las diferentes prácticas que se desarrollan en este (Manahan, 2007).

Propiedades físicas

Color del suelo: es una de las propiedades más importantes en la identificación de los diferentes horizontes de suelo, ya que este refleja la composición y las condiciones de óxido reducción del suelo, en condiciones pasadas y presentes (FAO, 2009). A reserva de que el color del suelo se deriva de diferentes procesos pedogenéticos y del material parental del que se originó, de manera general, está definido por pequeñas partículas minerales recubiertas de materiales como óxidos de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de manganeso (negro) y la materia orgánica humificada (oscuro) (FAO, 2009; Pritchett, 1990).

Textura: es referida a la proporción de las clases del tamaño de partícula en un volumen de suelo definido, cuyo tamaño va de 2 μm para arcilla hasta 2000 μm para arenas muy gruesas. Para definir la textura de la fracción fina del suelo se utilizan las diferentes clases texturales.

Densidad aparente: está definida como la masa por unidad de volumen, sin embargo, cuando se analizan cuerpos porosos como el suelo y se toma en consideración no únicamente las partículas (densidad real) sino también su organización se habla de densidad aparente (Jaramillo, 2002).

Propiedades químicas

Intercambio catiónico: la existencia de partículas con superficies cargadas de forma negativa, como las arcillas y la materia orgánica (cambiadores), requiere de la existencia de iones de signo contrario para mantener la electroneutralidad (Porta et al., 2003). El mismo autor indica que esta propiedad de intercambiar cationes de la fase líquida a la superficie de un cambiador, desadsorbiendo al mismo tiempo otros cationes equivalentes, por destrucción de complejos de superficie, se denomina Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Los Andosoles presentan propiedades de intercambio catiónico altamente variables, es decir, la carga de la superficie de los componentes minerales y coloides orgánicos es dependiente del pH y de la concentración de electrolitos (Valera, 1993).

Reacciones del suelo: la reacción del suelo, determinada por el pH y la acidez intercambiable, es la característica que indica el nivel de acidez o alcalinidad del suelo, e influye de manera importante en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de la calidad del suelo. En el caso de los andosoles, el intercambio catiónico es altamente variable, ya que la carga es fuertemente dependiente del pH.

El conocimiento de las características o propiedades del suelo, así como de las diferentes reacciones que ocurren en él, es utilizado para diferentes propósitos siendo algunos de ellos, la clasificación de suelos, la fertilidad y nutrición de las plantas, la planificación agrícola y forestal, etc.

Desafortunadamente, la conservación del suelo nunca ha estado dentro de las prioridades de las políticas públicas, y mucho menos considerado como un recurso patrimonial ni ambiental, ello debido, principalmente, a que no es un recurso que se pueda consumir de manera directa y también a la equivocada suposición de que el suelo es un recurso que puede renovarse en breves periodos de tiempo (Zinck, 2005; Guevara et al., 2012; Gardi et al., 2014; FAO, 2015; citados por SEMARNAT, 2018).

III.2.1 Clasificación del suelo

Dada la compleja naturaleza del recurso suelo respecto a los elementos que lo integran (en las diferentes fases sólidas, líquidas y gaseosas), así como a sus características fisicoquímicas y biológicas, ha resultado difícil el poder clasificar a este recurso en los diferentes países del mundo (SEMARNAT, 2018). Los dos sistemas más importantes son la taxonomía de suelos del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA–NRCS, 2014) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) de la FAO (2008).

Los criterios de clasificación tomados en consideración por la Soil Taxonomy son los siguientes (Porta et al., 2003):

-) Suelos minerales y orgánicos
-) Horizontes de diagnóstico
-) Características de diagnóstico
-) Régimen de humedad del suelo
-) Régimen de temperatura del suelo

Régimen de humedad

El término “régimen”, relacionado con el suelo, representa la secuencia de las diferentes condiciones de humedad y aridez del suelo durante un lapso específico de tiempo (Porta et al., 2003). Específicamente “régimen de humedad del suelo” está referido a la existencia o falta de agua subterránea o retenida en el suelo a una presión menor de 1500 kPa (agua disponible para las plantas), en el suelo o en horizontes concretos durante un año (FAO, 2009).

Es necesario precisar la sección de control de humedad del suelo con el objetivo de facilitar la determinación de los patrones de humedad del suelo mediante información climática. La USDA (2014) establece que los límites superiores de la sección de control se relacionan con la profundidad a la que un suelo seco (con una tensión superior a 1500 kPa, pero no aire seco) absorberá 2,5 cm de agua en un periodo de 24 horas, mientras que el límite inferior hace referencia a la profundidad a la que un suelo seco absorberá 7,5 cm de agua en un lapso de 48 horas. En este contexto, y dado que la clase de tamaño de partícula del perfil de suelo es

principalmente arenosa, la misma institución estima que la sección de control se encuentra aproximadamente entre 30 a 90 cm.

La clasificación de los regímenes de humedad de suelo, siguiendo las directrices de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff–NRCS/USDA, 1999) es:

Régimen de humedad ácuico (*L. aqua, agua*): es un régimen de reducción en un suelo que carece de oxígeno disuelto debido a la saturación con agua. No se clasifica como régimen ácuico aquellos suelos que, a pesar de estar saturados con agua, contienen oxígeno disuelto debido al movimiento del agua o a condiciones desfavorables para los microorganismos, como temperaturas menores a 1°C.

Regímenes de humedad arídico y tórrido (*L. aridus, seco* y *L. torridus caliente y seco*): Estos términos se aplican al mismo patrón de humedad, pero se utilizan en diversas clasificaciones. En este régimen, la sección de control está dada en años normales:

1. Presencia de sequedad en todas partes durante más de la mitad de los días acumulados anualmente, siempre que la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm desde la superficie, supere los 5°C.
2. Con presencia de humedad en alguna o en todas sus partes durante menos de 90 días seguidos, siempre que la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm, sea superior a 8°C.

Régimen de humedad údico (*L. udus, húmedo*): en este régimen la sección de control de humedad no experimenta sequedad en ninguna parte durante un lapso que abarque hasta 90 días acumulados en años normales. En caso de que la temperatura promedio anual del suelo sea inferior a 22 °C y la diferencia entre la temperatura media invernal y la media veraniega del suelo (a una profundidad de 50 cm) sea de 6 °C o más, la sección de control de humedad permanecerá sin humedad en todas partes durante menos de 45 días consecutivos en los 4 meses que siguientes al solsticio de verano. Para este régimen, excepto durante intervalos breves, se necesita un sistema de tres fases (sólido–líquido–gaseoso) que esté presente en alguna parte o en toda la sección de control de humedad del suelo, siempre y cuando la temperatura del suelo sea superior a 5 °C.

Régimen de humedad ústico (*L. ustus, quemado; implica sequedad*): régimen con rangos de humedad intermedios, situado entre el régimen arídico y údico, donde la cantidad de humedad es restringida durante condiciones propicias para el crecimiento vegetal (no es válido para suelos que presentan permafrost). Considera las siguientes condiciones:

- J) Cuando la temperatura promedio anual del suelo es igual o supera los 22 °C, o si a una profundidad de 50 cm existe una diferencia menor a 6°C entre las temperaturas medias del suelo en invierno y verano. En este caso, la sección de control con régimen Ústico presentará sequedad en un periodo de 90 días o más acumulados durante años normales, siendo de forma parcial o completa, sin embargo, permanece húmedo, en un periodo mayor a 180 días anuales o durante 90 días o más de forma consecutiva.
- J) Por otro lado, cuando la temperatura media anual del suelo es menor de 22 °C y la diferencia de la temperatura media del suelo en verano y en invierno es de 6 °C o más (profundidad de 50 cm), la sección de control del suelo con régimen Ústico permanecerá seca de forma parcial o total por 90 días o más acumulativos en años normales, sin embargo, no lo estará en todas partes por más de la mitad de los días acumulativos cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm sea mayor de 5 °C. En este mismo sentido, si la sección de control en años normales está húmeda totalmente por 45 días o más consecutivos, en los 4 meses siguientes al solsticio de invierno, ésta estará seca en todas partes por menos de 45 días consecutivos en los 4 meses que siguen al solsticio de verano.

Régimen de humedad xérico (*Gr. xeros, seco*): es el régimen de humedad para áreas con climas mediterráneos, donde los inviernos son húmedos y frescos y los veranos son cálidos y secos. En este régimen, la sección de control de humedad en años normales está seca totalmente por 45 días o más consecutivos en los 4 meses siguientes al solsticio de invierno. También en años normales, la sección de control de humedad permanecerá húmeda en alguna parte por más de la mitad de los días acumulativos por año, en los que la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es mayor de 5 °C; o por 90 días o más consecutivos cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es mayor de 8 °C.

Régimen de temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes en la formación del suelo y el crecimiento de las plantas. La temperatura media anual del suelo varía en función de la profundidad de este, sin embargo, esta variación no resulta tan significativa estando muy relacionada con la temperatura media anual atmosférica. La Soil Taxonomy propone que se puede considerar una relación entre la temperatura media anual del suelo (tmas), a 50 cm de la superficie, y la del aire (tmaa) en 1°C superior a esta última (Porta et al., 2003).

La clasificación de los diferentes regímenes de temperatura del suelo, establecidos por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff-NRCS/USDA, 1999) está dada de la siguiente manera:

- J) **Gélico** (*L. gelare; congela*): Son suelos que presentan una temperatura media anual de 0 °C o menos (en los subórdenes Gelic y en los grandes grupos Gelic), o 1 °C o menos (en Gelisols), pudiendo ser a una profundidad de 50 cm debajo de la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, cualquiera que esté más somero.
- J) **Cryico** (*Gr. Kryos, frío; significa suelos muy fríos*). Los suelos en este régimen tienen una temperatura media anual entre 0 y 8 °C, pero no tienen permafrost.
- J) **Frígido**: Suelos que son más cálidos en verano que un suelo con régimen cryico, no obstante, su temperatura media anual varía entre 0 y 8 °C y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano (junio, julio y agosto) y en invierno (diciembre, enero y febrero) es 6 °C o más pudiendo ser a 50 cm de profundidad, debajo de la superficie del suelo, o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, si está más superficial.
- J) **Mésico**: La temperatura media anual del suelo es igual mayor de 8 °C, pero menor de 15 °C, y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es de 6 °C o más, pudiendo presentarse a 50 cm de profundidad debajo de la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.
- J) **Térmico**: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 15 °C, pero menor de 22 °C, y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es de 6 °C o más, ya sea a 50 cm de profundidad bajo la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.

- J) Hipertérmico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 22 °C y la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es de 6 °C o más, ya sea a una profundidad de 50 cm debajo de la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial.

Si el nombre de un régimen de temperatura del suelo tiene el prefijo iso, la temperatura media de verano y la media de invierno difieren en menos de 6 °C, a 50 cm de profundidad o hasta un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que es más superficial.

- J) Isofrígido: La temperatura media anual del suelo es menor de 8 °C.
- J) Isomésico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 8 °C, pero menor de 15 °C.
- J) Isotérmico: La temperatura media anual del suelo es igual o mayor de 15 °C, pero menor de 22 °C.
- J) Isohipertérmico: La temperatura media anual del suelo es 22 °C o mayor.

III.2.2 Suelos de México

México cuenta con 25 de las 32 unidades de suelo (Imagen 2), que son reconocidas por el sistema de clasificación de la WRB. A reserva de lo anterior, son solo seis grupos de suelo los que cubren en conjunto el 80.7% de la superficie nacional, dando como resultado que la diversidad edáfica nacional esté determinada por los restantes 19 grupos. Esta gran riqueza edáfica es explicada por las múltiples combinaciones de los factores que forman el suelo, presentes en el territorio nacional, formando una gran diversidad de microrrelieves, microclimas y tipos de vegetación (SEMARNAT, 2018).



Imagen 2. Principales grupos de suelo en México.

Fuente: SEMARNAT (2018a).

III.2.3 Calidad del suelo

Doran y Parkin (1994) consideran que la calidad del suelo es la "capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema y el uso de la tierra para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de las plantas y los animales". (p.7) Por otro lado, Moebius-Clune y colaboradores (2016), identificaron a la calidad del suelo de las siguientes dos formas:

-) Calidad inherente es aquella relacionada con la composición y las propiedades intrínsecas del mismo, que pueden ser influenciadas por factores naturales (a largo plazo) y por procesos formadores del suelo.
-) Calidad dinámica es aquella que cambia como resultado del uso y manejo del suelo a lo largo de la escala de tiempo humana.

III.2.3.1 Evaluación de la calidad del suelo

La calidad del suelo no puede medirse de manera directa, esta se mide usando diversos

indicadores de las propiedades (biológicos, químicos y físicos), incluidas en la mayoría de las descripciones de perfiles de suelo, así como de procesos o funciones del suelo directamente relacionados con los servicios ecosistémicos que prestan (Bünemann et al., 2018). Los rangos proporcionados para las mediciones de las propiedades inherentes, en la base de datos tradicional de levantamientos de suelos, se utilizan a menudo para establecer los límites para calificar o cuantificar a las mediciones de las propiedades dinámicas asociadas con la evaluación de la calidad del suelo (Karlen et al., 2003).

La NRCS considera que existen dos formas básicas para evaluar la calidad del suelo, una de ellas a través de mediciones periódicas, en un periodo de tiempo, para identificar cambios o tendencias en la capacidad del suelo para realizar sus funciones; y la otra es que valores medidos sean comparados con los de una condición del suelo estándar o de referencia (1999). Es posible el empleo de las dos formas para evaluar la calidad del suelo, sin embargo, se tomó como referencia para el desarrollo del presente trabajo realizar comparaciones entre distintas formas de manejo para determinar sus respectivos efectos sobre la calidad del suelo.

III.2.3.2 Indicadores de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad de suelo requiere del apoyo de variables que nos puedan servir como referencia para evaluar la condición en la que se encuentra el suelo, lo que es definido como indicador del suelo, ya que representan dicha condición, así como los cambios o tendencias que se presentan en la misma (Dumanski et al., 1998; citado por Bautista et al., 2004).

Indicadores físicos, químicos y biológicos

Los indicadores de calidad del suelo están referidos a las propiedades físicas, químicas y biológicas, del recurso edáfico, en función de cómo éstas afectan a las funciones o a los procesos que ocurren en el mismo (USDA–NRCS, 2015).

Doran y Parkin (1996) refieren que las condiciones necesarias para que las propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo sean consideradas como indicadores, estas deben cumplir con ciertas características, siendo algunas ellas las siguientes:

- Explicar los procedimientos que ocurren en el ecosistema.
- Integrar propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo.

- Mostrar las características de sostenibilidad que se pretenden evaluar.
- Ser sensibles a modificaciones de clima y manejo.
- Ser accesibles y aplicables a condiciones de campo.
- Poder ser replicados.
- Ser comprensibles de manera sencilla.
- Responder a alteraciones en el suelo, causadas por la degradación antropogénica.
- Formar parte de una base de datos del suelo que ya está establecida, en la medida de lo posible.

En este contexto, algunos de los indicadores de calidad del suelo más importantes identificados por diferentes autores pueden observarse en la Tabla 1:

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

Indicadores físicos	Indicadores químicos	Indicadores biológicos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estructura. ▪ Densidad aparente. ▪ Estabilidad de agregados. ▪ Infiltración. ▪ Profundidad del suelo superficial. ▪ Capacidad de almacenamiento del agua. ▪ Conductividad hidráulica. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad de nutrientes. ▪ Carbono orgánico total. ▪ Carbono orgánico lábil. ▪ pH ▪ Conductividad eléctrica. ▪ Capacidad de adsorción de fosfatos. ▪ Capacidad de intercambio catiónico. ▪ Materia orgánica. ▪ Nitrógeno total y nitrógeno mineralizable. 	<ul style="list-style-type: none">) Abundancia y subproductos de micro y macroorganismos (incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos).) Tasa de respiración, ergosterol y otros subproductos de los hongos.) Tasas de descomposición de los residuos vegetales.) N y C de la biomasa microbiana^a.

^aSQI, 1996; Karlen et al., 1997; citados por Bautista Cruz et al.(2004)

Fuente: Modificado de Bautista Cruz et al. (2004)

III.2.4 Servicios ecosistémicos basados en el suelo

La FAO (2022b) define a los ecosistemas como los elementos vivos y no vivos que interactúan entre y que proporcionan beneficios o servicios, a la humanidad; mientras que a los servicios ecosistémicos los identifica como todos aquellos beneficios que los ecosistemas proporcionan a las personas. Por otro lado, el programa de Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA) en su

informe de Ecosistemas y Bienestar humano: Marco para la Evaluación define como “los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas” (2005a, p. 78).

La clasificación de los servicios ecosistémicos, establecida por el programa de Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2003), considera a los servicios de provisión, de regulación y culturales, los cuales están estrechamente ligados a las personas, además de los servicios de soporte los cuales son la base de los otros servicios.

- Servicios de provisión: son los beneficios materiales o productos que las personas obtienen de los ecosistemas. Incluyen: fibras y alimentos, combustibles, recursos genéticos, medicinas, recursos ornamentales, y agua fresca. Beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, los cuales de manera general se comercializan en los mercados y supermercados, mientras que, por otro lado, muchos de los hogares rurales dependen directamente de estos servicios de provisión para su subsistencia.
- Servicios de regulación: son referidas a las ventajas que se obtienen de la regulación de los procesos de los ecosistemas, como lo es la conservación de la calidad del aire, la regulación del clima, el control de la erosión, la regulación del agua, la purificación del agua y el tratamiento de residuos, la regulación de enfermedades, control biológico, la polinización y la protección de las tormentas, son algunos de los “servicios de regulación” ofrecidos por los ecosistemas. A reserva de lo anterior, son imperceptibles y se dan por sentados, en la mayoría de los casos.
- Servicios culturales: son los servicios inmateriales que la humanidad recibe de los ecosistemas, a través del desarrollo espiritual, pensamiento reflexivo, actividades recreativas y la inspiración estética. Estos servicios comprenden la variedad cultural, principios espirituales y religiosos, sistemas de sabiduría tanto tradicionales como formales, principios educativos, motivación, aprecio por la belleza, interacciones sociales, sentido de identidad y conexión con un sitio, valores patrimoniales, ocio y turismo ecológico.
- Servicios de soporte: estos servicios son la base para la obtención de todos los demás servicios ecosistémicos, por ejemplo, la formación del suelo, ciclo de nutrientes,

producción de materias primas, etc., proporcionando entornos habitables para plantas y animales, favoreciendo la variedad de especies y preservando la diversidad genética.

De acuerdo con el Informe del Medio Ambiente en México, publicado por la SEMARNAT (2018a), los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo, basados en la capacidad que tienen de realizar sus funciones al formar parte de los ecosistemas (Imagen 3), contribuye de manera sustancial en cada una de las categorías, sin embargo, lo hace de manera importante en los servicios de base, suministro y regulación.



Imagen 3. Funciones del suelo y sus servicios ecosistémicos.

Fuente: FAO (2015b).

III.2.4.1 Almacenamiento de carbono

Uno de los servicios más importantes proporcionados por el suelo, basados en el ciclo del carbono, y debido a la importancia de este elemento en el contexto del cambio climático, es la gran capacidad del suelo para almacenar el carbono y por tanto en la regulación del clima

(SEMARNAT, 2018). La relación del suelo en el ciclo hidrológico también es muy importante ya que el agua almacenada en el suelo, también llamada agua verde, es utilizada por los cultivos del mundo en un 90%, ello de acuerdo con el “Informe de la situación del medio ambiente en México, Suelos” emitido por la SEMARNAT (2018). La misma institución ambiental menciona que esta función, combinada con la habilidad del suelo para absorber y luego liberar calor, lo convierte igualmente en un vital controlador del clima.

Ciclo de carbono

El Carbono Orgánico del Suelo (COS), es tan solo una parte del carbono (C) que circula a través de los diferentes almacenes del ciclo biogeoquímico del carbono (Imagen 4); siendo estos la atmósfera, la vegetación, los océanos y el propio suelo. Se estima que las reservas de COS, en el primer metro de suelo (1 500 PgC), son superiores a los almacenados en la atmósfera (800 PgC) y la vegetación (500 PgC) de manera conjunta (FAO, 2017a).

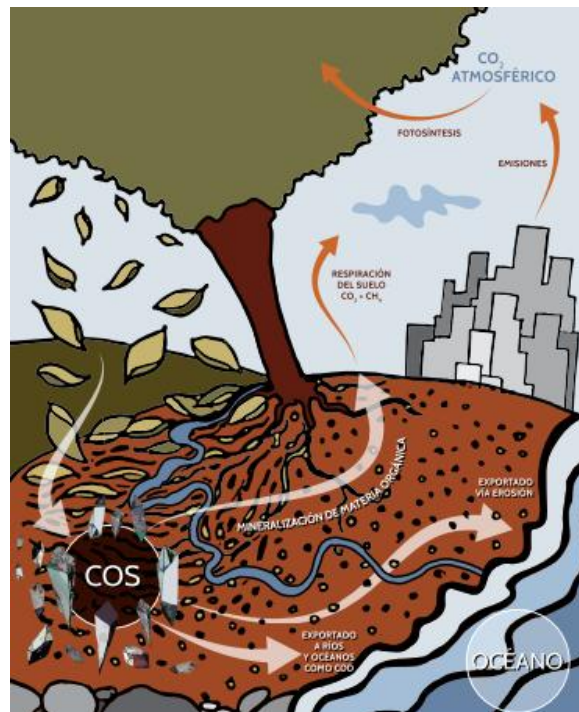


Imagen 4. El COS en el ciclo global del carbono.

Fuente: FAO, 2017a.

El dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), son los principales gases, basados en carbono, que se encuentran en la atmósfera. La fijación del CO_2 de la atmósfera a la vegetación se realiza

a través de los organismos autótrofos (principalmente plantas) en presencia de luz y agua (FAO, 2017a).

El material orgánico muerto, tanto de origen vegetal como animal, así como sus excretas, es incorporado al suelo, donde en primera instancia son desintegradas por parte de la mesofauna del suelo (anélidos, insectos, arácnidos, crustáceos, etc.); para posteriormente sufrir un cambio drástico en su composición química y estructura biológica bajo la acción de los microorganismos edáficos (hongos, bacterias, etc.) dando como resultado dos procesos (FAO, 2017a; Gallardo et al., 1982):

- J) Mineralización: formación de dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y otros compuestos orgánicos que se incorporan a la atmósfera.
- J) Humificación: generación de una mezcla biogeoquímica compleja en varias etapas de descomposición [Von Lützow et al., 2006, Paul, 2014; citados por (FAO, 2017a)] que pueden asociarse con la fracción mineral del suelo y ubicarse dentro de los agregados; lo que permite la permanencia del COS en el suelo durante largos periodos de tiempo como décadas, siglos e inclusive milenios (Schmidt et al., 2011; citado por (FAO, 2017a)).

La cantidad de COS almacenado en un suelo específico está determinada por la relación entre la salida y entrada de carbono en el suelo. De manera local, el C también se puede perder o ganar a través de procesos de erosión o deposición del suelo, ocasionando la redistribución de este a escala local, paisajística y regional (FAO, 2017a).

Materia Orgánica y Carbono Orgánico del Suelo

Los elementos orgánicos, como por ejemplo los residuos de plantas y animales muertos; así como organismos del suelo y materiales de menos de 2 mm, en sus diferentes etapas de descomposición son identificados como Materia Orgánica del Suelo (MOS). La MOS es considerada como un indicador no solo de productividad agrícola sino también de resiliencia ambiental ya que es importante en la estabilización de la estructura del suelo, retención y liberación de nutrientes, así como en la capacidad de retención de agua (FAO, 2017a).

La MOS contiene entre un 55 y 60 por ciento en masa de carbono (C), el cual, en muchos de los suelos se considera que corresponde a la mayor cantidad e inclusive totalidad de las reservas de

C (a las que se identifica como COS), a excepción de cuando aparecen formas inorgánicas de C en el suelo (FAO, 2017a).

De acuerdo con la estabilidad física y química del COS, este se puede clasificar en las siguientes categorías (FAO y GTIS, 2015; O'Rourke et al., 2015; citados por (FAO, 2017a)):

- J Reserva rápida (reserva lábil o activa) – Corresponde a la pérdida de la biomasa inicial una vez incorporado el carbono orgánico fresco al suelo (rango de rotación: 1 a 2 años).
- J Reserva intermedia – Considera al carbono orgánico parcialmente estabilizado en la superficie de los minerales, o al interior de los agregados (rango de rotación: 10 a 100 años).
- J Reserva lenta (reserva refractaria o estable) – Es el COS altamente estabilizado, con periodos de rotación muy lenta (rango de rotación: 100 a más de 1000 años).

III.2.4.2 Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad

La cubierta vegetal previene procesos de degradación del suelo como la erosión, permite la fijación de nutrientes como el nitrógeno y evita la pérdida de nutrientes (FAO, 2022). Sin embargo, los cambios de uso de suelo y las prácticas agrícolas han ocasionado procesos de degradación y erosión, a reserva de que actualmente en América del Norte y América Latina se están implementando diferentes prácticas de conservación como la labranza mínima (MEA, 2005). El suelo proporciona a las plantas diferentes servicios, siendo algunos de ellos el soporte mecánico, los nutrientes para su crecimiento y el agua a través de las raíces. Con respecto a los nutrientes que proporciona el suelo se han reconocido 16 elementos como esenciales para el crecimiento de las plantas, el oxígeno, carbono e hidrógeno son suministrados por el agua y el aire (dióxido de carbono). Los restantes 13 se consideran nutrientes vegetales y se distribuyen en 6 macronutrientes que son requeridos en grandes cantidades (Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P), Azufre (S) y Nitrógeno (N)) y 7 micronutrientes requeridos únicamente en cantidades traza (Boro(B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo) y Cinc (Zn)) (Thompson & Troeh, 2021).

Solo una parte de los nutrientes del suelo están disponibles para la planta, la gran mayoría se encuentran ligados al material mineral y a la materia orgánica. Las plantas absorben los nutrientes

en forma de iones, por ejemplo, el calcio, magnesio y potasio como iones Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ , respectivamente, mientras que el nitrógeno es absorbido en forma de NH_4^+ y NO_3^- , el fósforo como H_2PO_4^- y el azufre como SO_4^{--} (Thompson & Troeh, 2021).

Los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ (las bases del suelo) y NH_4^+ son los cationes más importantes en el intercambio iónico del suelo, necesarios en el proceso de nutrición de la planta. A partir de este aspecto se desprende el término de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) definida como la capacidad del suelo para adsorber cationes, siendo de esta manera equivalente a la carga negativa del suelo (Jaramillo, 2002).

La degradación de los suelos implica un desequilibrio entre los diferentes elementos e interacciones biológicas del suelo; así como afectaciones en su capacidad para producir bienes y desarrollar sus funciones, directamente relacionadas con el bienestar humano. Una de las consecuencias más importantes de la degradación de los suelos, tanto a nivel mundial como en México, es el deterioro y posterior pérdida de la calidad del suelo, y por tanto, de las funciones y servicios ambientales que se obtienen de este recurso edáfico, siendo quizá las funciones más afectadas la producción de alimentos y la captación de agua de lluvia (SEMARNAT, 2018).

Un reflejo de la degradación es la pérdida de las capas superficiales del suelo, lo cual corresponde a procesos de erosión (Pizarro et al., 2010). Así mismo, Cotler (2020), señala que la erosión hídrica ocurre cuando las gotas de lluvia impactan al suelo desnudo rompiendo los agregados del suelo y desprendiendo partículas, que pueden, por un lado, ocupar el espacio poroso del mismo suelo o de lo contrario, pueden ser arrastradas a través en su superficie; el viento es otro factor que de igual forma puede golpear al suelo desnudo rompiendo su estructura y transportando las partículas a otras áreas, en ambos casos se empobrece el suelo.

III.3 La investigación transdisciplinaria

La palabra Transdisciplinaria fue descrita por primera vez por Jean Piaget en 1970, durante su participación en el taller internacional denominado “Interdisciplinaria-Problemas de la Enseñanza e Investigación en las Universidades”, como:

Finalmente, esperamos ver que la etapa de las relaciones interdisciplinarias pase a un nivel superior que debiera ser la “transdisciplinaria”, el cual no se limitará a reconocer las

interacciones y reciprocidades entre las investigaciones especializadas, sino que buscará ubicar esos vínculos dentro de un sistema total, sin fronteras estables entre las disciplinas. (Nicolescu, 2006, p. 1)

En esta primera descripción del concepto se destaca el significado “a través” y “entre” del prefijo Latin “trans”; la inclusión del significado de “más allá de las disciplinas” fue introducido por Nicolescu en 1985 (Nicolescu, 2006).

Nicolescu (1996), en su Manifiesto, propone una nueva visión del mundo: la transdisciplinariedad, cuyos pilares son los niveles de la Realidad, la lógica del tercero incluido y la complejidad, y determinan la metodología de la investigación transdisciplinaria.

Edgar Morin (2019), define a la pluridisciplina (o multidisciplinaria) como aquella organización de conocimientos que no altera los campos y objetos de estudios disciplinarios; la interdisciplina que toma en consideración los métodos que han sido utilizados con éxito en una disciplina y se aplican a otra con el objetivo de ampliar los descubrimientos o la fundamentación de estos; mientras que la transdisciplina es una forma de organización del conocimiento que trasciende las disciplinas haciendo énfasis en aquello que está entre las disciplinas, en aquello que las atraviesa y en lo que está más allá de ellas.

La carta de transdisciplinariedad, publicada durante el Primer Congreso Mundial de Transdisciplinariedad en Portugal, establece un conjunto de principios fundamentales que constituyen un contrato moral para la comunidad de los principios de esta estructura del conocimiento (Participantes del Primer Congreso Mundial de Transdisciplinariedad, 1994).

La investigación transdisciplinaria es el tipo de investigación que toma en cuenta no solo los distintos conocimientos teóricos, inherentes al pensamiento científico, sino que considera de igual forma percepciones, experiencias y conocimientos diversos, inherentes a lo que se conoce como partes interesadas (Ramírez-González, 2016). El mismo autor, identifica como partes interesadas, además de personal académico, la participación de distintos actores como instituciones, usuarios, gestores, etc., que contribuyen a la legitimación del conocimiento.

Problemáticas de las ciencias ambientales y de manera más específica, el estudio de los servicios ecosistémicos y la agroecología es sugerido por Ramírez-González y colaboradores (2016) sean

investigados desde una perspectiva inter y transdisciplinaria, esto con respecto a las propiedades del objeto de análisis.

- J) Enfoque transdisciplinario (Hirsch et al., 2006), sistemáticamente diseñado de un orden superior a otro inferior, basado en:
 - o Teoría General de Sistemas, que sugiere un enfoque metodológico que busca abarcar diversos elementos de un sistema, junto con sus interacciones, con la intención de conseguir una síntesis integral de dicho sistema.
 - o Teoría de la organización, que toma en consideración a diferentes grupos de personas, interrelacionadas de forma estructuradas, que persiguen un propósito particular.

IV. ANTECEDENTES

IV.1 Estudios relevantes en el Parque Nacional La Malinche

Algunos trabajos importantes para el desarrollo del presente estudio son los siguientes:

- J) Valera y colaboradores (2020), presentaron una propuesta de recuperación de la Milpa Nahua, en comunidades indígenas de la cuenca alta del río Atoyac, como estrategia para la recarga del acuífero a partir de la conservación de suelos y el restablecimiento del sistema agroecológico “Metepantle”. En esta propuesta se consideró el establecimiento de sectores de referencia de este sistema agroecológico con fines demostrativos para su enriquecimiento y asimilación por parte de los productores agrícolas; impartir cursos-talleres con campesinos indígenas Nahuas de Puebla y Tlaxcala para el intercambio de conocimientos del sistema; realizar un diagnóstico socio-territorial participativo con los campesinos indígenas para desarrollar una cartografía proyectiva de cómo les gustaría que fuera el territorio; y, elaborar un manual bilingüe sobre el sistema agrícola nahua “Metepantle” (Valera et al., 2020).
- J) INEGI (2014), en el Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, en el que se concentró información respecto al tipo, forma y grados de erosión que se encuentran en el país, así como con algunas de las características físicas del suelo y de las condiciones ambientales,

se identificó que en el Parque Nacional La Malinche se observan diferentes grados de erosión, encontrándose en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, ubicado en el Parque Nacional La Malinche, un grado de erosión moderada.

- J) Coyotl (2015), en su tesis de licenciatura cuyo objetivo fue determinar la calidad de suelos en el paraje Huey Tecoch, ubicado en el Parque Nacional La Malinche, para establecer su importancia en la prestación de servicios ecosistémicos, identificó que existen diferencias significativas en la calidad de suelo presente en áreas conservadas y áreas de uso agrícola. Estos resultados fueron obtenidos a través de la comparación de dos usos de suelo (forestal y agrícola) y tres tipos de cobertura (bosque natural, plantación forestal y agricultura de temporal), a través del análisis de características físicas y químicas de 25 muestras de suelo que determinan la calidad de este.

Por otro lado, se citan algunos trabajos, que a reserva de que no fueron desarrollados en la zona de estudio, aportan información importante al tema de investigación:

- Batjes (1996), en su artículo de investigación evaluó la discrepancia de dos estimaciones de C en el mundo, utilizando la base de datos georreferenciada para el proyecto del Inventario Mundial de Potenciales de Emisión del Suelo (WISE). Esta base de datos contiene información de 4353 perfiles de suelo distribuidos en el mapa de suelos del mundo de la FAO-UNESCO.

Los reservorios de carbono globales encontrados en los primeros 30 cm, sin considerar el carbono de la hojarasca y carbón vegetal, varían en rangos de 684 a 724 Pg; mientras que para andosoles vítricos se encontraron reservas de carbono orgánico de 8.2 kg/m².

- Tenorio (2008), en su tesis doctoral cuyo objetivo fue evaluar las propiedades fisicoquímicas de suelos de la Reserva de Tetelilla, en Teziutlán Puebla, para determinar su relación con el medio ambiente y la calidad de este, encontró que existe una relación de las propiedades fisicoquímicas y la calidad de los suelos lo que permitió hablar de calidad dinámica y calidad inherente del recurso en la zona de estudio.

Este estudio se llevó a cabo mediante el uso de indicadores de calidad de suelo, analizándose 15 perfiles de suelo bajo cubierta forestal, identificados como de calidad

inherente, y 13 perfiles de suelo agrícola identificados como de calidad inherente. Los resultados obtenidos se analizaron a través de pruebas estadísticas multivariadas para lo cual las variables se clasificaron en tres problemas de calidad: materia orgánica y residuos, ph, y fertilidad.

- Martínez–Herrera y colaboradores (2018), en su artículo de investigación compararon suelos que soportan vegetación de plantaciones de café, identificados como de calidad dinámica, y suelos con vegetación forestal, identificados como de calidad inherente en la zona de Atoyac de Álvarez Guerrero. Como resultados encontraron que el principal cambio que se identificó entre sistemas con suelos de calidad inherente y calidad dinámica fue la pérdida de horizontes superficiales, así como la posibilidad de establecer diferencias entre suelos que presentan calidad dinámica y calidad inherente.

IV.2 Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlacuéyatl

En México, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son clasificadas por la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en diferentes categorías, ello en función del uso y aprovechamiento sustentable de sus recursos. En los Parques Nacionales las actividades que están permitidas son la preservación de los ecosistemas y sus elementos, la investigación, turismo y educación, todos ellos con un enfoque ecológico (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Al Ambiente (LGEEPA), 2021).

El Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlacuéyatl fue decretado como Parque Nacional el 6 de octubre de 1938, y considera a doce municipios del Estado de Tlaxcala y cuatro municipios del Estado de Puebla, ocupando una superficie total de 46,112.24 ha. Esta montaña, forma parte del “Eje Neovolcánico Transversal”, destacándose por su gran diversidad de especies y por la cantidad de endemismos identificados en la zona, sobresaliendo en aspectos relacionados con mamíferos, ya que debido al crecimiento poblacional y al corte de corredores biológicos muchas especies quedaron restringidas a las montañas centrales, sujetas a procesos de aislamiento y diferenciación a través del tiempo (Decreto que declara Parque Nacional la montaña Malinche o Matlacuéyatl, 1938).

El ordenamiento ecológico y zonificación, instituido en el Programa de manejo del área natural protegida, es un instrumento que establece diferentes políticas de manejo para cada una de las zonas en función del nivel de conservación de los ecosistemas, la vocación, y el uso actual y potencial del suelo, así como la tenencia de la tierra y las diferentes actividades turísticas y de uso tradicional. La zona de estudio se localiza en la Subzona de Uso Tradicional Tlaxcala–Puebla en la que desde tiempos ancestrales se han realizado actividades agrícolas de autoconsumo consistente en la siembra de maíz, frijol, haba, entre otros, lo que ha permitido la conservación genética de las semillas de la zona (CONANP, 2013).

Algunas de las actividades permitidas y no permitidas por el mencionado instrumento legal, en esta subzona, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Algunas de las actividades permitidas y no permitidas en la Subzona de Uso Tradicional Tlaxcala–Puebla del Parque Nacional la Montaña Malinche o Matlacuéyatl.

Actividades permitidas	Actividades no permitidas
J Actividades culturales tradicionales	
J Agricultura y ganadería tradicional	
J Aprovechamiento de recursos naturales con fines de autoconsumo o uso doméstico	J Aprovechamiento forestal, salvo para colecta científica y uso doméstico
J Investigación científica y monitoreo del ambiente	J Cortar y marcar árboles, salvo en el caso de uso doméstico
J Turismo de bajo impacto ambiental	J Venta de alimentos y artesanías

Fuente: Elaboración propia con información de CONANP (2013).

V. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

V.1 Aspectos físicos

V.1.1 Clima

En el Parque Nacional La Malinche se presentan diversas unidades climáticas, ello de acuerdo con la clasificación realizada por Enriqueta García (1989), y establecidas en el programa de manejo, emitido por la CONANP. Estas unidades climáticas son: C(w₁) (w) clima templado subhúmedo con lluvias en verano, C (e) (w₂) (w) clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano y E (T) H clima frío (CONANP, 2013).

De acuerdo con la ubicación de la zona de estudio, respecto a su posición en la cara sur de la montaña y la altitud a la que se encuentra (2,854 m s. n. m.), el tipo de clima que predomina en la zona es C(w₁) (w) clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Sin embargo, se ubica muy cerca del límite con el clima C (e) (w₂) (w) clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano, por lo cual, se considera que la zona de estudio pudiera estar influenciada por ambos tipos de clima. **C(w₁) (w)**: El clima templado subhúmedo con lluvias en verano se caracteriza por tener una temperatura media anual que va de los 11 a los 17°C; la temperatura del mes más fría oscila entre los 3 y 18°C, el porcentaje de precipitación invernal con respecto a la anual es de menos de cinco y se presenta en la zona meridional de la región, donde la temperatura media anual oscila de los 10 a 16°C; siendo los meses más lluviosos de mayo a octubre, los más calurosos de marzo a julio y, una precipitación anual media alrededor de los 700 mm; con vientos dominantes del noroeste y noreste en las estaciones de primavera y verano, y del sureste en las de otoño a invierno (CONANP, 2013).

C (e) (w₂) (w): Este tipo de clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano se caracteriza por tener temperaturas promedio anuales en rangos de 6 a 8°C, con una temperatura de -3 y 18°C para el mes más frío; el porcentaje de precipitación invernal con respecto a la anual es menor de cinco, con una precipitación promedio anual entre 800 y 1000 mm; y en estas zonas las heladas se presentan de fuertes a moderadas de 100 a 120 días, principalmente en invierno, ello de acuerdo con lo reportado en el Programa de manejo del ANP de La Malinche emitido por CONANP (2013)

V.1.2 Fisiografía

México es uno de los países del mundo con mayor diversidad topográfica y de recursos naturales, ello debido a la gran complejidad de formas que presenta el relieve. Estas características influyen igualmente en la gran diversidad de climas, vegetación y suelos, que inciden directamente en las actividades socioeconómicas de las distintas regiones. En función de lo anterior, México está integrado por 15 regiones fisiográficas, dentro de las cuales se encuentra el eje Neovolcánico, con una superficie de 158 522.41 km². En esta provincia y específicamente en la subprovincia de lagos y volcanes de Anáhuac es donde se ubican los Estados de Puebla y Tlaxcala, y por tanto, el

Parque Nacional la Malinche y el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall” (CONANP, 2013; INEGI, 2003).

V.1.3 Orografía

La montaña Malinche se caracteriza por contar con pendientes poco pronunciadas en las zonas bajas del volcán, mientras que a alturas superiores a los 3 mil 300 metros sobre el nivel del mar son muy pronunciadas hasta los 4 mil 461 metros de altitud; en su zona oriente cuenta con una barranca denominada Gran Barranca; y en la zona este de la cima con un cráter denominado Octlayo, así como con huellas de actividad glaciaria y rotura de roca por hielo (CONANP, 2013).

V.1.4 Geología

Los volcanes del Eje Neovolcánico Transversal se formaron hace aproximadamente 35 millones de años, durante el periodo Terciario, y la Malinche es considerada una de las primeras montañas que conforman este Eje Neovolcánico (CONANP, 2013).

La historia eruptiva del volcán la Malinche ha sido dividida para su estudio en dos etapas: 1) etapa pre-Malinche y 2) etapa Malinche, la cual a su vez ha sido dividida en tres periodos, de acuerdo con los depósitos de caída de pómez de mayor dispersión y espesor, originados por erupciones de tipo pliniano, donde cada periodo inicia con un depósito de caída (Castro & Siebe, 2009).

En la Imagen 6, el mapa geológico identifica los depósitos del volcán la Malinche, en función de la etapa eruptiva y periodo. La zona de estudio se ubica cerca de los puntos de muestreo cercanos a Canoa descritos por Castro (2007), ubicándose en el periodo 1 (23.5, 45.7 ka¹) de la etapa Malinche, correspondiente a la época del Pleistoceno del periodo Cuaternario.

En la ladera sur del volcán Castro se reportan depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas con soportes de matriz principalmente, y en algunos puntos por clastos, los cuales están compuestos de dacita/andesita con cristales de plagioclasa, biotita y hornblenda visibles a simple

¹ Abreviatura en latín cuyo significado es miles de años (45 ka es lo mismo que 45,000 años (Castro & Siebe, 2009).

vista, cuyo tamaño varía desde más de un metro hasta el lapilli², con presencia de huellas de desgasificación (Castro & Siebe, 2009).

Castro y Siebe (2009), identificaron en la zona de la localidad de Canoa un punto de muestreo (389), cuya descripción de la sección estratigráfica se ajusta a la zona de estudio, correspondiente a depósitos de material consistente en suelo, desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 40 cm, caída de cenizas gruesas, a una profundidad de 40 a 110 cm, y de Lahar a una profundidad aproximada de 110 a 200 cm, a una mayor profundidad se identificaron flujos de bloques y cenizas datadas en $45,700 \pm 2800$ / -200 miles de años (Imagen 5).

² “Fragmento de roca cuyo tamaño (diámetro) se encuentra entre 0.2 y 6.4 cm” (Castro & Siebe, 2009, p. 86).

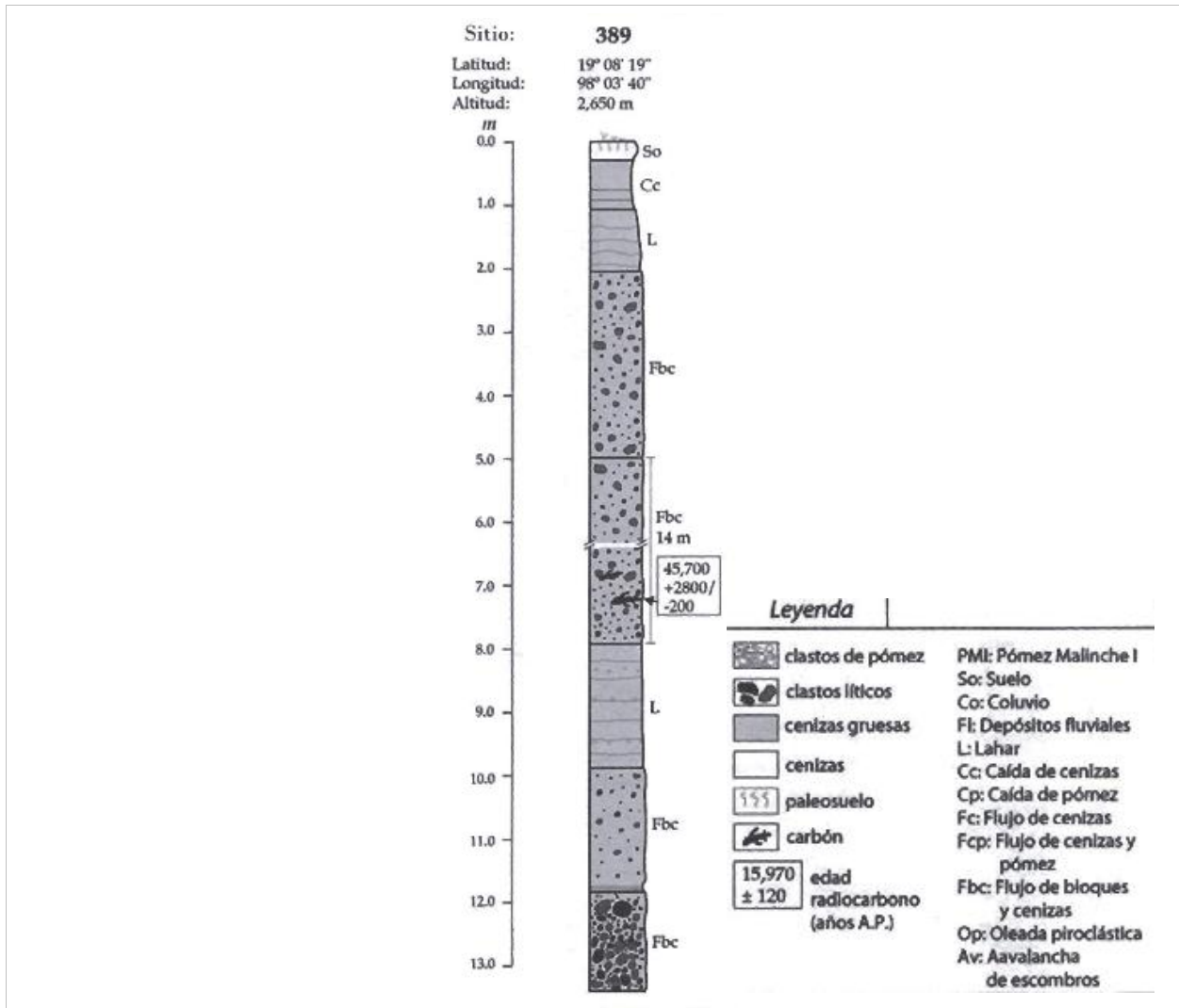


Imagen 5. Sección estratigráfica del punto 389 cercano a la localidad de Canoa en el Parque Nacional La Malinche.

Fuente: Castro & Siebe (2009).

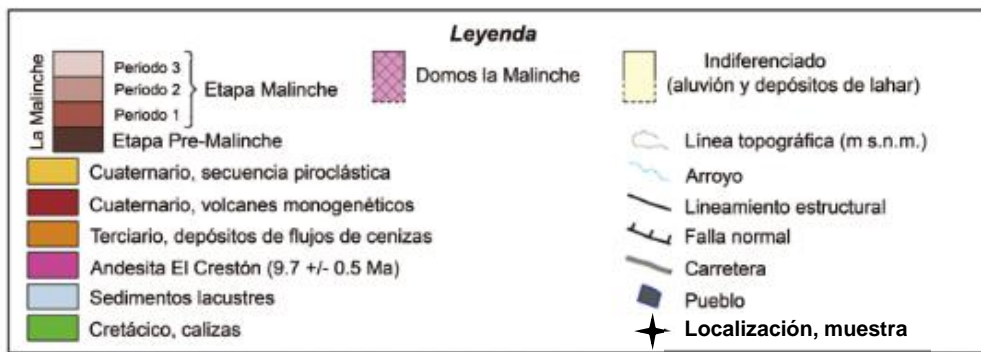
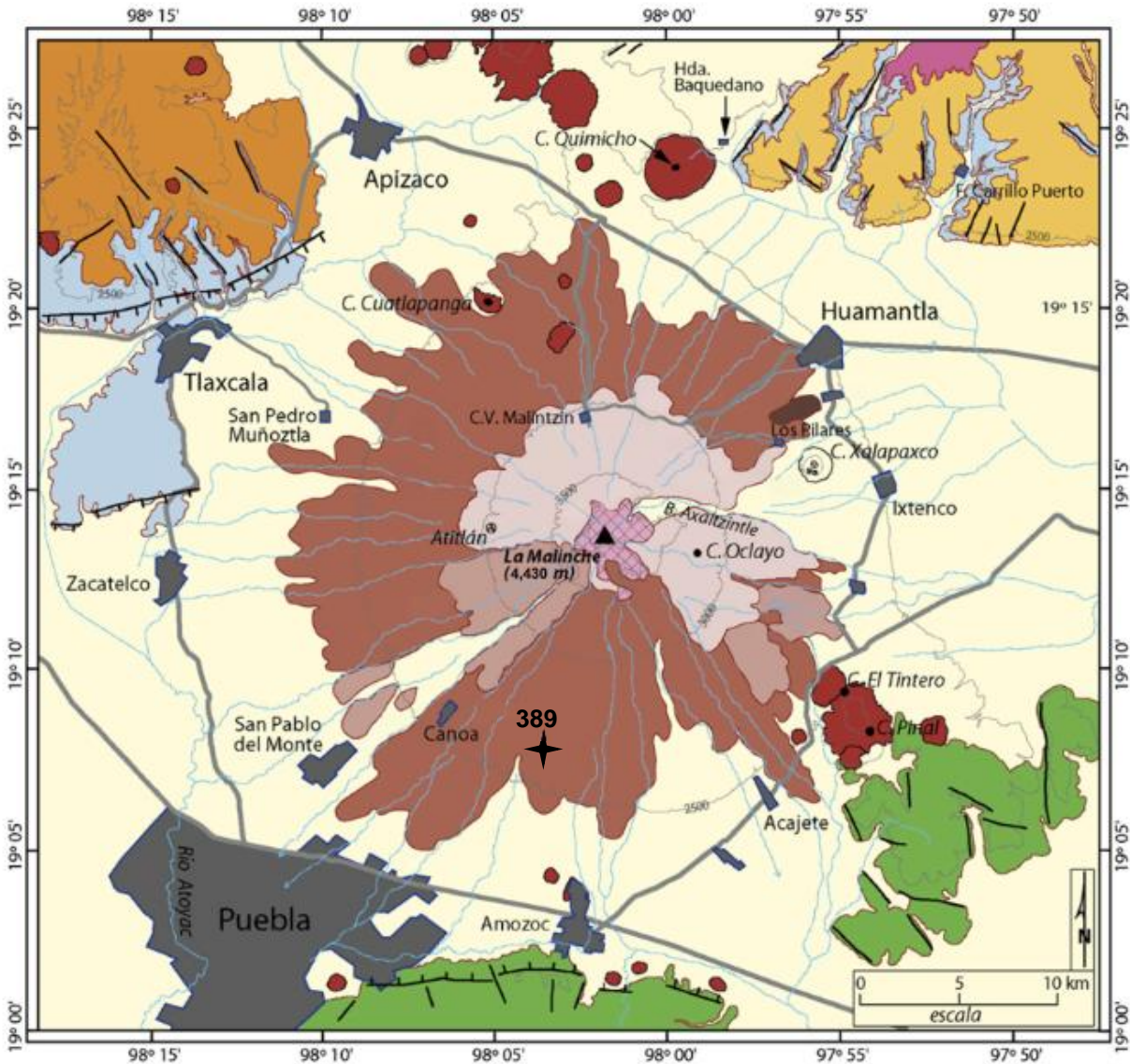


Imagen 6. Mapa geológico de La Malinche.

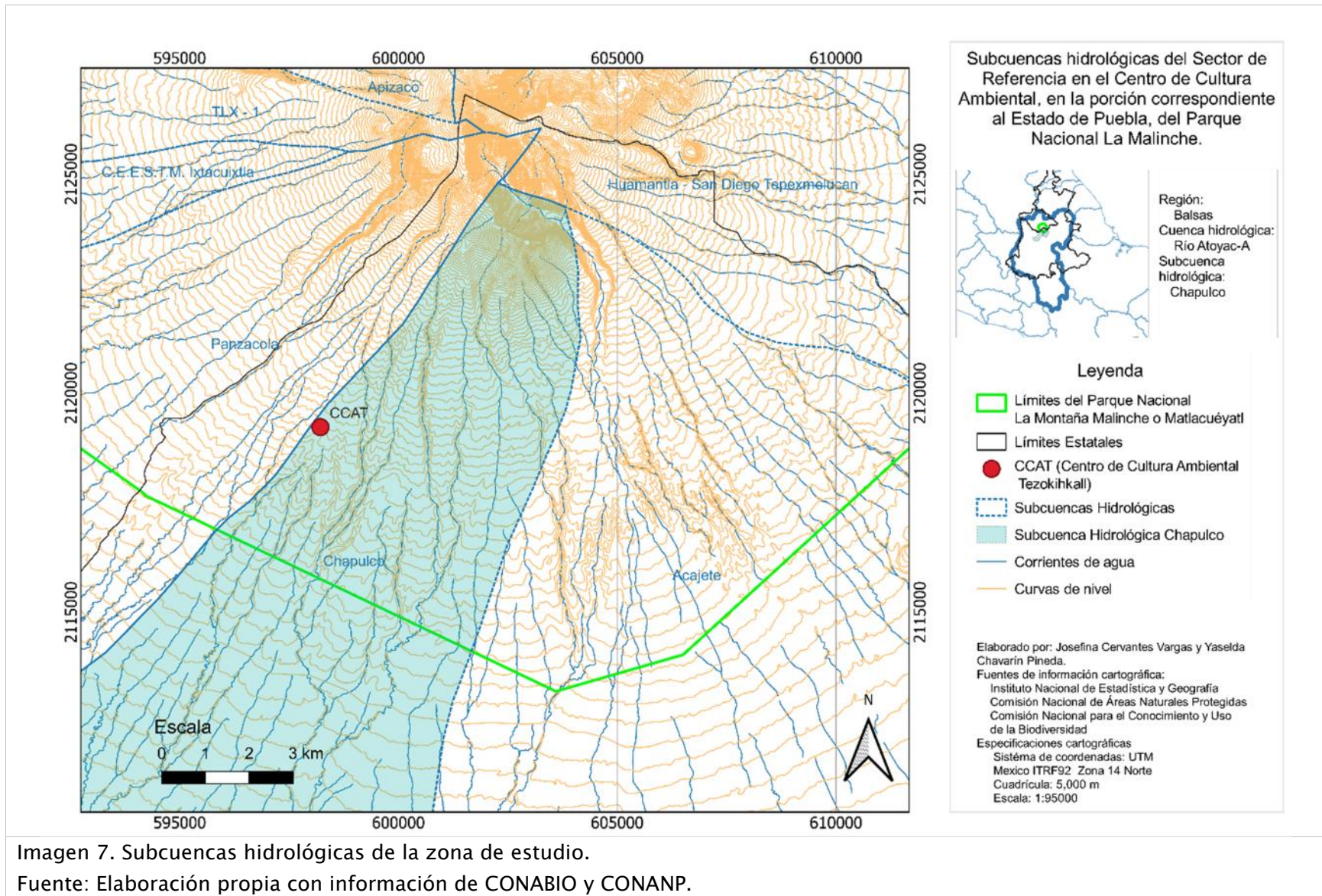
Fuente: Historia eruptiva del volcán la Malinche de Castro y Siebe (2009).

V.1.5 Hidrografía

La zona de estudio se ubica en la región hidrológica del Río Balsas, específicamente en la cuenca hidrológica del Río Atoyac-A y la subcuenca de Chapulco (Imagen 7).

De acuerdo con el Programa de manejo del ANP emitido por la CONANP (2013) las características del suelo y subsuelo, así como las fuertes pendientes de la región, limitan la infiltración del agua proveniente de la precipitación; por tanto, únicamente se cuenta con corrientes intermitentes en la zona y no se presentan muchos manantiales, siendo la laguna de Acuitlapilco el único recurso lacustre de la región en la ladera occidental del Parque Nacional. Referente al agua subterránea, el material consolidado de los suelos con baja permeabilidad a alturas superiores a los 3 mil metros y la alta permeabilidad en las partes bajas de esta altura ocasiona que el nivel freático de las aguas subterráneas sea relativamente poco profundo, particularmente en las zonas bajas de la montaña (CONANP, 2013).

Dadas las características de los mantos freáticos de la zona, se distingue la vital importancia que representa la disponibilidad de agua potable para el Estado de Puebla y Tlaxcala; sin embargo, este recurso está siendo amenazado principalmente por las actividades de deforestación que impiden la infiltración del agua a través del suelo y provoca problemas de erosión (CONANP, 2013).



V.1.6 Suelos

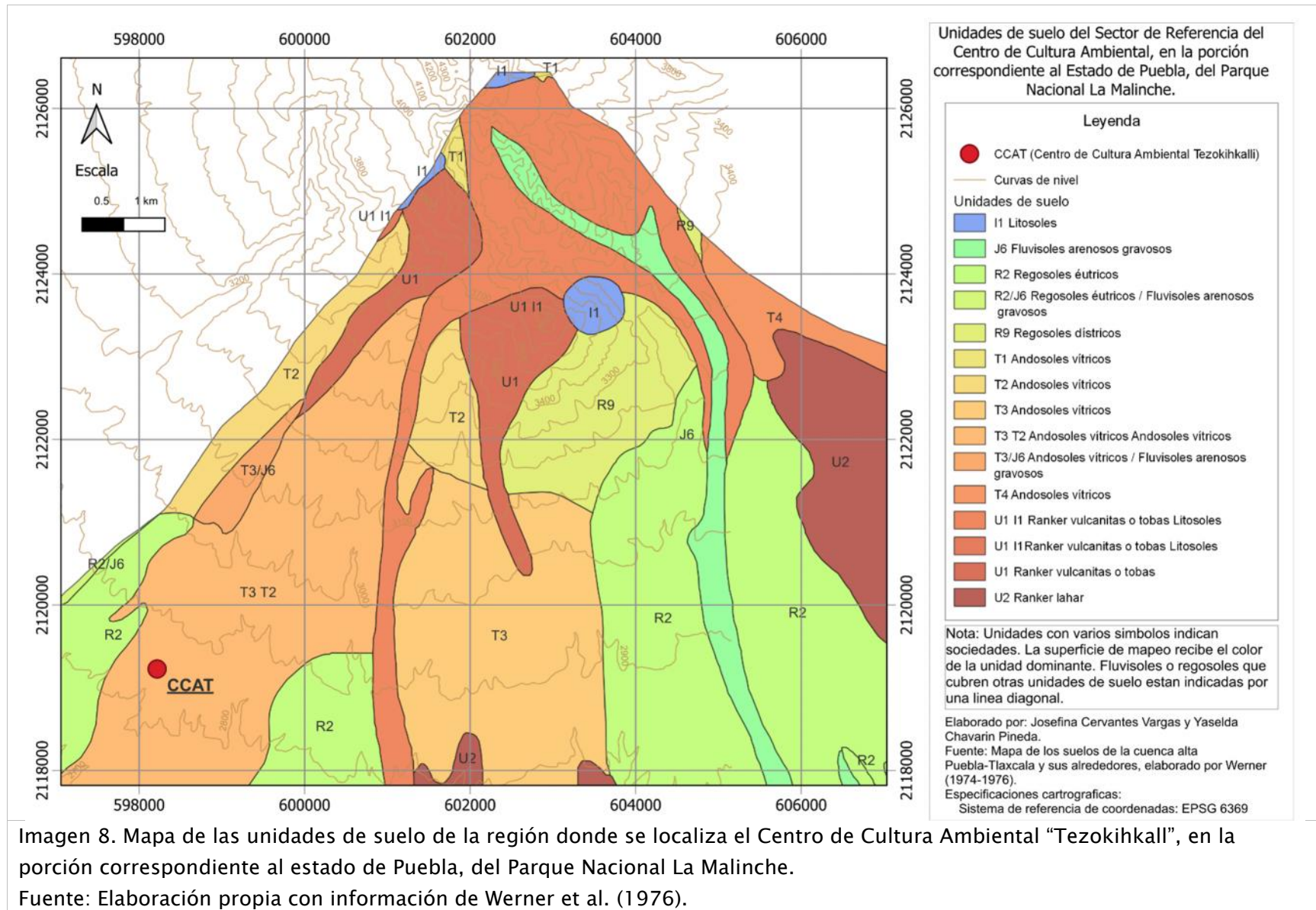
Los suelos de las inmediaciones del volcán la Malinche, se originaron por el aporte de material proveniente de las erupciones de los cráteres satélites del volcán, durante la época del Pleistoceno y Holoceno del periodo Cuaternario (CONANP, 2013).

Las unidades de suelo del parque Nacional La Malinche fueron identificadas y descritas en el ordenamiento desarrollado por Gerd Wegner (1974–1976) llamado “Mapa de los suelos de la cuenca alta Puebla–Tlaxcala y sus alrededores”, el cual fue elaborado de acuerdo con las recomendaciones de la FAO (1968–1970) y con apoyo del Proyecto México de la Fundación Alemana para la Investigación Científica (Werner et al., 1976).

En la Imagen 8 se presenta el mapa de las unidades de suelo de la zona de estudio, de acuerdo con el ordenamiento desarrollado por Werner (1976), donde puede observarse que, los suelos de la zona de estudio corresponden a sociedades de suelo de Andosoles vítricos (T3 T2).

Werner (1976), por un lado, describe a los andosoles como suelos de sedimentos piroclásticos, por lo general bien desarrollados, de profundidad media a profunda, muy sueltos. Por otro lado, describe a los andosoles vítricos, correspondientes a la zona de estudio (T3 T2), de la siguiente manera:

- T3 Andosoles Vítricos: Arenas andesíticas–dazíticas de los cráteres de Oclaya, Tlaloqua y otros cráteres satélites menores de la Malinche en zonas erosionadas de las partes bajas de laderas cálidas y secas entre 2600 y 3200 m; migajón arenoso a arena (Werner et al., 1976).
- T2 Andosoles Vítricos: Arenas andesíticas–dazíticas de los cráteres de Oclaya, Tlaloqua y de cráteres satélites menores de la Malinche en zonas medias de laderas frías y húmedas entre 2800 y 3900 m; migajón arenoso, levemente pedregoso (Werner et al., 1976).



V.2 Aspectos biológicos

La situación geográfica de México al ser considerado un puente y zona de influencia mixta entre los elementos florísticos neotropical y holártico; así como las intensas migraciones de plantas de procedencia diversa, son algunos de los factores que en conjunto contribuyeron a la gran riqueza florística del país (Rzedowski, 2006a).

El Parque Nacional se encuentra ubicado dentro del reino neolártico, en la región xerófita mexicana de la provincia de la altiplanicie, que considera algunas partes de Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León, Querétaro, Hidalgo San Luis Potosí, Tlaxcala y Puebla (Rzedowski, 2006b).

Al ubicarse en una zona de transición, la diversidad biológica de la zona comprende una gran variedad de especies (CONANP, 2013). Fernández y López-Domínguez (2005) reportan 919 especies, divididas en los siguientes grupos taxonómicos: 129 Myxomycetes, 217 Hongos Macroscópicos, 404 Plantas, 5 Anfibios, 14 Reptiles, 112 Aves y 38 Mamíferos. Todas estas especies biológicas son de gran importancia para la zona, de ahí la necesidad de su protección, ya que algunas de ellas se encuentran clasificadas por la legislación mexicana con algún grado de riesgo, otras son especies endémicas del Eje Neovolcánico Transversal y otras son especies registradas únicamente en el Parque Nacional La Malinche (CONANP, 2013).

V.2.1 Vegetación y flora

Fernández y López Domínguez (2005), reportaron que la vegetación que se presenta en la montaña Malinche varía en función de factores como la tolerancia de las diversas especies a condiciones de temperatura, viento, suelo, fisiografía, etc., dando como resultado la presencia de:

- Bosque de pino.
- Bosque de encino.
- Bosque de oyamel.
- Asociaciones de bosque: pino-encino, encino-aile, pino-encino-oyamel y pino-encino-aile, en rangos de altura entre los 2,800 y 3,600 m s. n. m.
- Pastizal natural, chaparral y páramo de altura.

- Agricultura de temporal y de riego.

En el mapa de tipos de vegetación en el Parque Nacional La Malinche (Imagen 9), se puede observar la distribución que presenta los diferentes tipos de vegetación de la región, identificándose en la zona de estudio vegetación de tipo pastizal inducido; sin embargo, en campo se observa que la vegetación de la zona corresponde a vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino y vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (CONAFOR, 2021).

Bosque de pino: La vegetación de este bosque, de acuerdo con estudios realizados por Fernández y López-Domínguez (2005), se caracteriza principalmente por la presencia del género *Pinus* (*Pinaceae*), en altitudes que van de los 2,500 hasta los 4,200 m s. n. m., y suelos de tipo andosol caracterizados por ser bien desarrollados, con profundidad media a profundos, muy sueltos, y por tanto, fácilmente erosionables. Con respecto a la altitud de la zona de estudio (2,500 a 3,100 m s. n. m), se pueden presentar pinares de *Pinus montezumae* formando una franja en este rango altitudinal; un estrato herbáceo de pinares compuesto básicamente de gramíneas, siendo algunas de las principales *Stipa ichu*, *Festuca tolucensis* y *Muhlenbergia macroura*; y un estrato arbustivo compuesto de pinos inmaduros de la misma especie del estrato arbóreo (Fernández & López-Domínguez, 2005).

Bosque de encino: Los encinares comparten afinidades ecológicas con los pinares, por lo que es común encontrar bosques mixtos de ambos elementos, siendo algunas de ellas el hecho de que se desarrollan en suelos de tipo andosol, quienes se forman a partir de cenizas volcánicas, presentan colores café grisáceo, son sueltos, y por tanto muy susceptibles a la erosión (Fernández & López-Domínguez, 2005).

En función de la altitud, los encinares presentan las siguientes características:

-)] De 2,200 m s. n. m. a 2,800 m s. n. m.: la presencia de los encinares no es continua dominando algunas zonas los pinares en función de las condiciones micro climáticas, edáficas y la intervención del hombre.

- J Menor a 2,500 m s. n. m.: se destaca la presencia de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*, los cuales en su mayoría se encuentran fuertemente perturbados y desplazados hacia las barrancas.
- J A 2,500 m s. n. m.: se presenta el bosque de *Quercus rugosa* y *Q. laurina*, en la mayoría de los casos perturbado debido a su uso para elaborar carbón.

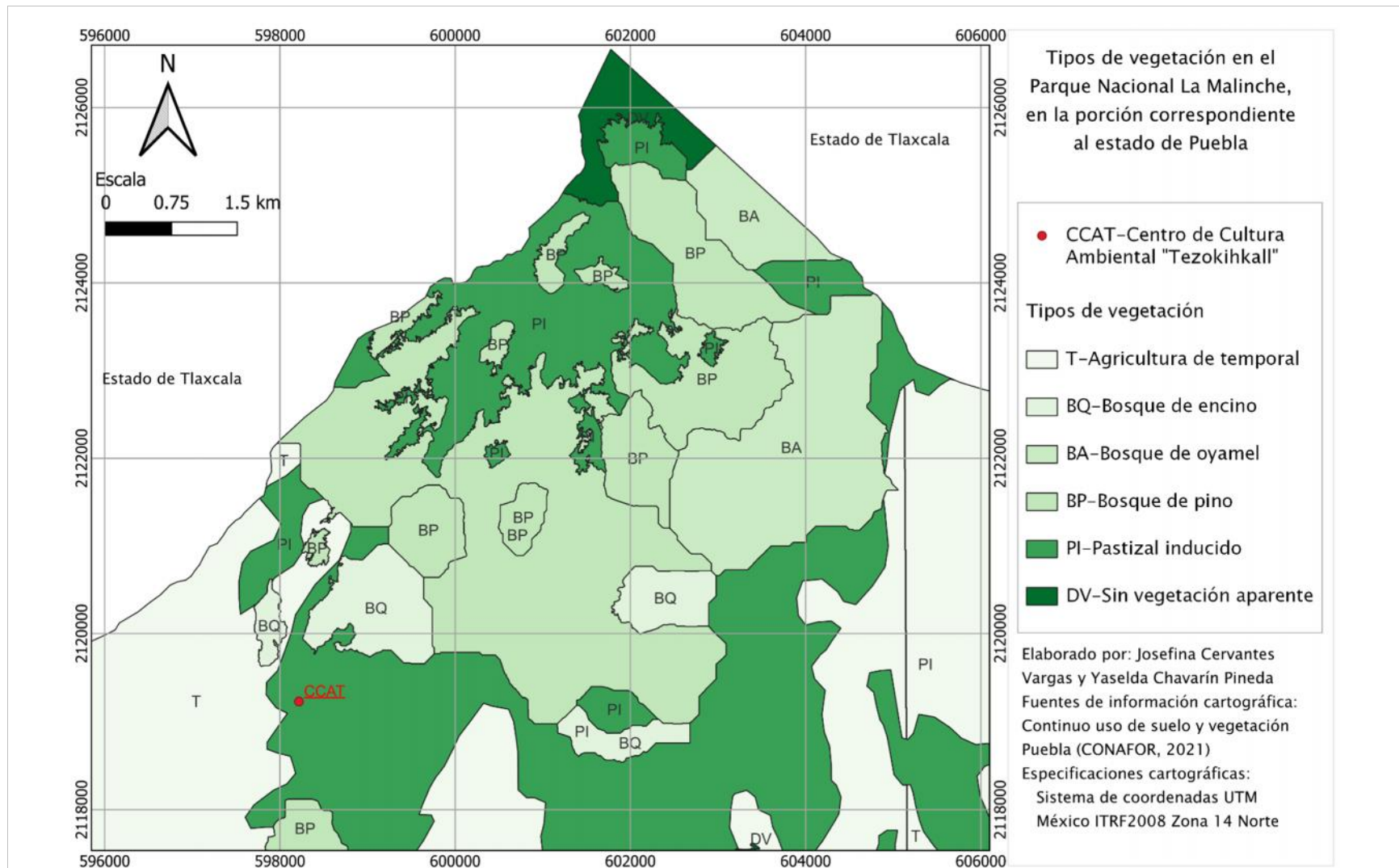


Imagen 9. Tipos de vegetación en el Parque Nacional La Malinche, en la porción correspondiente al estado de Puebla donde se localiza el Centro de Cultura Ambiental "Tezokihkall".

Fuente: Elaboración propia con información de CONAFOR (2021).

V.2.2 Fauna

La fauna de la zona se localiza en la región de las Provincias Bióticas Neotropical y el Eje Neovolcánico, dando como resultado una gran biodiversidad (CONANP, 2013).

En algunos estudios se han reportado en Parque Nacional La Malinche 131 vertebrados terrestres (aves, anfibios, reptiles y mamíferos), de las cuales 11 especies son endémicas de la zona, lo cual corresponde a poco más de un 8%, lo cual es menor a lo reportado para el país, siendo este del 30% (Montero, 2012). De manera más específica, el porcentaje reportado de mamíferos para la zona (18%) es menor a lo reportado (50%) en el Eje Neovolcánico Transversal, lo cual indica que las especies de mayor tamaño están desapareciendo, siendo una de las causas el aislamiento geográfico de la montaña, que, impide la creación de corredores biológicos con otras zonas montañosas (Montero, 2012).

Mamíferos

Algunos de los mamíferos reportados en el Parque Nacional y que han sido avistados por pobladores de la zona de estudio corresponden al coyote (*Canis latrans*), el gato montés (*Lynx rufus*), las ardillas del género *Spermophilus*, la tuza (*Thomomys umbrinus*), tlacuaches (*Didelphis virginiana*), el armadillo (*Dasyus novemcinctus*), y una especie de conejo (*Sylvilagus cunicularius*), entre otros (Montero, 2012).

Aves

Han sido reportadas 111 especies de aves en el Parque nacional La Malinche, de las cuales 78 son residentes, 23 migratorias y 10 no cuentan con datos; de estas 6 son endémicas de la zona y 4 se encuentran en algún nivel de protección por la legislación mexicana (Fernández & López-Domínguez, 2005). Algunas de las aves registradas y que han sido avistadas en la zona de estudio son el aguililla de cola roja (*Buteo jamaicensis*), el tecolote (*Bubo virginianus*) y el gavián de cooper (*Accipiter cooperii*) (Coyotl, 2015).

Anfibios y reptiles

A reserva de la importancia que tienen para los ecosistemas los anfibios y reptiles, ya que algunos actúan como controladores de plagas, de las 21 especies reportadas más de la mitad (57.1%) se

encuentran en alguna categoría de conservación, de acuerdo con la legislación mexicana (Fernández & López-Dominguez, 2005).

Algunos de los reptiles reportados en el Parque Nacional y avistados por los pobladores de la zona son la serpiente de cascabel enana (*Crotalus ravus*), la serpiente de cascabel (*Crotalus triseriatus*), y el camaleón (*Phrynosoma orbiculare*) (Coyotl, 2015).

V.3 Aspecto demográfico, económico y social

V.3.1 Demografía

El Parque Nacional La Malinche está integrado por 58 localidades, pertenecientes a 16 municipios, 12 de ellos pertenecientes al estado de Tlaxcala y 4 al estado de Puebla (CONANP, 2013). Los municipios mencionados pueden observarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Municipios pertenecientes al Parque Nacional La Malinche.

Estado	Municipio
Tlaxcala	Acuamanala de Miguel Hidalgo
	Chiautempan
	Contla de Juan Cuamatzi
	Huamantla
	Ixtenco
	Mazatecochco de José Ma. Morelos
	San Francisco Tetlanohcan
	San José Teacalco
	San Pablo del Monte
	Santa Cruz Tlaxcala
	Teolocholco
	Zitlaltepec de Trinidad Sánchez S.
Puebla	Acajete
	Amozoc de Mota
	Puebla
	Tepatlaxco de Hidalgo

Fuente: Elaboración propia con información de CONANP (2013).

Es importante mencionar que la zona de estudio políticamente se localiza en un área correspondiente a la junta auxiliar de la Resurrección; sin embargo, los campesinos del paraje Huey Tecoch y de los predios aledaños provienen de la junta auxiliar de San Miguel Canoa, ambas juntas auxiliares pertenecientes al Municipio de Puebla.

La población del municipio de Puebla en 2020, de acuerdo con información de INEGI (2021), corresponde a 1,692,181 habitantes, de los cuales 15,070 pertenecen a la localidad de San Miguel Canoa, donde 7,672 son de sexo femenino y 7,398 de sexo masculino. En esta localidad el grado promedio de escolaridad es de 6.86, donde 6.18 es para la población femenina y 7.58 para la población masculina; la población de 12 años y más económicamente activa, es de 7,339 personas de los cuales 2708 son del sexo femenino y 4,631 del sexo masculino; en servicios de salud 5,413 personas no cuentan con afiliación a servicios de salud, mientras que 9,650 si cuentan con ese servicio en instituciones como IMSS, ISSTE, PEMEX, Instituto de Salud para el Bienestar, entre otros; y finalmente en la localidad, aún se cuenta con viviendas particulares habitadas con piso de tierra, siendo estas 181, mientras que con material diferente a piso de tierra son 3,387 (INEGI, 2021).

V.3.2 Actividad económica

El Programa de manejo de CONANP (2013), reporta que las actividades económicas del Parque Nacional son básicamente del sector secundario y terciario, debido a que las actividades agrícolas del sector primario han ido en decremento como consecuencia del bajo rendimiento y por tanto bajos ingresos, ocasionando por un lado el abandono de las parcelas o que el cultivo de tierras agrícolas sea únicamente una actividad complementaria en apoyo a la economía familiar, y por otro, el aprovechamiento de los recursos naturales de la región con fines de autoconsumo y uso doméstico. Con respecto a la ganadería de la zona esta se realiza de manera extensiva, principalmente por ganado caprino, vacuno y equino; sin embargo, las consecuencias del pastoreo de este ganado en zonas forestales han ocasionado daños a la superficie del suelo en diversas comunidades del Parque Nacional, siendo algunas de las más importantes Altamira, Pilares (municipio de Huamantla e Ixtenco), ejido de Tepatlaxco (municipio de Tepatlaxco de Hidalgo), San Miguel Canoa (municipio de Puebla) y la comunidad de San Juan Tepulco (municipio de Acajete) (CONANP, 2013).

V.3.3 Sociedad

El Programa de manejo del parque nacional refiere que los grupos étnicos que habitan el Parque Nacional son principalmente otomíes en la zona este de la montaña, correspondiente al municipio

de Ixtenco; mientras que en la zona oeste se ubican las comunidades nahuas, quienes habitan en las localidades de San Isidro Buen Suceso (del Municipio de San Pablo del Monte Tlaxcala), San Francisco Tetlanohcan, San Miguel Canoa y San Juan Tepulco (del municipio de Puebla), así como en comunidades del municipio de Acajete (CONANP, 2013).

La CONANP (2013) refiere que el uso tradicional de la flora y fauna de la región por parte de las comunidades originarias ha sido de gran importancia, en primer lugar como alimento de la población; y en segunda instancia el uso de ciertas plantas medicinales y animales, a los que les atribuyen características curativas, como por ejemplo al zorrillo (*Conepatus mesoleucus*) y la víbora cascabel (*Crotalus sp.*), en el tratamiento de enfermedades de circulación arterial, diabetes y prevención de cáncer. En relación al uso de los recursos maderables por parte de las comunidades indígenas de la zona, estos son destinados para la construcción principalmente de viviendas (vigas, polines, tablas, etc.) y como combustible (leña y carbón) para sus actividades domésticas, siendo algunos de los árboles maderables más representativos en su uso el *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus leiophylla*, *Pinus teocote*, *Pinus patula*, *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, *Quercus candicans*, *Q. crassifolia*, *Q. crassipes*, *Q. dysophylla*, *Q. laeta*, *Q. laurina*, *Q. mexicana*, *Q. microphylla*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa* (CONANP, 2013).

Desde el punto de vista social, se observa una disminución progresiva de la identidad cultural y las costumbres, así como un descenso del número de hablantes de la lengua indígena en comunidades como San Isidro Buen Suceso, Santa María Acxotla, San Francisco Tetlanohcan, Ixtenco, San Miguel Canoa y San Juan Tepulco (CONANP, 2013).

V.4 Aspecto biocultural

La relación de las comunidades indígenas con el uso de los recursos naturales de la zona, conlleva una relación muy estrecha a lo largo de su historia, ya que desde épocas prehispánicas el desarrollo de la agricultura y el crecimiento de la población hicieron que se fuera modificando el paisaje para lograr una mayor producción alimenticia y para adaptar la superficie del terreno a sus viviendas, siendo una de las principales modificaciones la construcción de terrazas (Toledo & Barrera-Bassols, 2009).

CONANP (2013) menciona, en el Programa de manejo del parque nacional, que desde la época prehispánica en las faldas del volcán la malinche se desarrolló un sistema de terrazas, de forma perpendicular a la pendiente del terreno, en conjunto con una serie de canales y represas permitieron la producción de alimentos sin detrimento del suelo y del agua; sin embargo, no se pudieron evitar pérdidas de suelo por erosión, intensificándose por las siguientes causas: 1) la llegada de los españoles debido a aumento de la presión hacia una mayor producción agrícola, sin considerar las zonas designadas al cultivo de forma perpendicular a la pendiente, el uso intensivo del arado, la introducción del ganado, el desmonte de una densa masa forestal causada por la explotación intensiva de madera y carbón que se inició para las nuevas haciendas y ranchos que se instalaron en la zona; y 2) la construcción de los durmientes de los ferrocarriles, del periodo de gobierno de Porfirio Díaz, ya que se requerían grandes cantidades de madera.

Como respuesta a los problemas de degradación que se presentaban en la montaña Malinche, y dada su importancia referida a los servicios ecosistémicos que esta presta (captación hídrica, regulación del clima, provisión de alimentos, belleza escénica, entre otros) el presidente Lázaro Cárdenas, en 1938, declarara su protección como Parque Nacional (Decreto que declara Parque Nacional la montaña Malinche o Matlacuéyatl, 1938). Sin embargo, y a reserva de su estatus de protección legal, actualmente la montaña presenta diversos problemas desde el punto de vista socioambiental como la disputa de las comunidades por los manantiales de agua y los límites territoriales entre Puebla y Tlaxcala, así como también la extracción y robo de arbolado, incendios forestales, compactación y erosión del suelo (CONANP, 2013).

V.5 Uso de suelo y tenencia de la tierra

De acuerdo con información de CONANP (2013), el Parque Nacional ocupa 46,112.24 ha, de las cuales al estado de Puebla le corresponden 12,624 ha, sin embargo, en este territorio no se cuenta con propiedades de tipo federal, las tierras corresponden a la pequeña propiedad y a tierras ejidales; dificultando la aplicación de programas de conservación y alternativas en la producción, por parte de las autoridades correspondientes, lo que a su vez ocasiona falta de interés por parte de los campesinos en la protección de los recursos naturales de la zona.

En el municipio de Puebla, la pequeña propiedad ocupa 7,281.18 ha (57.68%), mientras que a la zona ejidal le corresponde las restantes 5 342.82 ha (42.32%); estas últimas son las únicas que cuentan con certeza jurídica, ya que las tierras que corresponden a la pequeña propiedad, en la mayoría de los casos, han sido heredadas de generación en generación a través de los usos y costumbres de las comunidades (CONANP, 2013).

De manera particular, la parcela donde se estableció el sector de referencia para el sistema agroecológico “Metepantle” corresponde a una propiedad privada. Los propietarios de esta parcela, y de los terrenos aledaños que forman parte del Paraje Huey Tecoch³, integran el Grupo de Trabajo Tleyolotli⁴, quienes día a día se esfuerzan en trabajar en sus tierras para tener un ingreso económico que les permita vivir, ello a través del respeto a la naturaleza, a su montaña, a sus recursos y a su cultura, a quienes consideran proveedores de vida.

VI. MARCO METODOLÓGICO

VI.1 Tipo de investigación

La investigación puede tipificarse de las siguientes formas:

Diseño de investigación: experimental ya que utiliza el experimento como método o técnica (controlada) en el proceso de investigación (Ñaupas et al., 2014).

Tipo de investigación: mixta, podemos clasificarla dentro de este tipo de investigación ya que en el desarrollo de esta se considera la recolección y análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos, como lo son las prácticas de agricultura tradicional aplicadas por los campesinos de la zona y diversas propiedades del suelo respectivamente, los cuales al ser integrados y discutidos de manera conjunta permiten lograr un mejor entendimiento del fenómeno analizado. Este tipo de investigación considera como sustento

³ Huey Tecoch es el nombre que los propietarios le dan a su predio, el cual es de origen náhuatl y significa “Hoyo Profundo”, como referencia al cráter volcánico inactivo ubicado al interior de su predio (Martínez, 2021).

⁴ Tleyolotli, palabra de origen náhuatl que significa “Fuego que inicia en el corazón”, y que es el nombre que le dan los propietarios del paraje Huey Tecoch a su grupo de trabajo (Martínez, 2021).

epistemológico al pragmatismo, postura que consiste en elegir el método más apropiado para un estudio en específico, y, que pueda llegar a transformar (Hernández et al., 2014).

Alcance de investigación: correlacional, debido a que en este tipo de estudio se observan las relaciones entre las diferentes variables con el objetivo de identificar la relación o asociación entre las mismas (Hernández et al., 2018).

J) **Enfoque metodológico–epistemológico:** Teoría General de Sistemas (TGS), dado que es un enfoque metodológico–epistemológico que considera estudiar la realidad desde diferentes aristas que permitan observar no sólo lo natural, sino también aspectos como el factor social y humano. Sin embargo, esto no deberá realizarse de manera separada para después unirlos en una realidad sino en un sentido integral u holística (Ñaupas et al., 2014). La teoría general de sistemas y la teoría de la organización, orientadas a objetivos en común, son modelos marco de la transdisciplina (Hirsch et al., 2006).

J) **Enfoque de investigación:** transdisciplinaria ya que, en este tipo de investigación, enfocada al estudio sistemático de una totalidad organizada, se toman en consideración no únicamente enfoques teóricos (asociados a la comunidad científica), sino también se toman en consideración las percepciones y conocimientos de las personas relacionadas (Jahn et al., citado por Ramírez–González, 2016), es decir, fusión de conocimiento científico y de las partes interesadas⁵.

VI.2 Muestreo y análisis de suelos

Muestreo

Suelo con vegetación natural

Para el suelo conservado con vegetación natural, el muestreo se realizó en función de los diferentes horizontes y capas de suelo identificados durante el descubrimiento del perfil edáfico.

⁵ Partes interesadas: entendidas como aquellas que “(1) participan en el proceso de toma de decisiones, (2) se ven afectadas por las decisiones tomadas o (3) no participan en el proceso de toma de decisiones, pero son importantes para una implementación exitosa” (Linares et al., 2023a).

La toma de muestras de caracterización (Schoeneberger et al., 2000) para cada uno de los horizontes y capas de suelo identificados en el perfil, se realizó de acuerdo con lo establecido en la guía para la descripción de suelos de la FAO (2009).

Sistema agroecológico

a) Patrón de muestreo

Para el suelo del sector de referencia se siguió un muestreo aleatorio sistemático de rejilla, cuyas distancias se consideraron a 16 metros y posteriormente se estableció la cuadrícula sobre la parcela, ello con ayuda del programa QGIS Desktop 3.28.14, se identificaron los nodos de unión de las líneas, los cuales fueron georreferenciados, para ser posibles puntos de muestreo (INECC, 2007).

b) Ubicación de los puntos de muestreo

Una vez en campo, se identificaron los puntos ya georreferenciados, con apoyo del GPS portátil Garmin eTrex serie uno, identificándose aquellos que fue factible muestrear dado que en campo se pueden identificar perturbaciones en el área. La distribución de los puntos de muestreo en el sector de referencia quedó como puede observarse en la Imagen 10.



Imagen 10. Localización de los puntos de muestreo en el Sector de Referencia.

Fuente: Elaboración propia con información de Google Earth.

c) Profundidad

En este sitio se consideraron dos bloques para la toma de muestras, siendo el primero bloque para profundidades de 0–20 cm y el segundo bloque de 20 a 40 cm.

d) Tipo y tamaño de muestra

En el sector de referencia el tipo de muestras que se tomó fue una muestra compuesta, formada con las 5 extracciones de la barrena holandesa tomada en forma de cuadrado latino, formando una muestra compuesta de aproximadamente 2 kg. Como resultado se obtuvieron 25 muestras a una profundidad de 0–20 cm y 25 muestras a una profundidad de 20–40 cm, distribuidas en el sector de referencia como en la Imagen 10.

La toma de muestras de suelo en el sitio se realizó conforme lo establece el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (1999) y Norma Oficial Mexicana NOM–021–RECNAT–2000, Que Establece Las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis (Norma Oficial Mexicana NOM–021–RECNAT–2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., 2002).

Durante la etapa de campo también se tomaron las muestras para densidad aparente en el cilindro de volumen conocido, en cada una de las terrazas del sector de referencia, de acuerdo con el método establecido por la Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo (USDA–NRCS, 1999).

Análisis de laboratorio

Para el presente estudio, tanto las propiedades físicas como químicas fueron útiles para clasificar y confirmar el tipo de suelo como un Andisol, el cual corresponde a un andosol como lo clasificó Werner (1976) de acuerdo con criterios de la WRB (FAO, 2017b).

Las muestras provenientes del sistema agroecológico y del suelo con vegetación natural fue realizada siguiendo las mismas técnicas descritas a continuación:

Caracterización física

Las pruebas físicas se realizaron, algunas en campo y otras en laboratorio, por diferentes métodos como se describe a continuación:

- J Densidad aparente por el método del cilindro con volumen conocido (USDA–NRCS, 1999).
- J Color en seco y en húmedo, a través de las cartas de color del suelo de Munsell (Munsell, 2000).
- J Textura, se realizó la determinación de la clase textural mediante métodos de manipulación (FAO, s/f). Ello debido a que la determinación de textura mediante el método de Bouyoucos presenta limitaciones para ciertos tipos de suelo como son los Andosoles (la dispersión del suelo no se obtiene con métodos estandarizados) (Jaramillo, 2002).

Caracterización química

Algunas de las propiedades químicas más importantes que se analizaron, tanto para el suelo conservado bajo vegetación forestal como para el sistema agroecológico, son la capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+), porcentaje de saturación de bases (PSB), acidez hidrolítica (pH en H_2O) e intercambiable (pH en solución de KCl 1N), ΔpH , porcentaje de materia orgánica (%MO), porcentaje de carbono orgánico(%CO), porcentaje de nitrógeno total (%NT) y la relación carbono–nitrógeno (C/N).

Preparado de muestras y análisis de laboratorio

Las muestras fueron preparadas de acuerdo con lo establecido por la NOM–021–RECNAT–2000, que considera las condiciones de traslado de las muestras hasta el laboratorio, la información de recepción y registro, las condiciones de secado (profundidad inferior de 2.5 cm, temperatura no mayor a 35°C y una humedad relativa entre 30 y 70%), la molienda con maso de madera, el tamizado en malla 10, el homogeneizado, pesado y almacenamiento de estas.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas de acuerdo con lo establecido en la NOM–021–SEMARNAT–2000, siendo estas las siguientes:

- J pH en H_2O (relación 1:2), pH en KCl (relación 1:2) y ΔpH (pH KCl–pH H_2O) (método electrométrico)
- J Nitrógeno total (método de digestión)

- J Carbono orgánico del suelo y materia orgánica (método de Walkley y Black)
- J Relación Carbono / Nitrógeno
- J Capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (método de extracción con acetato de amonio y cloruro de sodio)
- J Saturación de bases

Cada una de las muestras se analizó por duplicado, obteniéndose posteriormente la media de cada resultado para ser utilizado en las siguientes pruebas.

VI.3 Suelos de calidad inherente

VI.3.1 Régimen de humedad y temperatura del suelo

Algunas de las características de diagnóstico más importantes para la estructura de clasificación de suelos de la Soil Taxonomy es el régimen de humedad y temperatura del suelo, dada su relevancia en el crecimiento de plantas y cultivos, así como en los diversos procesos del suelo (Porta et al., 2003). A reserva de lo anterior, para poder relacionar los procesos de erosión, sus tasas y las formas en que se presentan es necesario conocer el régimen de humedad del suelo, el cual también determina la actividad biológica de los microorganismos, procesos físicos y químicos, así como la hidrología de este; por tanto, conocer la dinámica estacional y temporal pueden ofrecer algunos indicios de procesos hidrológicos superficiales y de la erosión por escorrentía superficial (Cerdá, 1996).

Para el desarrollo de este análisis, el primer paso fue determinar las condiciones climáticas en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, para lo cual se consideraron las siguientes actividades:

- J Recopilación de la información de precipitación anual y temperatura media de las estaciones termo pluviométricas cercanas al Parque Nacional La Malinche, tanto pertenecientes al estado de Tlaxcala como al de Puebla.
- J Elaboración de bases de datos con la información que va de 1988 a 2018.
- J Las bases de datos obtenidas se procesaron en el programa Surfer (versión de prueba) y QGis versión 3.28.14–Firenze para obtener los mapas climáticos de isoyetas e isotermas.

En el siguiente paso se determinó el balance hídrico del suelo, que, como cualquier balance, considera los aportes, pérdidas y almacenamiento de agua en este recurso edáfico, en un determinado tiempo (anual, mensual, diario).

$$A_{al} + e + s = A_r - A_p \quad (\text{Ecuación 1})$$

El balance hidrológico de Thornthwaite se establece a partir del aporte de agua por precipitación (P), la pérdida de agua hacia la atmósfera (ETP), el almacenaje de agua en el suelo (Alm) y como elemento esencial en este balance la evapotranspiración real (ER)(Martínez & Garbi, 2020).

$$P - E (\pm)\Delta Al - E = 0 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para realizar el balance hídrico del suelo se consideró la información de precipitación y temperatura de las estaciones termo pluviométricas de la zona de estudio, además del cálculo de la evapotranspiración potencial (Ep), determinada a través del Segundo Sistema de Thornthwaite (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1972).

La expresión que determina la evapotranspiración potencial es la siguiente:

$$E = 1.6 \left[\frac{t}{I} \right]^a x \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde:

Ep=Evapotranspiración potencial para un mes específico, en milímetros (mm)

t=Temperatura promedio mensual, en grados centígrados (° C)

$$I = \text{Índice de calor anual} \quad I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$a = \text{función compleja de } i \quad a = 6 \quad 2^{-9} x I^3 - 7 \quad 1^{-7} x I^2 + 1 \quad 1^{-5} + 0.4 \quad (\text{Ecuación 5})$$

F: Factor de corrección por latitud, siendo para México 19°.

Con la información recopilada de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial se construyen climogramas, los cuales son una representación gráfica del balance hídrico del suelo, que posteriormente definirán el régimen de humedad y temperatura del suelo, lo cual permite clasificar los suelos de la zona de estudio, así como el clima correspondiente (Porta et al., 2003).

VI.3.2 Suelo del Centro de Cultura Ambiental "Tezokihkall"

Mediante técnicas de prospección edáfica se identificó un sitio con suelos de vegetación natural conservado (calidad inherente) (Porta et al., 2003), en la misma unidad de suelo que el sector de

referencia del sistema agroecológico (calidad dinámica), y en las inmediaciones del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

La descripción del perfil del suelo, así como la identificación del tipo de suelo se realizó de acuerdo con lo establecido en la Guía para la descripción de suelos de la FAO (2009) y en las Claves para la Taxonomía de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos–Servicio de Conservación de Recursos Naturales (2014).

Propiedades ándicas

Los suelos de reciente formación, a partir de materiales volcánicos poseen características especiales denominadas propiedades ándicas, las cuales representan una etapa de transición entre aluminosilicatos primarios (vidrio volcánico) y materiales de rango corto (alófano, imogolita, ferrihidrita o complejos metal–humus) a través de un proceso de intemperismo y transformación (USDA–NRCS, 2014) . El mismo autor indica que los científicos pueden utilizar la untuosidad o el pH en fluoruro de sodio (NaF, 1 N) como indicadores de campo de las propiedades ándicas.

La prueba de pH_{NaF} fue desarrollada por Fieldes y Perrott (1996), y consiste en colocar una pequeña cantidad de suelo sobre papel filtro previamente impregnado de fenolftaleína y se le adicionan unas gotas de NaF 1M (ajustado a pH 7.5), observándose un cambio a color rojo indicando una reacción positiva.

Carga variable

La acidez intercambiable se evalúa en suelos que tienen $pH < 5.5$, ya que a partir de este valor inicia el aumento de la solubilidad del aluminio de manera exponencial dado que está asociada a los cationes Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$ y al $Al(OH)^{2+}$. La valoración de la acidez intercambiable se realizó a través de una solución de KCl 1N, de esta manera los cationes que se encontraban saturando el coloide fueron desplazados por el catión de la sal y pasaron a la solución del suelo aumentando la concentración de H_3O^+ y disminuyendo el pH (Jaramillo, 2002).

Uno de los aspectos más importantes de la determinación de la acidez intercambiable es la identificación del tipo de carga de los coloides, haciendo la diferencia entre el pH determinado entre la sal y el agua.

VI.4 Identificación de los servicios ecosistémicos del sistema agroecológico

La identificación de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo del sistema agroecológico, en el Parque Nacional La Malinche, se realizará a través de la metodología establecida por Nieto (2017) respecto a la identificación de los servicios ecosistémicos asociados a los sistemas agroecológicos. Dicha metodología establece las siguientes etapas:

Etapa 1: Identificación de servicios ecosistémicos, en función de las prácticas de manejo.

Etapa 2: Identificación de los servicios ecosistémicos, de acuerdo con su clasificación.

Etapa 3. Identificación de los servicios ecosistémicos del sistema agroecológico.

VI.5 Estimación del almacenamiento de carbono

Dado el contexto global de alteración del clima y el aumento de la degradación del suelo, ha crecido el interés respecto al servicio ecosistémico de secuestro de carbono y almacenamiento del carbono atmosférico, dada su contribución en la regulación del clima (Basile-Doelsch et al., 2023).

La determinación del porcentaje de carbono en el suelo se realizó por vía húmeda a través de la técnica de Walkley y Black indicada por la SEMARNAT (Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., 2002). Posteriormente, se realizó la estimación del almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) por unidad de área, para cada una de las terrazas y para el suelo conservado con vegetación natural.

La cuantificación de las reservas de COS se realizó a través de la siguiente expresión establecida por la FAO (2017a), una vez obtenidos los resultados de densidad aparente.

$$C_r = p \times D \times C \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

DA: densidad aparente (Kg/m³),

p: profundidad del horizonte/orden de profundidad (m),

C: contenido de carbono (g/g)

COS: reserva de carbono orgánico del suelo (kg/m²) a 0.3 m de profundidad

La determinación de las reservas de carbono se realizó a una profundidad de 30 cm, para efectos de comparación de los resultados con las reservas mundiales de carbono a estas profundidades; y el factor de pedregosidad se consideró 1 dado que estas ya fueron tomadas en cuenta en la densidad aparente (técnica del cilindro de volumen conocido).

VI.6 Estimación de la pérdida de suelo

Para estimar la pérdida de suelo en el sector de referencia se considera el modelo de calidad de suelo que considera a la calidad inherente como aquellas propiedades del suelo asociadas a su composición y propiedades intrínsecas del mismo que pueden ser influenciadas por las condiciones ambientales, sin embargo, estos cambios únicamente pueden ser observados a largo plazo (años geológico) (Moebius–Clune et al., 2016).

En función del modelo descrito en el párrafo anterior, se consideró el desarrollo de los siguientes pasos:

1. Identificación de los indicadores de suelo con calidad inherente.
2. Comparación de los indicadores de suelo, para el suelo conservado y para el suelo manejado, con el objetivo de identificar la capa de suelo superficial (de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm) en la que actualmente se encuentran trabajando en el sector de referencia.
3. A partir de la identificación de la capa superficial del suelo manejado con respecto al horizonte del suelo conservado, se pudo determinar la altura de suelo erosionado en el sector de referencia.
4. Estimación de la pérdida de suelo, una vez obtenido el valor de la altura del suelo erosionado y la densidad aparente, a partir de la siguiente ecuación (Pizarro et al., 2010):

$$X = Y \cdot 10 \quad (\text{Ecuación } 7)$$

Donde:

Da=Densidad aparente (t/m³)

Y=Altura del suelo erosionado(mm)

X=Suelo erosionado (t/ha)

10=Factor de corrección de unidades

Para poder contar con una referencia respecto de los resultados obtenidos en la determinación de pérdida de suelo, se desarrolló su determinación a partir de la Ecuación Internacional de Pérdida de Suelo, identificada como USLE [(Wischmeier y Smith 1965, 1978; citados por Montes-León (2011)], la cual considera la siguiente ecuación:

$$A = R K L C P \quad (\text{Ecuación } 8)$$

Donde:

A: tasa de erosión anual (t/ha*año)

R: factor de erosividad de la lluvia (MJ*mm/ha*h)

K: factor de erodabilidad del suelo (t*h/MJ*mm)

LS: factor topográfico longitud-pendiente

C: factor de vegetación y cultivo

P: factor de prácticas de conservación

Los factores que integran que integran la ecuación anterior, se describen a continuación:

R (factor de erosividad de la lluvia): este factor está asociado al factor climático y está determinado a través de la intensidad máxima de la lluvia en un periodo de 30 minutos (I_{30}) y la energía cinética asociada (E_c), sin embargo, dada la inexistencia de información al respecto se tomó en consideración la ecuación propuesta por Becerra [1997, citado por Montes-León et al. (2011)] para México, específicamente la región 8 donde se ubica la zona de estudio, que toma en cuenta la precipitación media anual (P), siendo esta la siguiente:

$$R = 1.9 P + 0.0 P^2 \quad (\text{Ecuación } 9)$$

La precipitación media anual se determinó a través de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio, utilizándose el método del U.S National Weather Service (WS) según Chow et al. (1994), el cual corresponde al promedio del inverso de la distancia al cuadrado como factor ponderador.

K (factor de erodabilidad del suelo): es el factor referido a la susceptibilidad o resistencia de la capa superficial del suelo a la erosión, principalmente por el impacto de las gotas de lluvia y el flujo superficial. Para determinar su valor se utilizó la metodología establecida por la FAO, que considera la clasificación del tipo de suelo y de su textura superficial (gruesa, media o fina), siendo

para un Andosol de textura gruesa un factor de 0.026, ello de acuerdo con el cuadro del factor K, de acuerdo con el tipo de suelo desarrollado por la WRB (Montes-León et al., 2011).

LS (factor topográfico Longitud-Pendiente): este factor está referido al aspecto topográfico y está integrado por el factor longitud(L) y grado de la pendiente del terreno (S).

La longitud está definida a través del sitio de origen del escurrimiento hasta el lugar donde la pendiente decrece, encuentra un área de sedimentación, o un canal de salida. Para la determinación de la pendiente se utilizaron mapas topográficos con curvas a nivel equidistantes. La longitud puede ser determinada a partir de la siguiente ecuación establecida por Renard y citada por Montes León y colaboradores(2011):

$$L = \left(\frac{x}{z \cdot 1} \right)^m \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$$m = \beta / 1 + \beta \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\beta = (s_i / 0.0) / [3 (s_i \theta)^{0.8} + 0.5] \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\theta = p \quad d \quad t_i$$

Para el caso del factor pendiente (S) este se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación, considerando para la zona una pendiente superior al 9%.

$$S = 1.8 \text{ si } \theta - 0.5 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde θ es la pendiente del terreno en grados.

C (factor de vegetación y cultivo): este factor está referido al efecto de la cubierta de la vegetación y las prácticas de manejo. El valor de este factor varía entre 0 (terreno protegido) y 1.0 (terreno sin protección).

Este factor fue determinado de acuerdo con el cuadro de factor para vegetación y uso de suelo establecido por Montes-León y colaboradores (2011), donde para una agricultura de temporal el factor C es de 0.75.

P (factor de prácticas de conservación): este factor es definido por USLE como factor de práctica de soporte, que considera la tasa relativa de pérdida de suelo con una práctica particular, con respecto a la pérdida de suelo acorde a un laboreo combinado (volteado del suelo pendiente arriba

y abajo). Dado que se tiene establecido un sistema de terrazas en una pendiente del 17% el valor de P considerado es de 0.2.

VI.7 Conservación de la fertilidad del suelo

La valoración del servicio ecosistémico de conservación de la fertilidad del suelo fue desarrollado a través del modelo de calidad del suelo. Este modelo, de acuerdo con lo establecido por la NRCS(2001), considera su abordaje a través de diferentes problemas, siendo uno de ellos la fertilidad del suelo, con sus respectivos indicadores.

Los indicadores de calidad de suelo (Tabla 4) se seleccionaron de acuerdo con lo establecido por la NRCS (2001) y las modificaciones realizadas por Tenorio (2008) para andosoles, los cuales corresponden a la misma unidad de suelo de la zona de estudio del presente trabajo.

Tabla 4. Indicadores de calidad de suelo considerados para evaluar fertilidad.

Problema	Indicadores por evaluar propuestos por la NRCS (2001)	Indicadores por evaluar propuestos por Tenorio (2008)
Fertilidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carbono orgánico ▪ pH del suelo ▪ Pruebas de fertilidad del suelo ▪ Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ % de carbono orgánico (% CO) ▪ pH en H₂O (relación suelo: agua 1:2) ▪ % de nitrógeno (% NT) ▪ Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) ▪ % saturación de bases (PSB) ▪ Calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiables

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se presenta el problema considerado, los indicadores seleccionados, las posibles razones del problema, así como las sugerencias de mejora de la calidad de suelo, las cuales están relacionadas con las diferentes prácticas agrícolas desarrolladas en el sistema agroecológico.

Tabla 5. Problema, causas, indicadores a evaluar y sugerencias de mejora de la calidad de suelo.

Problema	Indicadores para evaluar	Posibles razones del problema	Sugerencias de mejora de la calidad del suelo
Fertilidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ % CO ▪ pH en H₂O ▪ % NT ▪ CIC ▪ PSB 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desequilibrios de nutrientes (carencias o excesos) ▪ Mal drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluaciones de suelo respecto a los niveles correctos de nutrientes y pH ▪ Aumentar los residuos orgánicos

Problema	Indicadores para evaluar	Posibles razones del problema	Sugerencias de mejora de la calidad del suelo
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiables ▪ Materia orgánica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Actividad microbiana del suelo pobre o limitada ▪ pH incorrecto ▪ Materia orgánica baja 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usar estiércol animal ▪ Usar cultivos de cobertura ▪ Rotaciones de cultivos ▪ Labranza reducida

Fuente: Elaboración propia con información de Tenorio (2008) y USDA-NRCS(2001).

Los indicadores seleccionados serán evaluados en el sistema agroecológico del sector de referencia, para posteriormente ser comparados estadísticamente con suelos de uso agrícola convencional⁶ de la misma zona de estudio y misma unidad de suelo edafológica.

VI.7.1 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se aplicaron a los indicadores de calidad de suelo para evaluar el servicio ecosistémico de fertilidad, asociados a los resultados de las propiedades físicas y químicas de las muestras provenientes de los primeros 20 cm de profundidad, tanto del sistema agroecológico como a los suelos de uso agrícola convencional.

Los programas computacionales utilizados para llevar a cabo los análisis estadísticos fueron MINITAB 17 (Minitab Inc, 2013), en su versión libre, y RStudio (Posit Software PBC, 2023).

Para la evaluación de los indicadores en los distintos manejos de suelo se tomaron en consideración las técnicas estadísticas establecidas por Tenorio(2008) en su tesis doctoral para el problema de fertilidad, para comparar suelos con calidad dinámica y calidad inherente, siendo estas las siguientes:

-) MANOVA de un factor de dos niveles, referido al tipo de manejo del suelo, siendo estos suelos bajo manejo de sistema agroecológico y suelos con manejo de agricultura convencional, para identificar si existe diferencia significativa entre las variables de la fertilidad del suelo en función del tipo de manejo.

⁶ Agricultura convencional identificada como aquella cuyo objetivo es la maximización de la producción y de las ganancias, considerando para ello prácticas de la agricultura moderna como la labranza intensiva, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, el monocultivo, la manipulación genética y el riego (Gliessman et al., 1998).

MANOVA (Análisis de Varianza Múltiple)

El objetivo de este modelo de acuerdo con Pérez (2004) es el de:

Contrastar si los valores no métricos de las variables independientes determinarán la igualdad de vectores de medias de una serie de grupos determinados por ellos en las variables dependientes (p. 8).

La ecuación general de este modelo es la siguiente:

$$G(y_1, y_2, \dots, y_m) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Un aspecto importante para considerar antes de llevar cabo el análisis MANOVA es el de la verificación de los supuestos asociados a las variables presentes en el modelo. Esto debido a que la existencia de numerosas variables provoca complejidad entre sus interrelaciones, lo cual nos podría llevar a resultados con distorsiones y sesgos (Pérez, 2004).

Los supuestos que se tomaron en consideración antes de desarrollar el modelo fueron los siguientes:

- Normalidad
- Ausencia de datos atípicos
- Homocedasticidad
- Linealidad y ausencia de multicolinealidad
- Ausencia de autocorrelación

Para la evaluación de las hipótesis planteadas se utilizaron diferentes pruebas globales de significación, siendo estas: la traza de Pillai, la traza de Hotelling, la lambda de Wilks y la raíz máxima de Roy (Gómez, 1992).

Gómez (1992) indica que la traza de Pillai es la suma de las varianzas explicadas en las variantes discriminantes, donde cuanto mayor sea su valor mayor será la diferencia entre los grupos. La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$V = \sum_{i=1}^s \frac{\lambda_i}{1+\lambda_i} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Asimismo, el mismo autor indica que la Lambda de Wilks corresponde al producto de las varianzas no explicadas, en cada una de las variantes discriminantes, cuyo resultado entre menor sea mayor será la diferencia entre grupos. La ecuación correspondiente es:

$$W = \frac{s}{t-1} \frac{1}{1+\lambda_i} \quad (\text{Ecuación 16})$$

VI.8 Fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria

Linares y colaboradores (2023) señala que, dentro de los principios rectores de la investigación transdisciplinaria, se cuenta con tres categorías clave en este tipo de estudios, siendo estos los siguientes:

- J) Fases del proceso, que considera cuatro fases (Wiek et al., 2014): a) fase de preparación, b) fase de investigación, c) fase de aplicación, y d) fase de integración.
- J) Tipos de conocimiento, donde se toma en cuenta: a) conocimiento del sistema, b) conocimiento del objetivo, y c) conocimiento de la transformación.
- J) Intensidad de la participación, que considera cuatro aspectos: a) información, b) consulta, c) colaboración y d) empoderamiento (Imagen 11).

El mismo autor indica que son cuatro niveles de intensidad de participación en una investigación transdisciplinaria, siendo estos los siguientes:

Información: restringida a la participación y compromisos limitados de forma unidireccional

Consulta: representa un flujo de información unidireccional desde los actores de la práctica hacia la academia (cuestionarios, entrevistas, etc.).

Colaboración: los participantes tienen influencia en el proceso y el resultado.

Empoderamiento: la toma de decisiones es otorgada al público o está directamente involucrado en ella.

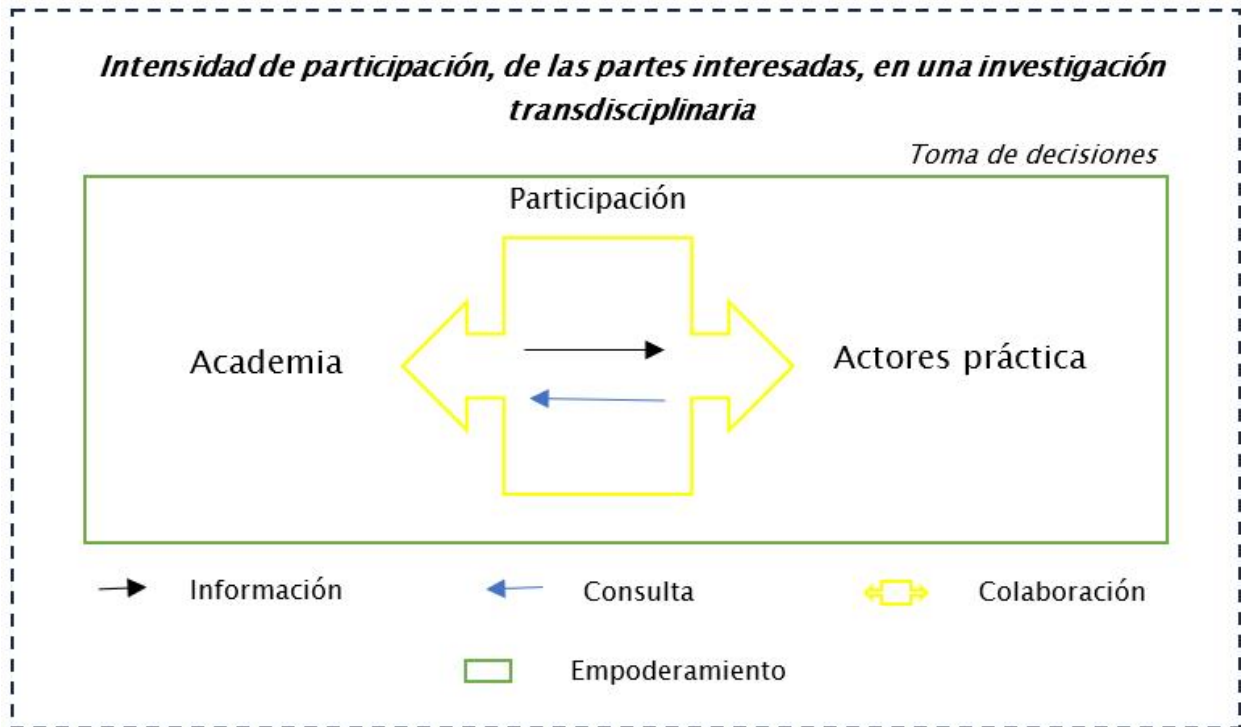


Imagen 11. Intensidad de participación, de las partes interesadas, en una investigación transdisciplinaria.

Fuente: Elaboración propia con información de Linares y colaboradores (2023).

Tomando en consideración que el aumento en la intensidad de la participación de todas las partes interesadas refleja el fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria, es esta categoría la que será tomada en consideración para observar el objetivo correspondiente a esta investigación. Lo anterior, tomando en consideración que el enfoque de acercamiento de las partes interesadas, de acuerdo con Linares y colaboradores (2023) está dado por talleres, entrevistas, ciencia ciudadana, diálogo de partes interesadas, etc.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VII.1 Caracterización fisicoquímica

Propiedades físicas del suelo

Color del suelo: El color identificado en el suelo con vegetación natural va de colores negros en los primeros horizontes del tipo A (10YR 2/1), a colores café–amarillentos oscuros (10YR 3/4, 10YR 4/1, 7.5YR 4/4 y 7.5YR 4/4) en las capas del tipo C, ello de acuerdo con las cartas de color de Munsell(Munsell, 2000). Los colores oscuros observados en los horizontes superficiales corresponden a los contenidos de materia orgánica procedentes de los materiales vegetales, según lo describe Pritchett (1990), cuya tasa de desintegración del material vegetal de la cubierta forestal está influenciada por la naturaleza fisicoquímica de los tejidos vegetales, en este caso material vegetal procedente de árboles de pino–encino (pérdida de peso en un año 40% y 80% respectivamente); condiciones de aireación, humedad y temperatura de la cubierta, en este caso en un clima templado; y principalmente la actividad biológica, limitada por la temperatura, la acidez del suelo.

En la Tabla 6 se pueden observar con más detalle los colores en seco y en húmedo de cada una de las capas y horizontes del perfil de suelo con vegetación natural.

Tabla 6. Propiedades físicas del suelo con vegetación natural.

Horizonte	Profundidad cm	Densidad aparente g/cm ³	Porosidad %	Color		Clase textural
				seco	húmedo	
A1	0–10	0.9	0.7	10YR 3/1	10YR 2/1	Arenoso franco
A2	10–31	0.6	0.8	10YR 3/1	10YR 2/1	Arenoso franco
A3	31–50	0.6	0.8	10YR 3/1	10YR 2/1	Arenoso
C1	50–69	1.0	0.6	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
C2	69–87	1.1	0.6	10YR 5/2	10YR 4/1	Arenoso arcilloso
C3	87–112	1.1	0.6	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	Arenoso arcilloso
C4	112+	1.1	0.7	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	Arcilloso arenoso

Fuente: Elaboración propia.

El color del suelo en húmedo (10 YR 2/1), identificado en los primeros 20 cm del perfil de suelo bajo vegetación natural, corresponde con los reportados para suelos de origen volcánico en la misma zona de estudio para la zona boscosa del mismo predio (Huey Tecoch) (Coyotl, 2015).

Para el caso del suelo del sistema agroecológico “Metepantle”, el color en seco del suelo superficial (20 cm de profundidad) identificado en la zona de terrazas va de un 10YR 4/4 (marrón amarillento oscuro) a un 10YR 5/2 (marrón grisáceo), mientras que en húmedo el color va de un 10YR 3/4 (marrón amarillento oscuro) a un 10YR 4/1 (gris oscuro).

Textura del suelo

En el caso del suelo con vegetación natural, en el perfil de suelo se pudieron identificar clases texturales arenoso-franco en los horizontes A1 y A2, arenoso para los horizontes A3 y C1, arenoso-arcilloso para los horizontes C2 y C3, mientras que la capa C4 presenta una clase textural arcilloso-arenoso. Para el caso del sistema de terrazas la clase textural predominante es la arenosa para las terrazas 1 a 5, mientras que para la terraza 6 se identificó como arenoso arcilloso. Estos suelos, formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que el suelo presenta textura relacionada con características del material parental.

Densidad aparente

Los suelos bajo vegetación natural presentaron una densidad que va de 0.6 a 0.9 g/cm³ en los primeros horizontes (A1, A2 y A3), influenciados básicamente por los mayores contenidos de materia orgánica, lo que significa una mayor porosidad del suelo, y por tanto una mayor facilidad en el crecimiento de las raíces de la vegetación. La densidad aparente para las capas inferiores del perfil presentó valores de 1.0 a 1.1 g/cm³, siendo uno de los efectos un menor aporte de material orgánico.

Estos valores de densidad aparente son acordes a los identificados para suelos forestales, los cuales varían de 0.2 a 1.9 g/cm³ (Pritchett, 1990). Específicamente para andosoles se tiene considerado una densidad aparente menor a 0.9 g/cm³ (USDA-NRCS, 2014), teniéndose referencias en México de valores que van de 0.72 a 1.22 g/cm³ en Andosoles del Estado de México y Morelos (Hidalgo, 1988).

La densidad aparente del sistema de terrazas se identificó en un rango de 1.0 a 1.2 g/cm³ en los primeros 20 cm, mientras que a una profundidad de 20 a 40 cm se encontraron resultados de 1.1 a 1.3 g/cm³. Este aumento en el valor de la densidad aparente se puede explicar en función del

manejo que tienen ya que al ser objeto de actividades de labranza están expuestos a la compactación por el uso de maquinaria y al paso de animales, sin embargo, no superan los límites de densidad para evitar el crecimiento de raíces de las plantas los cuales en suelos de textura arenosa se reportan en valores de 1.75 g/cm^3 , de acuerdo con lo reportado por Pritchett (1990). Estos valores de densidad aparente coinciden con los reportados por Coyotl (2015), los cuales reporta varían en un rango de 0.97 a 1.4 g/cm^3 , para andosoles de zonas agrícolas (profundidad a 20 cm) del paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Tabla 7. Propiedades físicas del suelo en el sistema agroecológico del Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Terraza	Profundidad cm	Densidad aparente g/cm ³	Porosidad %	Velocidad de infiltración cm/min	Color		Clase textural
					seco	húmedo	
T1	0-20	1.2	0.5	0.5	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
	20-40	1.3	0.5	1.7	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
T2	0-20	1.2	0.6	0.4	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
	20-40	1.2	0.5	0.3	10YR 5/2	10YR 4/1	Arenoso
T3	0-20	1.1	0.6	1.2	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
	20-40	1.1	0.6	1.2	10YR 5/2	10YR 4/1	Arenoso
T4	0-20	1.1	0.6	1.2	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
	20-40	1.2	0.6	0.7	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
T5	0-20	1.0	0.6	0.6	10YR 4/4	10YR 3/4	Arenoso
	20-40	1.2	0.5	1.7	10YR 5/2	10YR 4/1	Arenoso
T6	0-20	1.1	0.6	0.8	10YR 5/2	10YR 4/1	Arenoso-Arcilloso
	20-40	1.2	0.6	0.9	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	Arenoso-Arcilloso

Fuente: Elaboración propia.

Propiedades químicas

Los resultados de estas propiedades se presentan en la Tabla 8 para el suelo con vegetación natural y la Tabla 9 para el sistema agroecológico.

Intercambio catiónico

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de saturación en bases (%V) y bases intercambiables para el suelo conservado bajo vegetación natural.

Los resultados encontrados de CIC, para los diferentes horizontes del perfil de suelo con vegetación natural, variaron en un rango que va de 5.6 a 17.3 Cmol(+) / kg, cuyos resultados son coincidentes con los reportados por Vela-Correa y colaboradores (2007) para Andosoles mólicos, también del Parque Nacional La Malinche, quien reporta para diferentes perfiles de la zona rangos de 5.20 a 14.23 y 9.00 a 15.00 Cmol(+) / kg. No obstante, los resultados del mismo autor no son coincidentes en el porcentaje de saturación en bases (%V), ya que reporta valores por encima del 50%, mientras que en el presente trabajo se mantienen los valores por debajo de este valor, de ahí la diferencia en la clasificación del epipedón de mólico y úmbrico. Los porcentajes de saturación de bases y las bases intercambiables, de los Andosoles de la zona de estudio, presentan valores bajos, causados por la lixiviación de estas, dadas las condiciones climáticas tal como lo indica Valera (1993) para suelos de este tipo.

Para el caso de los suelos del sistema de terrazas se pudieron encontrar valores de CIC de 5.8 a 15.1 Cmol(+) / kg, valores que no muestran una diferencia significativa con los observados en suelos de vegetación natural, y con Andosoles del Parque Nacional La Malinche reportados por Vela-Correa y colaboradores (2007).

Reacciones del suelo

Los resultados de acidez hidrolítica, para los horizontes del suelo conservado bajo vegetación natural, presentaron valores que varían en un rango de 5.3 a 5.7, calificado como de moderado a fuertemente ácido (Tabla 8). Estos valores son coincidentes con los reportados por Campos y colaboradores (2001) para Andosoles del perfil identificado como COF 26 del Cofre de Perote en Veracruz, reportando pH en un rango de 5.3 a 5.7.

Para las terrazas del sistema agroecológico, la acidez hidrolítica varía en un rango de 5.5 a 6.6, rango calificado como ligeramente a moderadamente ácido, a una profundidad de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm (Tabla 9). Estos resultados de pH son coincidentes con los reportados por Aguilar (2023), con valores de 5 a 6 para Andosoles de uso agrícola que consideran la siembra de árboles frutales (Comarcas 1 y 3), y, de maíz, frijol, avena y sorgo (Comarca 4).

Tabla 8. Propiedades químicas del suelo con vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Horizonte	Profundidad	CIC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	V	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ΔpH	NT	CO	MO	C/N
	cm	Cmol (+) Kg ⁻¹					%	1:2	1:2		%	%	%	
A1	0-10	10.1	3.9	0.9	0.2	0.3	52.6	5.7	5.0	-0.7	0.21	3.4	5.9	16.6
A2	10-31	17.3	4.9	1.3	0.1	0.3	38.1	5.6	4.7	-0.9	0.55	4.8	8.3	8.7
A3	31-50	10.8	3.0	1.4	0.2	0.3	45.0	5.3	4.5	-0.8	0.38	3.9	6.7	10.3
C1	50-69	13.1	1.2	0.5	0.2	0.3	16.1	5.5	4.5	-1.0	0.11	1.5	2.7	13.9
C2	69-87	6.0	0.4	0.2	0.1	0.2	15.3	5.5	4.6	-0.9	0.23	1.1	1.9	4.7
C3	87-112	5.6	0.8	0.2	0.1	0.1	22.6	5.6	4.8	-0.8	0.10	0.8	1.5	8.2
C4	112+	9.6	1.8	0.5	0.2	0.2	27.8	5.6	4.7	-0.8	0.18	0.7	1.3	4.0

CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Iones: Ca⁺⁺ = calcio, Mg⁺⁺ = magnesio, Na⁺ = sodio, K⁺ = potasio; V= Saturación en bases; pH= potencial de hidrógeno; ΔpH= [pH (KCl)-pH (H₂O)], NT= Nitrógeno Total, CO= Carbono Orgánico, MO= Materia Orgánica, C/N= Relación Carbono/Nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Propiedades químicas del suelo en el sistema agroecológico, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Terraza	Profundidad cm	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	V %	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ΔpH	NT	CO	MO	C/N
								1:2	1:2		%	%	%	
T1	0-20	13.3	3.1	0.9	0.2	0.5	52.7	6.6	5.3	-1.3	0.38	3.0	5.1	9.3
	20-40	14.7	2.0	0.6	0.2	0.5	34.8	6.6	5.2	-1.3	0.25	1.9	3.2	7.8
T2	0-20	6.8	2.9	1.7	0.1	0.4	75.3	5.5	5.3	-0.1	0.17	2.8	4.8	17.1
	20-40	9.9	2.4	1.5	0.1	0.4	47.8	5.5	5.2	-0.4	0.08	1.6	2.7	20.1
T3	0-20	15.1	3.3	1.6	0.1	0.4	37.2	5.6	4.9	-0.6	0.15	2.9	5.0	19.7
	20-40	12.7	2.9	1.3	0.1	0.5	46.4	5.8	5.4	-0.4	0.13	1.3	2.2	9.5
T4	0-20	12.5	3.1	2.1	0.1	0.7	51.4	5.7	5.3	-0.4	0.18	3.1	5.3	18.5
	20-40	15.3	2.5	1.3	0.1	0.6	44.0	5.7	5.3	-0.4	0.14	2.1	3.7	14.0
T5	0-20	8.7	2.8	1.4	0.1	0.4	60.4	5.6	4.8	-0.8	0.12	2.3	3.9	19.1
	20-40	13.4	2.9	1.3	0.1	0.4	43.1	5.7	4.9	-0.9	0.09	1.6	2.7	18.7
T6	0-20	5.8	1.5	1.2	0.1	0.3	53.4	5.7	4.6	-1.1	0.13	1.8	3.2	13.7
	20-40	6.2	2.0	1.3	0.1	0.3	59.5	5.7	4.8	-1.0	0.12	1.6	2.8	13.3

CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Iones: Ca⁺⁺ = calcio, Mg⁺⁺ = magnesio, Na⁺ = sodio, K⁺ = potasio; V= Saturación en bases; pH= potencial de hidrógeno; ΔpH= [pH (KCl)-pH (H₂O)], NT= Nitrógeno Total, CO= Carbono Orgánico, MO= Materia Orgánica, C/N= Relación Carbono/Nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

VII.2 Suelo de calidad inherente del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”

Mediante técnicas de prospección edáfica (Porta et al., 2003) y tomando como criterio la misma unidad de suelo, mismas condiciones morfológicas y climáticas, y cercano al suelo con manejo agroecológico (calidad dinámica) se identificó el suelo que soporta vegetación natural (calidad inherente) en las coordenadas 598249 Longitud este y 2119282 Latitud norte, a una altura de 2,854 m s. n. m. Posteriormente, se procedió al descubrimiento del perfil de suelo, al cual se identificó como T11 (Tezokihkall Inherente 1), para su posterior descripción obteniéndose los siguientes resultados:

Relieve

El relieve corresponde a un sistema montañoso, donde el sistema de topoformas es un sistema montañoso con una pendiente aproximada del 17%, lo que corresponde a montaña de gradiente medio (SM) de exposición Norte-Oeste.

Vegetación

La vegetación es un factor muy importante referente a la información del suelo, dado que es el principal aportador de materiales orgánicos, el reciclaje de nutrientes y la hidrología del suelo. En este contexto, la vegetación en este punto corresponde a un bosque secundario con vegetación de pino-encino, donde la influencia humana es escasa y sin presencia de factores nocivos.

Material parental

Respecto a la información general acerca del suelo, observada en campo, se identificó el material parental de tipo ceniza volcánica, donde la roca subyacente corresponde a una roca ígnea ácida (IA) del tipo Riolita (IA4). El material parental a través de un proceso de meteorización química y mecánica a través del tiempo forma suelo de forma residual y edad joven. No se observaron fragmentos gruesos superficiales como piedras, o éstas fueron muy pocas, no se observó la exposición de la roca madre, es decir, afloramientos rocosos, y la profundidad del nivel freático no se alcanzó. Sin embargo, en la fracción arena fue posible identificar partículas de pumita (piedra pómez), la cual es una roca volcánica (vidrio de roca) de textura rugosa altamente vesicular, la cual se forma cuando el magma líquido saturado de gas se enfría rápidamente y se

forman una gran cantidad de poros lo que hace que tenga muy baja densidad. Los espacios porosos pueden ser redondeados, alargados o tubulares, mientras que el material vítreo puede tomar forma de hilos, fibras o tabiques delgados (Mahmut, 2023).

Otros hallazgos del perfil de suelo

El drenaje externo del sitio de muestreo se identificó como drenado, con erosión del tipo hídrica laminar (WS) con grado moderada (M) en un área afectada aproximada al 50%, lo cual evidencia una clara remoción de los horizontes superficiales del suelo en la zona, y, por tanto, las funciones bióticas originales se encuentran afectadas.

Los límites de los horizontes proveen información acerca de los procesos formadores del suelo, sin embargo, estos límites corresponden a zonas de transición y no a líneas puntuales de división (FAO, 2009). Para este perfil de suelo se identificaron dos horizontes orgánicos O1 y O2, tres horizontes del tipo organomineral A (A1, A2 y A3) y cuatro capas de suelo del tipo C (C1, C2, C3 y C4).

La profundidad de cada uno de los horizontes puede observarse en la Imagen 12, donde los horizontes O alcanzan una profundidad de 0 a 5 cm, los horizontes del tipo A van de 0 a 50 cm de profundidad, mientras que las capas de suelo tipo C van de 50 a más de 112 cm de profundidad.

- Los horizontes o capas del tipo O están compuestos básicamente por materiales orgánicos intactos y parcialmente descompuestos como hojas, ramas y musgos que se han acumulado en la superficie del suelo provenientes de la vegetación aérea del bosque de pino-encino.
- Los horizontes de tipo A son horizontes órgano-minerales, los cuales se caracterizan por la acumulación de materia orgánica humificada y mezclada con la fracción mineral.
- Los horizontes o capas de tipo C, han sido afectados por los procesos pedogenéticos de manera mínima y no poseen las propiedades de los horizontes superiores, ya que el material de los horizontes C puede o no ser parecido a aquel que se formó en el solum. Las raíces de las plantas pueden penetrar y alcanzar estos horizontes, proveyendo un medio de crecimiento importante (FAO, 2009).

La descripción completa del perfil de suelo bajo vegetación natural puede observarse en las tablas 10 y 11.

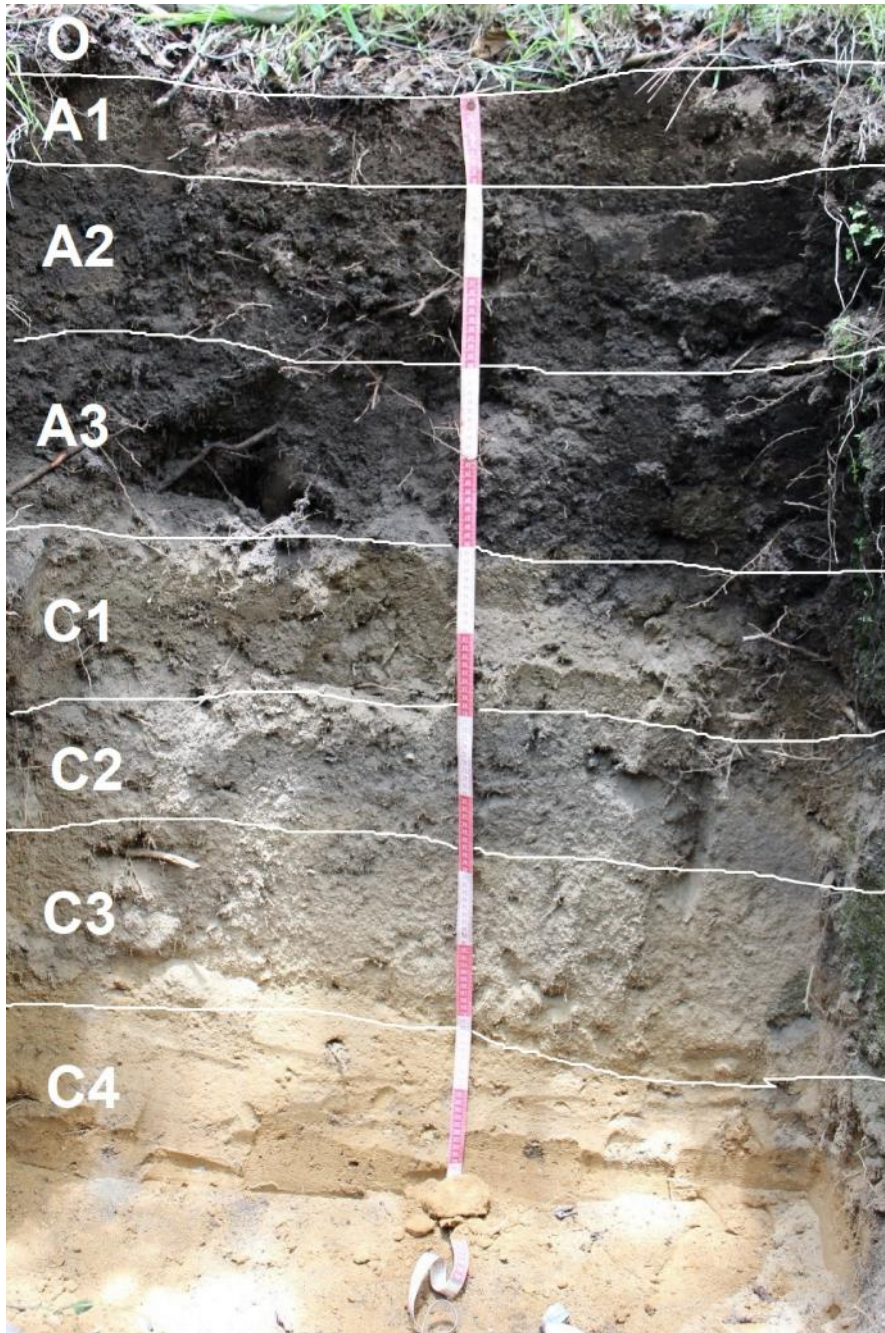


Imagen 12. Perfil de suelo conservado con vegetación natural.

Fuente: Fotografía propia.

O
O1 (5-0 cm)
O2 (2-0)

A1
(0-10 cm)

A2
(10-31 cm)

A3
(31-50 cm)

C1
(50-69 cm)

C2
(69-87 cm)

C3
(87-112 cm)

C4
(112+ cm)

Descripción del Perfil de suelo con vegetación natural

Tabla 10. Descripción del perfil de suelo bajo vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

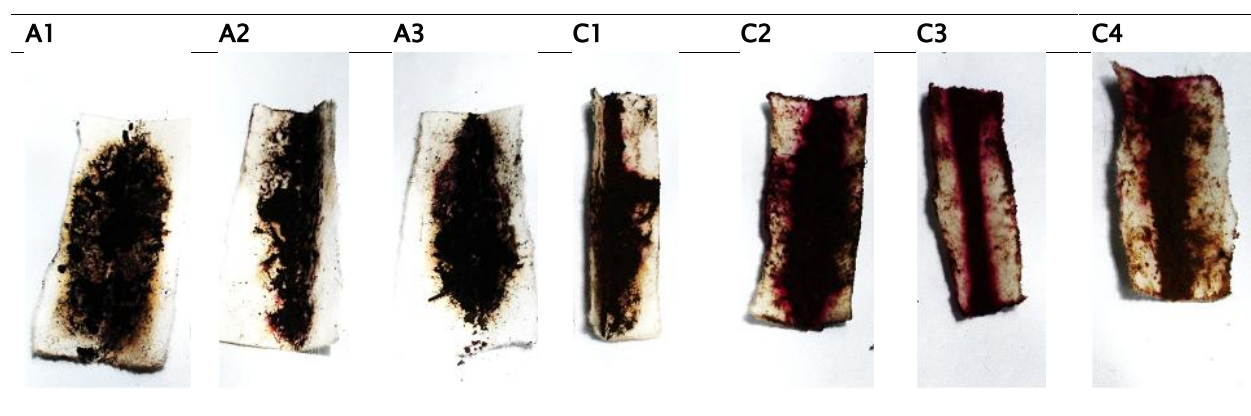
Información acerca del sitio de la muestra		
Clave del Perfil: T11		
Fecha de la observación: 16 de junio de 2022		
Autores de la descripción: Josefina Cervantes Vargas, Miguel Ángel Valera Pérez, Yaselda Chavarín Pineda		
Ubicación: Junta Auxiliar de la Resurrección Municipio de Puebla, Estado de Puebla		
Provincia Fisiográfica: Eje Neovolcánico	Subprovincia Fisiográfica: Lagos y Volcanes de Anáhuac	
Coordenadas UTM: 598249 Longitud este; 2119282 Latitud norte	Altitud: 2,854 m s. n. m.	
Clima: C(w1)(w); Templado subhúmedo con lluvias en verano (% de lluvia invernal menor de 5)		
Precipitación Total Anual: 885 mm	Temperatura Media Anual: 14. 1° C	
Relieve: Montuoso		
Sistema de Topoformas: Montañoso		
Geología: Cuaternario (roca ígnea piroclástica)		
Pendiente: 17 %		
Exposición: Norte–Oeste		
Formación Vegetal: Bosque Secundario / Bosque Perturbado		
Información general acerca del suelo		
Material Parental: Ceniza Volcánica		
Roca Subyacente: Riolita		
Edad: Joven		
Modo de Formación: Residual		
Clase de Pedregosidad: Sin piedras o con muy pocas		
Clase de Afloramientos rocosos: Sin Afloramientos rocosos		
Profundidad del Nivel Freático: No se alcanzó		
Clase de Drenaje Externo: Drenado		
Clase de Erosión: Hídrica laminar	Grado de Erosión: Moderado	Área Erosionada: 50 %
Influencia Humana: Escasa		
Factores Nocivos: Sin Factores Nocivos		

Fuente: Elaboración propia.

Características ándicas

En la Tabla 14 se puede observar los resultados en campo de la prueba de pHNaF desarrollada por Fieldes y Perrott (1996), observándose una coloración roja más intensa en las capas C, lo cual es indicativo de una mayor liberación de iones OH^- , mientras que los iones fluororados correspondientes absorben activamente el aluminio.

Tabla 12. Prueba de Fieldes y Perrot aplicada a los diferentes horizontes del perfil de suelo con vegetación natural, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.



Fuente: Elaboración propia.

En campo se identificaron algunas propiedades físicas relacionadas con las propiedades ándicas de suelos volcánicos, siendo una de ellas la consistencia untuosa o resbalosa del suelo (por altos contenidos de alófono y ferrihidrita), así como horizontes superficiales de color negro, debido a los altos contenidos de humus.

En laboratorio se determinaron algunas propiedades ándicas, siendo estas las siguientes:

- J) Porcentaje de carbono orgánico de 2.3% en promedio, menor al 25% de carbono orgánico por peso, considerado como límite superior por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff–NRCS/USDA, 1999). Los resultados de la caracterización química del suelo pueden ser observados en la Tabla 8.
- J) Densidad aparente promedio de 0.9 kgxdm^{-3} , igual al límite superior establecido en las propiedades ándicas de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff–NRCS/USDA, 1999). Los resultados de las propiedades físicas del suelo pueden ser observadas en la Tabla 6.

Carga variable

Cuando el valor del ΔpH adquiere valores negativos en el suelo domina la carga negativa y es intercambiador catiónico (Jaramillo, 2002), además, al presentar valores de ΔpH donde la magnitud de la diferencia es mayor de -0.5 (Tabla 8) indican que el suelo predominante es de carga variable, situación que presenta el suelo de la zona de estudio

Los suelos de carga variable comprenden un amplio espectro de suelos que, aunque con características físicas, químicas, biológicas, mineralógicas, morfológicas y genéticas diferentes, poseen una característica en común y es que su carga superficial varía ampliamente (en magnitud y signo) en función del pH, fuerza iónica y solución del suelo. En este contexto, suelos tan aparentemente diferentes como los Alfisoles y Ultisoles (contienen arcillas de baja actividad), Andosoles (derivados de cenizas volcánicas), Oxisoles (suelos de los trópicos húmedos fuertemente lavados y lixiviados) y Spodosoles (suelos forestales de regiones frías) se agrupan como suelos de carga variable (Guadalix & Pardo, s/f).

Temperatura

La temperatura promedio mensual y la precipitación total anual fueron determinadas a partir de los datos históricos obtenidos de los registros de las estaciones climatológicas de la zona de estudio (Tabla 10), algunas localizadas en el estado de Tlaxcala y otras de Puebla. Dichas estaciones son administradas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y sus características se describen en la siguiente tabla.

Tabla 13. Estaciones climatológicas de la ladera sur del Parque Nacional La Malinche.

No. Estación	Nombre estación	Coordenadas 14 Q		Organismo operador	Estado	Municipio
		m Este	m Norte			
29161	Acxotla del Monte	588370.14	2127353.49	CONAGUA-DGE	Tlaxcala	Teolocholco
29026	Zitlaltepec	614853.13	2123284.19	CONAGUA-DGE	Tlaxcala	Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos
21136	Acajete	609801.12	2113602	CONAGUA-SMN	Puebla	Acajete
21242	Capulac	598946.38	2111394.5	CONAGUA	Puebla	Puebla

No. Estación	Nombre estación	Coordenadas 14 Q		Organismo operador	Estado	Municipio
		m Este	m Norte			
21148	San Miguel Canoa	596987.85	2115711.03	CONAGUA-DGE	Puebla	Puebla
21065	Puebla	587680.96	2106567.98	CONAGUA-SMN	Puebla	Puebla

Abreviaturas: Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (s/f).

La temperatura promedio mensual de la zona de estudio se determinó en 14.1 °C, como puede observarse en la Imagen 13 de las isotermas de la región. La estimación de este resultado se obtuvo con los registros de los valores de la temperatura media mensual de las estaciones climatológicas de la zona de estudio (Tabla 13), en el periodo de tiempo de 1988 a 2018. Los valores de los registros de temperatura de las estaciones consideradas recibieron un tratamiento de interpolación mediante el método de kriging ordinario, el cual define Porras (2017) como “un método de inferencia espacial, el cual nos permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por la muestra” (p. 2) (Imagen 12).

Precipitación

La precipitación total anual de la zona de estudio corresponde a 885 mm, cuya determinación se realizó igualmente de acuerdo con los registros de la precipitación total anual de las estaciones climatológicas (Tabla 13) de la zona de estudio para posteriormente someterse a un tratamiento de interpolación mediante el método de kriging ordinario y posteriormente representado con el programa QGis 3.28.14-Firenze (Imagen 14).

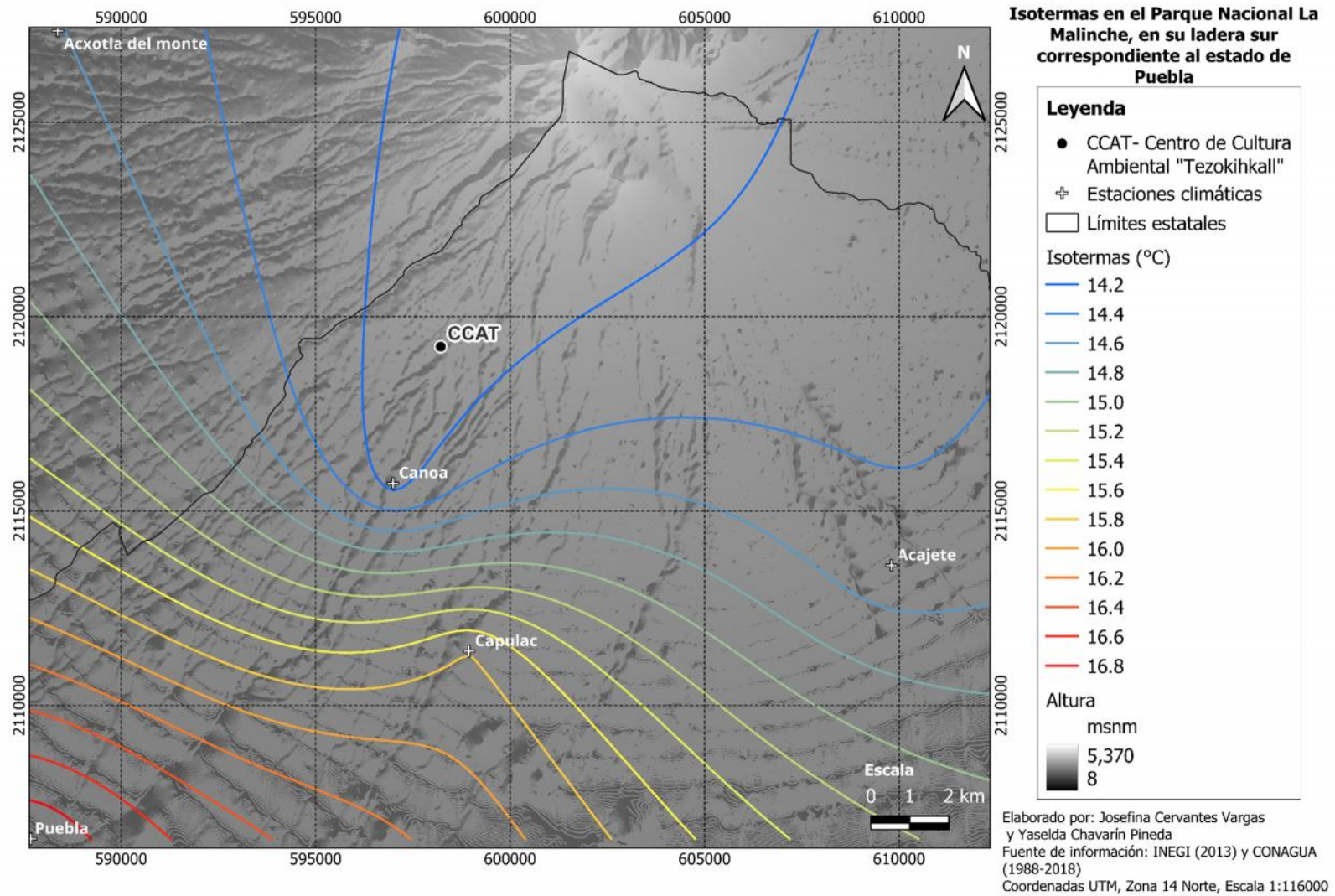


Imagen 13. Distribución de isotermas del Parque Nacional La Malinche, donde se localiza el Centro de Cultura Ambientla “Tezokihkall” (CCAT).

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA.

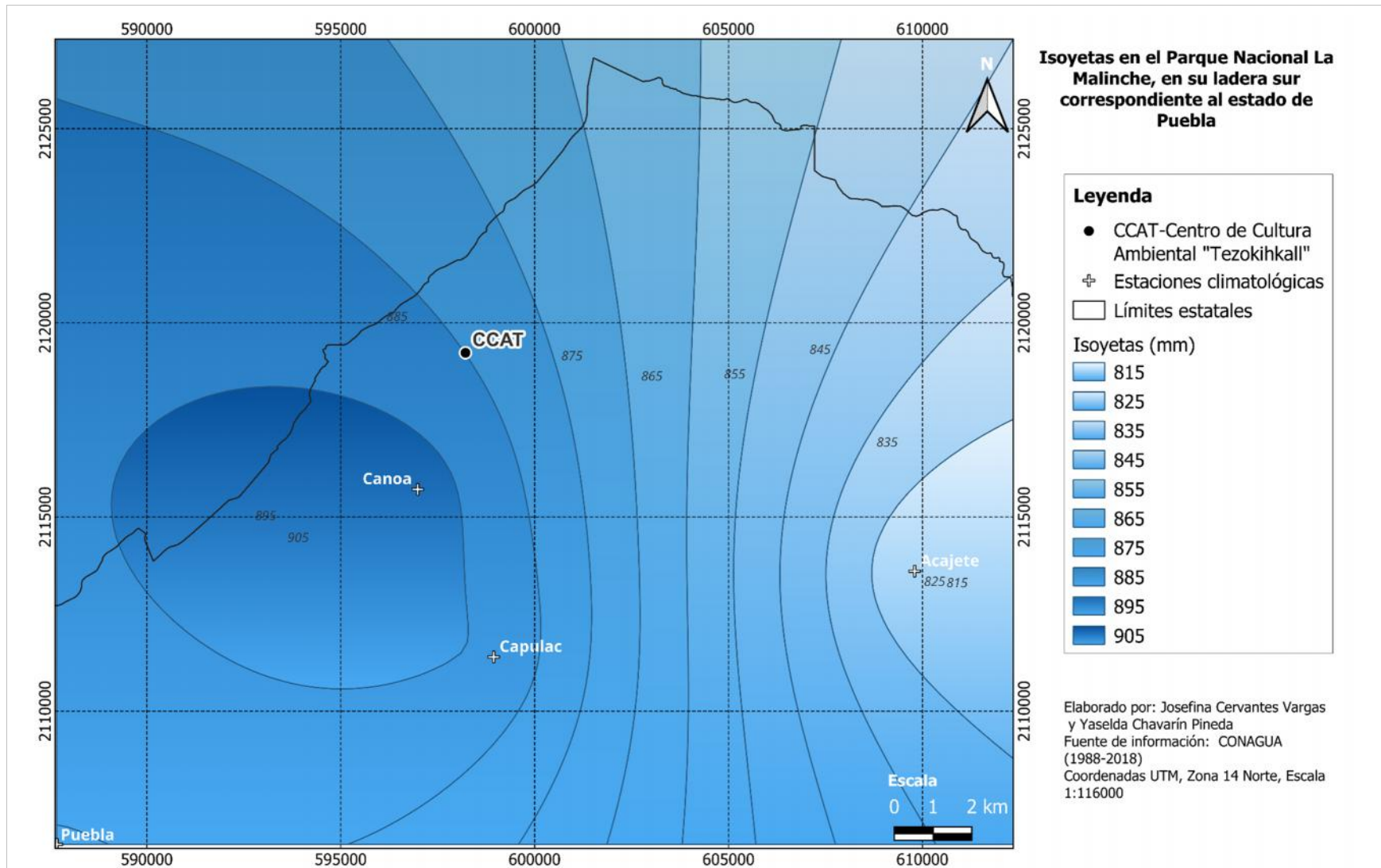


Imagen 14. Distribución de isoyetas del Parque Nacional La Malinche, donde se localiza el Centro de Cultura Ambiental "Tezokihkall" (CCAT).

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (1988-2018).

Régimen de humedad y temperatura del suelo

Régimen de humedad

Dadas que las temperaturas medias del suelo en verano y en invierno difieren en 2.8 °C, lo que es menor a 6 °C a 50 cm de profundidad debajo de la superficie del suelo; la sección de control estará seca, en alguna o en todas partes por 90 días o más acumulativos en años normales, sin embargo, está húmeda, en alguna parte por más de 180 días acumulativos por año o por 90 días o más consecutivos (Imagen 15). Estas características son propias del régimen de humedad Ústico identificado en la zona de estudio.

Régimen de temperatura

En el Centro de Cultura Ambiental la temperatura media anual del suelo se determinó en 15.1°C lo cual es mayor a 15°C y menor a 22°C, además, la temperatura media del suelo en verano y en invierno difieren en 2.8°C lo que es menor a 6°C. De acuerdo con lo anterior, se identifica a la zona de estudio con un régimen de temperatura isotérmico.

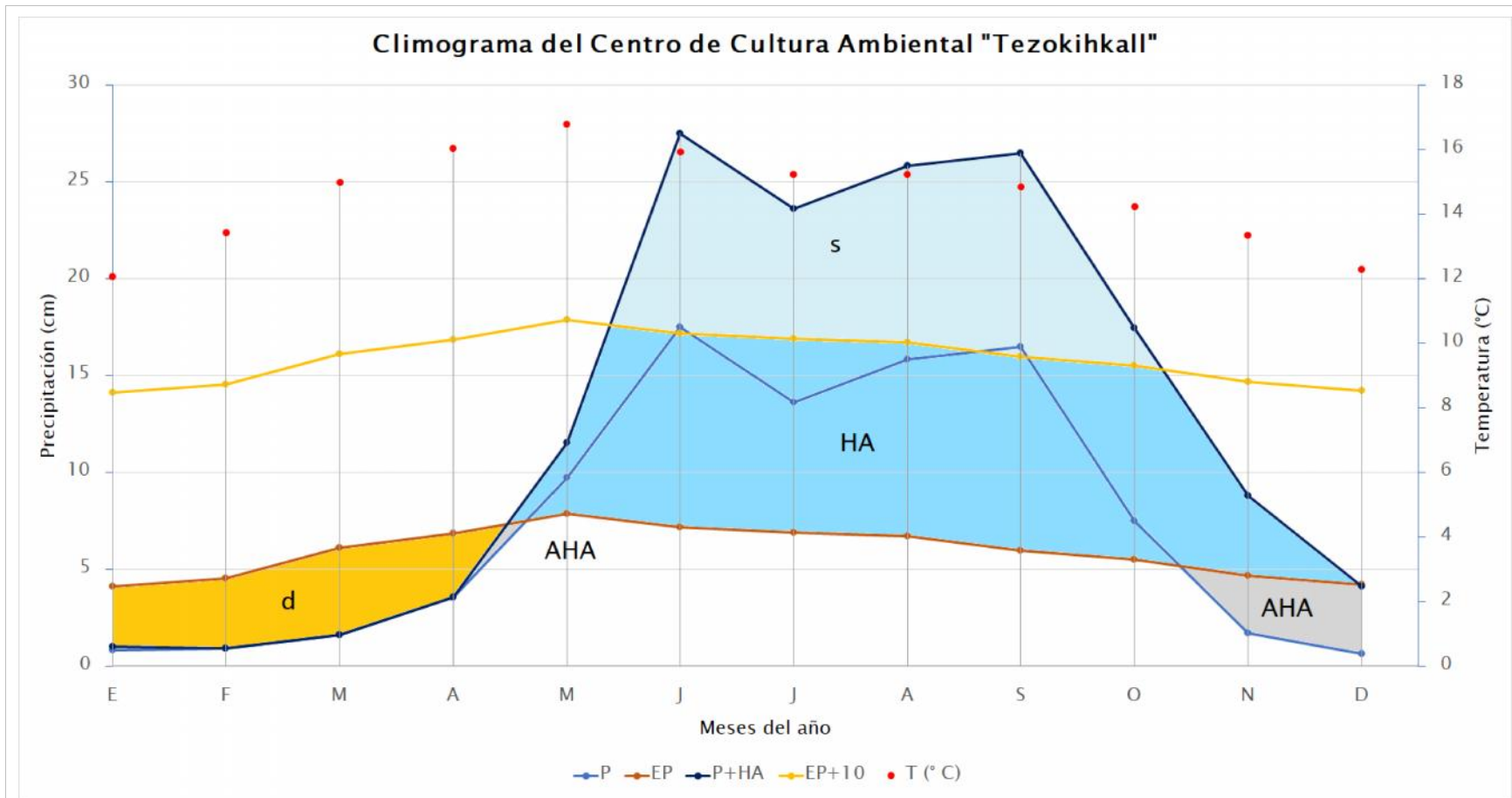
Clima

De acuerdo con la metodología aplicada se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 14) para determinar la fórmula del clima en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkal”, con información del periodo de 1988 a 2018 (CONAGUA, s/f).

Tabla 14. Fórmula del clima calculada en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkal”.

Concepto	Descripción
Categoría de humedad	A: muy húmedo
Régimen de humedad	r: pequeña o nula deficiencia de agua
Categoría de temperatura	B1': semifrío
Régimen de temperatura	a': concentración térmica en el verano <48% a' ≠ B1' (mismo signo y misma letra) concentración térmica más baja en el verano
Fórmula calculada	ArB1'a'
Descripción de la fórmula calculada	Muy húmedo con pequeña o nula deficiencia de agua y semifrío con una concentración más baja de calor en el verano

Fuente: Elaboración propia.



P: Precipitación (cm), T: Temperatura del aire (°C), EP: Evapotranspiración potencial, HA: Humedad almacenada, AHA: Aprovechamiento de HA, s: Demasía de humedad, d: Deficiencia de humedad.

Imagen 15. Climograma del Centro de Cultura Ambiental "Tezokihkall", en el Parque Nacional La Malinche.

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (1988–2018).

De las evidencias anteriores:

- Material parental procedente de ceniza volcánica
- Vegetación natural secundaria de bosque de pino-encino
- Clima semifrío muy húmedo (ArB1 'a')
- Relieve montuoso medio
- Características ándicas
- Suelo de carga variable

Los suelos de la zona de estudio fueron identificados como Andisoles, de acuerdo con Soil Taxonomy (Soil Survey Staff-NRCS/USDA, 1999) y Andosoles en la WRB (FAO, 2008). Este resultado es congruente con la unidad de suelo identificada por Werner (1976), T3 T2 Andosoles vítricos, clasificados de acuerdo con las recomendaciones de la FAO (1968-1970), en el Mapa de suelos de la cuenca alta Puebla-Tlaxcala y sus alrededores.

El estudio se realizó en el Centro de Cultura Ambiental "Tezokihkall" en la ladera sur del Parque Nacional La Malinche (área correspondiente al estado de Puebla), donde las condiciones climáticas definieron el régimen de humedad y temperatura del suelo en Ústico e Isotérmico respectivamente. En función de lo anterior, los suelos son identificados como Ustdands al presentar un régimen de humedad Ústico (Imagen 15).

VII.3 Servicios ecosistémicos del sistema agroecológico

Sistema agroecológico en el sector de referencia

El sistema agroecológico del sector de referencia, establecido en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, consiste en un sistema de terrazas que se encuentra rodeado principalmente de árboles de la región como el pino y encino, mientras que en sus bordos son intercalados árboles frutales de pera (*Pyrus communis*), de origen europeo, y tejocote (*Crataegus mexicana*).

Las zonas cultivables de las terrazas están constituidas principalmente por maíz (*Zea mays*) y haba (*vicia faba*), intercaladas con el reciente cultivo de algunas líneas de maguey manso (*Agave salmiana*), y en algunos casos el maguey manso con el nopal verdura (*Opuntia Spp.*).

Respecto a los cajetes, estos fueron construidos en el perímetro noroeste del sector de referencia y en el último bordo de tejocote de la terraza 5 (Imagen 16). Estos se ubicaron de manera perpendicular a la pendiente del terreno, lo cual ayuda en la recolección del agua de escorrentía superficial y en los sedimentos del suelo.



Imagen 16. Elementos del sistema agroecológico en el Sector de Referencia del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”, Canoa.

Fuente: Fotografía propia.

Dado el antiguo sistema de terrazas y la reciente incorporación del maguey manso (*Agave salmiana*), el sistema agroecológico del sector de referencia quedó establecido como se observa en la Imagen 17 y 18.

El arreglo del sistema agroecológico, donde se estableció el sector de referencia, en un principio obedece a una distribución fruto del conocimiento propio de los campesinos, que fue transmitido por sus antecesores. En una siguiente etapa, la siembra del agave al interior de las terrazas y en los bordos, la separación de siembra entre planta y planta, la orientación perpendicular de las franjas a la pendiente, y la cantidad de plantas se realizó de acuerdo con aportes de la empresa productora de los agaves (Grupo Pulmex), investigadores de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y, principalmente, con aportes de conocimientos ancestrales de los campesinos propietarios del predio.

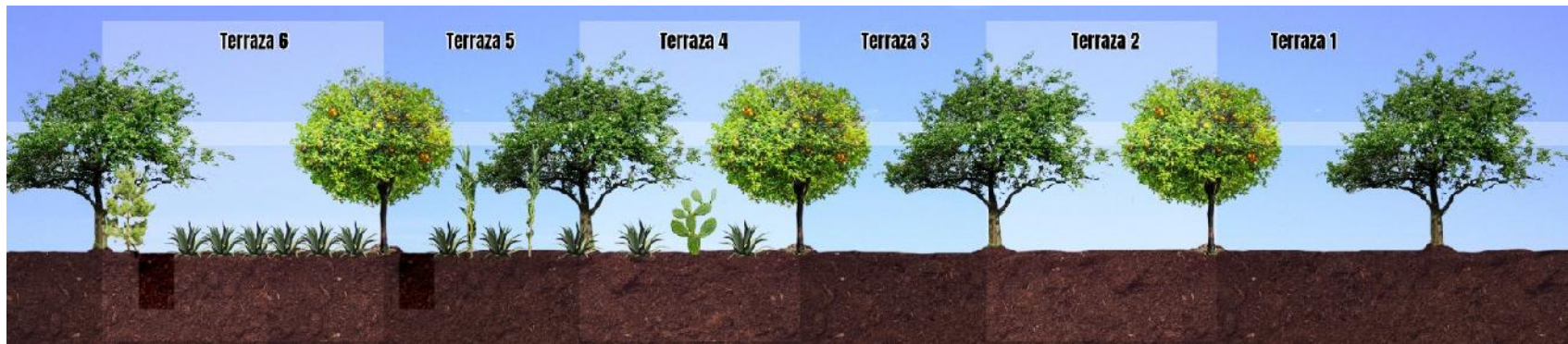
La siembra del maguey manso (*Agave salmiana*) en las terrazas 5, 6 y 7 del sistema agroecológico da origen al restablecimiento del sistema agroecológico “Metepantle”, un sistema agroecológico que considera técnicas agrícolas de uso tradicional originario de la zona de estudio. Este modelo de agroecosistema es aceptado por los campesinos, ya que forma parte de las técnicas agrícolas realizadas en la región por sus ancestros y por tanto forma parte de su cultura, lo cual se ve reflejado en su implementación en otras parcelas del mismo Paraje Huey Tecoch donde anteriormente se desarrollaba agricultura convencional. Respecto a la viabilidad económica de este agroecosistema, se tiene referencia de los ingresos aproximados respecto del maguey y de sus diferentes subproductos, lo cual representa un ingreso para los campesinos (Viniegra González et al., 2019).

De acuerdo con los conceptos anteriormente mencionados de agroecología y agroforestería, el “Metepantle” es un sistema que se enmarca en estos sistemas, dados los conocimientos ancestrales de las comunidades originarias de la región respecto a la implementación de prácticas de agricultura tradicional y la aplicación de los conocimientos científicos de distintas ciencias.



Imagen 17. Plantación del agave salmiana en el sistema de terrazas del sistema agroecológico.

Fuente: Fotografía propia.



T6	T5	T4	T3	T2	T1
Bordo Noreste: árboles de tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>)	Bordo Noreste: árboles de pera (<i>Pyrus communis</i>).	Bordo Noreste: tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>).	Bordo Noreste: árboles de pera (<i>Pyrus communis</i>).	Bordo Noreste: árboles de tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>).	Bordo Noreste: árboles de pera (<i>Pyrus communis</i>).
Bordo Sureste: árboles de la región como pino y encino.	Bordo Sureste: árboles de tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>).	Bordo Sureste: árboles de pera (<i>Pyrus communis</i>).	Bordo Sureste: árboles de tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>).	Bordo Sureste: árboles de pera (<i>Pyrus communis</i>).	Bordo Sureste: árboles de tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>).
Zona cultivable: maguey manso (<i>Agave salmiana</i>)	Zona cultivable: maíz (<i>Zea mays</i>), haba (<i>vicia faba</i>) y maguey manso (<i>Agave salmiana</i>)	Zona cultivable: nopal verdura (<i>Opuntia Spp.</i>) y maguey manso (<i>Agave salmiana</i>).	Zona cultivable: en descanso.	Zona cultivable: en descanso.	Zona cultivable: en descanso.

Imagen 18. Elementos del sistema agroecológico del sector de referencia en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

Fuente: Elaboración propia.

Otros sistemas agroecológicos del Paraje Huey Tecoch

En el mismo paraje Huey Tecoch los integrantes del grupo Tleyolotli cuentan con otros predios en los que tienen establecidos otros agroecosistemas, integrados principalmente por: árboles de la región, árboles frutales, cultivos agrícolas (principalmente de maíz), además del incipiente restablecimiento del maguey manso (*Agave salmiana*).

En estos agroecosistemas los campesinos propietarios de las parcelas realizan prácticas agroecológicas y de uso tradicional como el cultivo de forma perpendicular a la pendiente, el policultivo, la construcción de zanjas de infiltración, entre otras.

Etapas 1: Identificación de servicios ecosistémicos, en función de las prácticas de manejo consideradas en el sistema agroecológico

En términos generales, se ha identificado que las diferentes prácticas agrícolas pueden afectar en mayor o menor medida tanto la calidad como la cantidad de los múltiples servicios ecosistémicos que prestan otros sistemas no agrícolas (Dale & Polasky, 2007). En este contexto, la identificación de las prácticas de manejo que se realizan en el sistema agroecológico, y aquellas que se podrían implementar para incrementar la calidad y cantidad de servicios ecosistémicos, resulta de gran relevancia.

De acuerdo con información del propietario de la parcela, así como de los campesinos del Grupo Tleyolotli, se pudieron identificar las prácticas realizadas en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch, siendo estas las siguientes:

-)] **Labranza regulada o reducida**, es considerada parte de la labranza de conservación en la que el suelo se labra con menos operaciones antes de la siembra, que en la agricultura convencional (Paxton & Levergne, 1991). Respecto a esta práctica los campesinos refieren que utilizan el tractor solo en escasas ocasiones cuando se requiere el volcado del suelo para iniciar una nueva siembra, además de limitarse a zonas con el espacio necesario para la entrada de esta máquina.
-)] **Arreglos espaciales y temporales**, donde la distribución espacial de los cultivos considera cultivo en franjas, cultivo en hileras mixtas, cultivo intercalado y cultivo de cobertura, de acuerdo con como lo establece Restrepo (2000). Específicamente el sistema agroecológico

establecido en este proyecto de investigación considera un sistema de cobertura con árboles de la región, árboles frutales y maguey, así como de cultivo intercalado.

Los arreglos temporales son referidos a las rotaciones secuenciales de los cultivos, los cuales incrementan rendimientos y reducen requerimientos de energía (Altieri, 1995). La rotación de cultivos, así como los periodos de descanso es una de las actividades desarrolladas por los campesinos del Grupo Tleyolotli, donde se rotan cultivos de maíz (*Zea mays*), haba (*Vicia faba*) e incluso flores como el cempasuchil (*Tagetes erecta*) [del náhuatl Cempohualxochitl que significa 'veinte flores'] en la temporada de la celebración de los fieles difuntos, una tradición muy arraigada de las comunidades originarias de la zona.

- J) **Manejo de arvenses**, considerado como la selección de la vegetación de cobertura para mantener el recurso suelo (Banco & Leyva, 2007). En los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch la vegetación está integrada, en algunos casos en los bordos y en otros en los límites parcelarios, por arboles de la región y por árboles frutales como el árbol de pera (*Pyrus communis*), y tejocote (*Crataegus mexicana*), así como también por maguey manso (*Agave salmiana*). En las zonas cultivables por lo general se siembra maíz (*Zea mays*), haba (*Vicia faba*), nopal verdura (*Opuntia Spp.*) e incluso también maguey manso (*Agave salmiana*).
- J) **Uso y conservación de semillas** esta actividad es desarrollada por los campesinos de la región, quienes indican que se inicia con la recogida de la cosecha del año anterior, en la que se buscan las mejores mazorcas en cuanto a tamaño, forma, color, y otras características. Estas mazorcas, son separadas del maíz para ser desgranadas con todo cuidado, de abajo hacia arriba, para no eliminar la punta de la semilla ya que de este modo no serviría como semilla. De acuerdo con la cosmovisión de los campesinos de la región, este proceso de selección de semillas termina con la bendición de estas, donde el 2 de febrero son llevadas a la iglesia de Canoa, en conjunto con otros elementos como el romero y el niño Dios para su bendición (Licona & Pérez, 2020).

J) **Manejo de suelos** considera prácticas de control de la erosión, infiltración y recarga de los mantos acuíferos, control de plagas y mejora de la fertilidad del suelo (SADER, 2023). Esta práctica es considerada dado que los campesinos del paraje Huey Tecoch realizan la construcción de zanjas de infiltración y almacenamiento de agua en el perímetro de las parcelas, aunado que se siembra de forma perpendicular a la pendiente y en sistemas de policultivo.

En función de las prácticas desarrolladas es como se identificaron los servicios ecosistémicos prestados por los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch, de acuerdo con la relación obtenida mediante los estudios desarrollados por Nieto (2017). Dicha identificación puede observarse en la Tabla 15.

Tabla 15. Identificación de servicios ecosistémicos proporcionados en función de las prácticas realizadas en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch.

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas desarrolladas en el SA				
		Labranza regulada / arado adyacente / desmalezado manual	Arreglos espaciales y temporales	Manejo de arvenses	Uso y conservación de semillas	Manejo del suelo
Culturales	Turismo y recreación		X			
	Conexión espiritual		X			
	Valor estético		X			
	Creación y mejora de redes sociales		X			
	Pasatiempo		X			
	Valores paisajísticos		X			
	Valor patrimonial y asociación de conocimiento ecológico cultural		X			
	Conocimiento local				X	
	Regulación del flujo de agua	X				
Regulación	Retención de nutrientes	X				X
	Control biológico	X	X	X		X
	Regulación de la erosión	X	X	X		
	Control de maleza	X	X	X		
	Mantenimiento de la estructura del suelo	X	X			
	Reducción de gases de efecto invernadero	X				X
	Regulación del clima	X				
	Captura y almacenamiento	X		X		X

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas desarrolladas en el SA				
		Labranza regulada / arado adyacente / desmalezado manual	Arreglos espaciales y temporales	Manejo de arvenses	Uso y conservación de semillas	Manejo del suelo
	de carbono					
	Retención del suelo	X				X
	Capacidad de captación y retención de agua		X			
	Fijación de nitrógeno		X			
	Formación de suelo		X			
	Calidad de agua		X			
	Resiliencia de pesticidas					
	Respiración del suelo					
	Absorción de metano		X			
	Amortiguamiento del clima		X			
	Calidad del suelo		X			
	Control de inundaciones		X			
	Fertilidad del suelo		X			
	Liberación de oxígeno		X			
	Mitigación de riesgos naturales					
	Polinización		X			
	Protección del suelo		X			
	Control de sedimentación		X		X	
	Infiltración de agua				X	
	Conservación de biodiversidad	X	X		X	
Soporte	Paisaje	X				X
	Hábitat para vida silvestre	X	X			X
	Mantenimiento de		X			

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas desarrolladas en el SA				
		Labranza regulada / arado adyacente / desmalezado manual	Arreglos espaciales y temporales	Manejo de arvenses	Uso y conservación de semillas	Manejo del suelo
	variedades locales (diversidad genética)					
	Producción de alimentos	X	X	X	X	
Suministro	Provisión de forraje	X	X		X	
	Producción de madera		X			
	Aumento de la productividad		X			
	Provisión de plantas medicinales		X			

Fuente: Elaboración propia con información de Nieto (2017).

Etapa 2: Identificación de servicios ecosistémicos en el sistema agroecológico

La identificación de los servicios ecosistémicos, de acuerdo con su categoría de clasificación (Tabla 16), fueron identificados en función de los servicios ecosistémicos asociados a las prácticas de manejo observadas en la Tabla 15, considerando al menos un servicio ecosistémico asociado.

Tabla 16. Identificación de servicios ecosistémicos, de acuerdo con su clasificación, en el Paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Categoría de servicios ecosistémicos	Servicios ecosistémicos
Culturales	Turismo y recreación Educación ambiental e investigación científica Conexión espiritual Valor estético Creación y mejora de redes sociales Pasatiempo Valores paisajísticos Valor patrimonial y asociación de conocimiento ecológico cultural Conocimiento local
Regulación	Regulación del flujo de agua Retención de nutrientes Control biológico Regulación de la erosión Control de maleza Mantenimiento de la estructura del suelo Reducción de gases de efecto invernadero Regulación del clima Captura y almacenamiento de carbono Retención del suelo Capacidad de captación y retención de agua Fijación de nitrógeno Formación de suelo Calidad de agua Absorción de metano Amortiguamiento del clima Calidad del suelo Control de inundaciones Fertilidad del suelo Liberación de oxígeno Polinización Protección del suelo Control de sedimentación

Categoría de servicios ecosistémicos	Servicios ecosistémicos
	Infiltración de agua
Soporte	Conservación de biodiversidad Paisaje Hábitat para vida silvestre Mantenimiento de variedades locales (diversidad genética)
Suministro	Producción de alimentos Provisión de forraje Producción de madera Aumento de la productividad Provisión de plantas medicinales

Fuente: Elaboración propia con información de Nieto (2017).

Prácticas de manejo que potencialmente se podrían implementar y los servicios ecosistémicos asociados.

Como se mencionó en el punto anterior las prácticas en los agroecosistemas pueden afectar la calidad y cantidad de los servicios ecosistémicos prestados, por lo cual se identificaron algunas prácticas adicionales a las mencionadas, que potencialmente podrían ser implementadas, y por tanto, impacten de manera positiva en la calidad y cantidad de servicios ecosistémicos en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch. Las prácticas mencionadas son 1) la fertilización orgánica / compostaje / reducción de fertilizantes y pesticidas, y 2) el manejo de plagas y enfermedades.

A partir de la aplicación de estas potenciales prácticas, se identificaron los servicios ecosistémicos en los que se impactaría de manera positiva incrementando o reforzando los servicios ecosistémicos de los sistemas agroecológicos del paraje Huey Tecoch.

Tabla 17. Provisión de servicios ecosistémicos por potenciales prácticas implementadas en los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch, en el Parque Nacional La Malinche.

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas potenciales en agroecosistemas	
		Fertilización orgánica / compostaje / reducción de fertilizantes y pesticidas	Manejo de plagas y enfermedades
Culturales	Turismo y recreación	X	
	Educación ambiental e investigación científica	X	
	Conexión espiritual		

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas potenciales en agroecosistemas	
		Fertilización orgánica / compostaje / reducción de fertilizantes y pesticidas	Manejo de plagas y enfermedades
	Valor estético		
	Creación y mejora de redes sociales		
	Pasatiempo		
	Valores paisajísticos		
	Valor patrimonial y asociación de conocimiento ecológico cultural		
	Conocimiento local		
Regulación	Regulación del flujo de agua	X	
	Retención de nutrientes	X	
	Control biológico	X	X
	Regulación de la erosión	X	
	Control de maleza	X	
	Mantenimiento de la estructura del suelo	X	
	Reducción de gases de efecto invernadero	X	
	Regulación del clima	X	
	Captura y almacenamiento de carbono	X	
	Retención del suelo		
	Capacidad de captación y retención de agua	X	
	Fijación de nitrógeno	X	
	Formación de suelo	X	
	Calidad de agua	X	
	Resiliencia de pesticidas	X	
	Respiración del suelo	X	
	Absorción de metano		
	Amortiguamiento del clima		
	Calidad del suelo		
	Control de inundaciones		
	Fertilidad del suelo		
	Liberación de oxígeno		
	Mitigación de riesgos naturales		
	Polinización		
	Protección del suelo		
	Control de sedimentación		
	Infiltración de agua		
Soporte	Conservación de biodiversidad	X	
	Paisaje		

Categoría	Servicios ecosistémicos	Prácticas potenciales en agroecosistemas	
		Fertilización orgánica / compostaje / reducción de fertilizantes y pesticidas	Manejo de plagas y enfermedades
Suministro	Hábitat para vida silvestre	X	
	Mantenimiento de variedades locales (diversidad genética)		
	Producción de alimentos	X	
	Provisión de forraje		
	Producción de madera	X	
	Aumento de la productividad		
	Provisión de plantas medicinales		

Fuente: Elaboración propia con información de Nieto (2017).

Como pudo observarse en la Tabla 17, los agroecosistemas del paraje Huey Tecoch establecidos en el Parque Nacional La Malinche proporcionan servicios ecosistémicos en las cuatro categorías de la clasificación (culturales, de regulación, de soporte y de suministro). Lo anterior, en función de las prácticas de manejo desarrolladas, las cuales al incrementarse aumenta el número de servicios ecosistémicos proporcionados y fortalecerán algunos otros ya proporcionados.

Los servicios ecosistémicos identificados asociados al suelo, utilizando la metodología descrita, son los de retención de nutrientes (fertilidad del suelo), control biológico, retención del suelo (prevención de la erosión), reducción de gases de efecto invernadero, captura y almacenamiento de carbono, paisaje y hábitat para la vida silvestre; observándose que son algunos de los más importantes y que requieren ser evaluados.

VII.4 Almacenamiento de carbono

Las actividades humanas, como la agricultura, inciden de manera importante en la dinámica, la química y el balance del COS, de ahí la importancia de su determinación en diferentes sistemas que permitan identificar prácticas que contribuyen a su almacenamiento (Porta et al., 2003).

Una vez aplicada la metodología descrita para la estimación del COS a una profundidad de 30 cm, se pudieron encontrar resultados (Tabla 18) que varían en un rango de 6.0 a 9.7 kg/m² en el sistema de terrazas. La media de las reservas de COS estimadas en el mundo, a 30 cm de profundidad, para andosoles vítricos es reportada en 8.2 kg/m² (Batjes, 1996), valor que coincide con el rango de resultados obtenido en la presente investigación.

Tabla 18. COS almacenado en el sistema de terrazas.

Suelo sistema de terrazas	COS almacenado (kg/m ² , a 0.3 m de profundidad)
T1	9.6
T2	9.0
T3	7.7
T4	9.7
T5	6.4
T6	6.0
Rango	6.0–9.7

Fuente: Elaboración propia.

Se desarrolló una prueba de t de una muestra para probar si la media de la población de COS en el sistema agroecológico (para las terrazas 1 a 5) es igual al valor de COS de la capa C1 (2.8 kg/m²) del perfil de suelo conservado, dado que es la capa de suelo en la que actualmente se encuentran trabajando en el sistema agroecológico. Para esta prueba se consideró un nivel de significancia de 0.05 ($\alpha=0.05$) donde:

Hipótesis nula $H_0 \mu=2.8$

Hipótesis alterna $H_1 \mu \neq 2.8$

Tabla 19. Prueba de t para COS, del sistema agroecológico y la capa C1 del perfil de suelo conservado.

Variable	N	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media	IC de 95% para μ		Valor T	Valor p
COS20	23	6.463	2.172	0.453	5.524	7.402	8.09	0.000

μ : media de población de COS
IC: intervalos de confianza

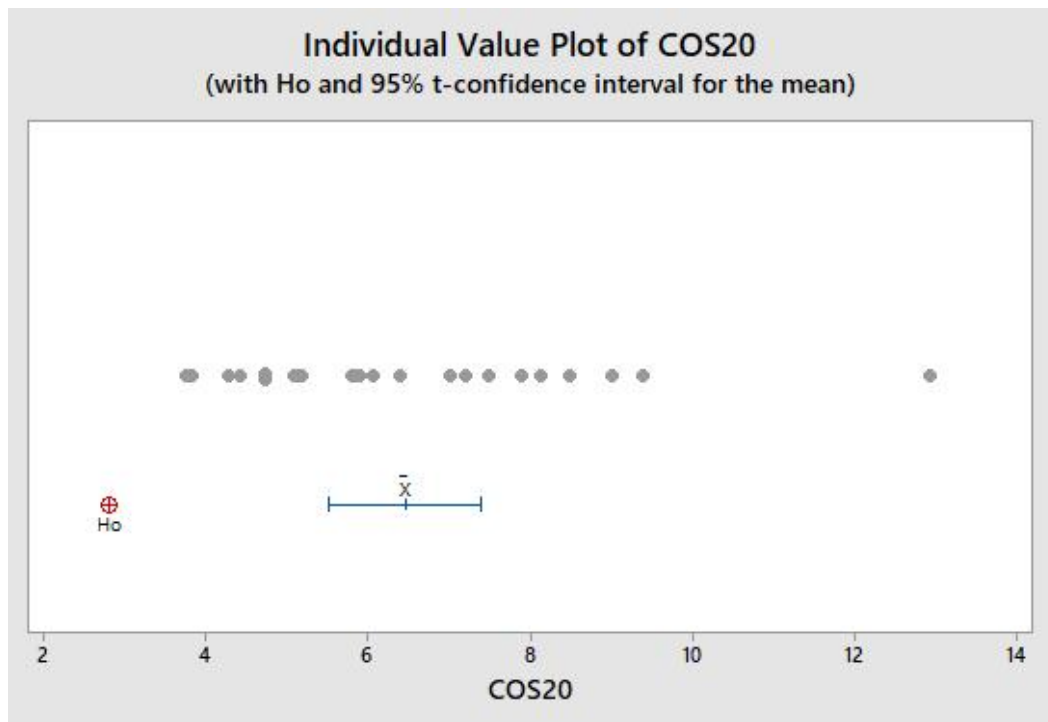


Imagen 19. Gráfica de prueba de t para COS, del sistema agroecológico y la capa C1 del perfil de suelo conservado

Fuente: Elaboración propia.

En estos resultados, la hipótesis nula indica que el COS medio almacenado en el sistema agroecológico es igual a 2.8 kg/m². Sin embargo, puesto que el valor de p es 0.000, menor que el nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el COS medio almacenado en el sistema agroecológico es distinto a 2.8 kg/m² (Tabla 19 e Imagen 19).

Los resultados anteriores demuestran la importancia del manejo adecuado de los suelos, donde incluso puede ser superada la cantidad de carbono almacenado de forma natural.

VII.5 Erosión

De acuerdo con la metodología descrita en los párrafos anteriores se procedió a identificar a los indicadores de suelo asociados a propiedades inherentes o invariantes del suelo, que cambia muy poco o nada con respecto al manejo de este. Ejemplos de estas propiedades son la textura del suelo, el tipo de arcilla, la profundidad del lecho rocoso y la clase de drenaje (USDA-NRCS, 2015). Los indicadores que permitieron la identificación del horizonte en el que actualmente se encuentran trabajando en el sistema de terrazas fueron el color y la clase textural.

En el sistema de terrazas, de la terraza 1 (T1) a la terraza 5 (T5), el color de la capa en seco es de 10YR 5/3 (marrón), mientras que en húmedo se identificó como 10YR 3/3 (marrón oscuro), el cual corresponde al color de la capa C1 del perfil de suelo bajo vegetación natural. La terraza 6 (T6) presentó un color en seco de 10YR 6/3 (marrón pálido), mientras que en húmedo el color fue 10YR 5/3(marrón); color que corresponde al de la capa C2 del perfil de suelo.

Respecto a la clase textural, se reconoció que en el sistema de terrazas se tiene que para la terraza 1 a 5, la clase textural arenosa, correspondiente a la capa de suelo C1 con la misma clase textural; mientras que para la terraza 6 se identificó una clase textural arenoso-arcilloso, lo cual corresponde a la capa C2 del perfil de suelo conservado.

Una vez identificadas las capas de suelo en las que se trabaja en el sistema de terrazas, y en comparación con el espesor del perfil de suelo conservado se identificó la altura de la pérdida de suelo, siendo esta de 50 cm para las terrazas de la 1 a la 5 y de 69 cm para la terraza 6 (Imagen 20).

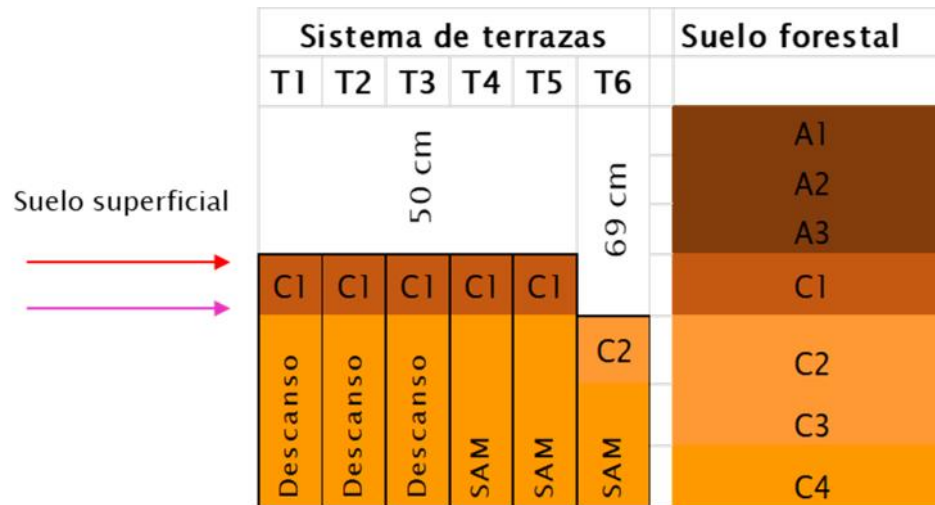


Imagen 20. Identificación de la altura de pérdida de suelos, en el sistema de terrazas, respecto al suelo conservado bajo vegetación natural.

Con la altura del suelo erosionado y la densidad aparente de cada horizonte y capa de suelo, se pudo determinar la masa de suelo a esa profundidad en el suelo conservado, encontrándose para una altura de 50 cm una masa de 3,116.5 t/ha; mientras que para una altura de 69 cm se determinó una masa de 4,944.0 t/ha (Tabla 20).

Tabla 20. Masa de suelo, para cada horizonte del perfil de suelo conservado.

Horizonte	Profundidad cm	Densidad aparente g/cm ³	Masa de suelo t/ha	Masa de suelo acumulada t/ha
A1	0-10	0.9	896.2	896.2
A2	10-31	0.6	1,168.4	2,064.6
A3	31-50	0.6	1,051.9	3,116.5
C1	50-69	1.0	1,827.4	4,944.0
C2	69-87	1.1	1,909.4	6,853.4
C3	87-112	1.1	2,831.3	9,684.7
C4	112+	1.1	ND	ND

Fuente: Elaboración propia. ND: No determinado.

La determinación de la pérdida de suelo para el sistema de terrazas completo se determinó considerando la masa de suelo correspondiente a la altura del suelo conservado con respecto a la superficie de cada una de las terrazas, encontrándose una pérdida total de 2,639.4 t para las 0.8 ha que mide el sistema de terrazas (Tabla 21).

Tabla 21. Pérdida de suelo total y para cada una de las terrazas del sistema.

Terraza	Superficie sistema de terrazas ha	Pérdida de suelo t
T1	0.14	448.8
T2	0.14	448.8
T3	0.14	448.8
T4	0.14	448.8
T5	0.14	448.8
T6	0.08	395.5
Total		2,639.4

Tomando en consideración lo indicado por el propietario del sistema de terrazas respecto a que el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola se realizó hace 40 años, y haciendo el ajuste a una superficie de una hectárea, fue posible determinar la pérdida de suelo por año, encontrándose que es de 82.48 t/ha año.

Tabla 22. Estimación de la erosión potencial de suelo en el Sistema Agroecológico del Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

Factor	Valor considerado	Criterio
R = factor de erosividad de la lluvia (MJ. mm/ha h)	$R=1.9967*P+0.003270*P^2$ (Región 8)	P= 900 mm
K = factor de erodabilidad del suelo (t h/ MJ mm)	K=0.026	Andosol de textura gruesa
LS = factor topográfico longitud-pendiente	L=2.14; S=2.3	Pendiente 17 %
C = factor de vegetación y cultivo	C=0.75	Agricultura de temporal
P = factor de prácticas conservación	P=0.2	Sistema de terrazas, pendiente 17 %
A = tasa de erosión anual (t/ha año)	85.71	

Fuente: Elaboración propia.

Dado que no se tiene referencia de la estimación de la pérdida de suelo a través del modelo de calidad de suelo se realizó la determinación de la erosión potencial a través del modelo USLE, cuyos resultados son de 85.7 t/ha año (Tabla 22), una vez sustituidos los diferentes factores que

integran la ecuación, los cuales son congruentes con los resultados determinados a través del modelo de calidad de suelo.

De acuerdo con la clasificación realizada por Montes-León y colaboradores (2011), en el Mapa nacional de erosión potencial, tanto los valores de erosión obtenidos a través del modelo de calidad de suelo como los obtenidos de erosión potencial por el método USLE, se clasifican dentro de la categoría de erosión media. Esta categoría de clasificación en la zona es acorde al grado de erosión reportado por INEGI (2014) en el Conjunto de datos de erosión del suelo, clasificando esta zona como moderada.

VII.6 Conservación de la fertilidad del suelo

Al evaluar cómo las diferentes técnicas agrícolas de uso tradicional, como los sistemas agroecológicos, pueden coadyuvar a mantener la fertilidad del suelo, se realizó una comparación estadística entre las propiedades indicadoras de fertilidad del suelo de 24 muestras del SA y 13 muestras de suelos de uso agrícola (Imagen 21) manejados de manera convencional, en la misma unidad de suelo del paraje Huey Tecoch (Tabla 23).

Las propiedades indicadoras de la fertilidad tomadas en consideración son las siguientes:

- % Materia orgánica
- % Carbón orgánico
- pH del suelo
- % Nitrógeno
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)
- % Saturación de bases
- Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio intercambiables

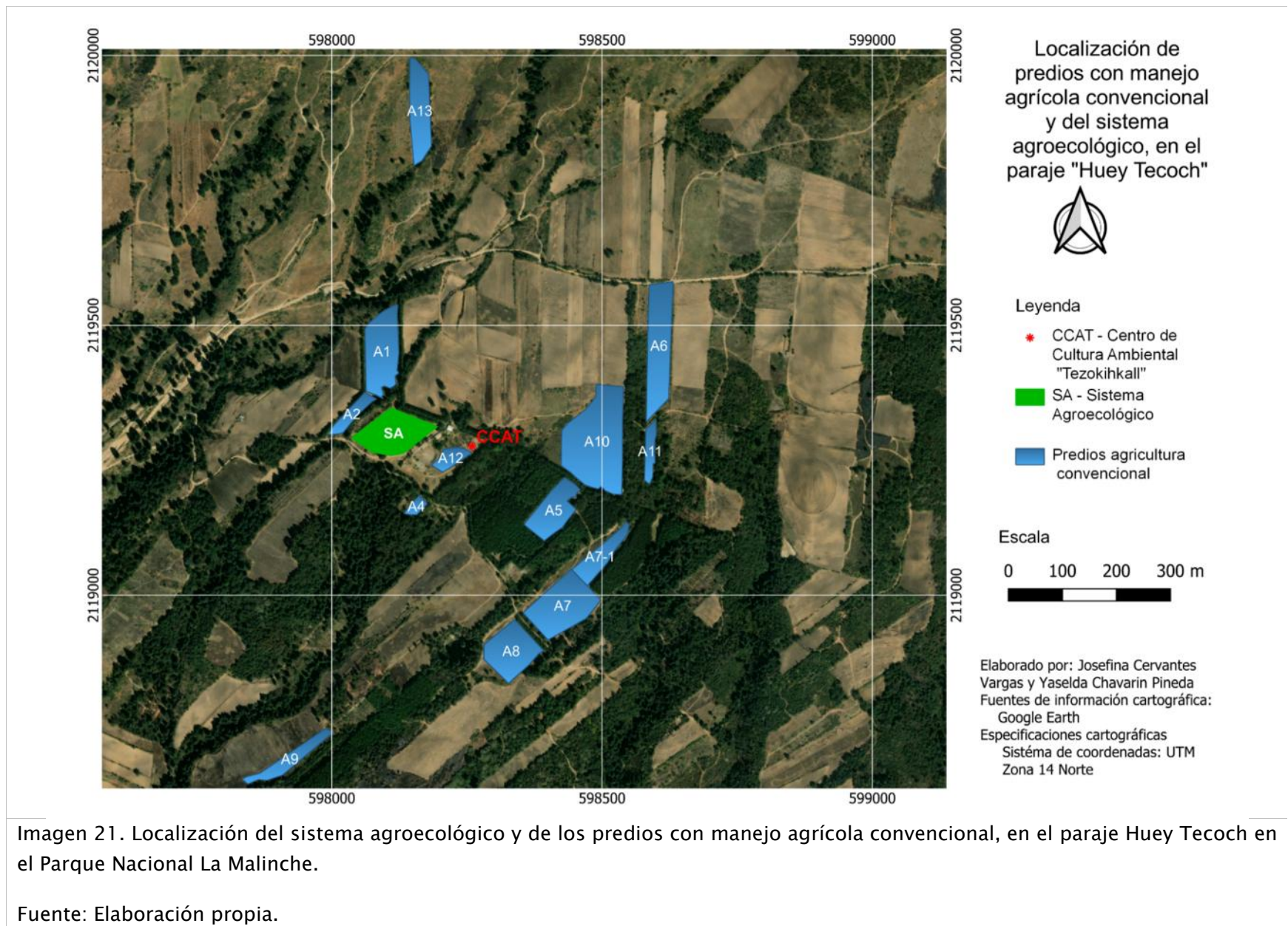


Imagen 21. Localización del sistema agroecológico y de los predios con manejo agrícola convencional, en el paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Caracterización química de suelos de agricultura convencional, en el paraje Huey Tecoch en el Parque Nacional La Malinche.

Muestra	% MO	% Carbono	% Nitrógeno	pH H ₂ O	CIC Cmol(+)/kg	Bases intercambiables meq/100g				% Saturación en bases
						[Ca] ⁺⁺	[Na] ⁺	[Mg] ⁺⁺	[K] ⁺	
A1	3.4	1.96	0.09	5.1	12.1	1.56	0.28	0.3	0.19	19.26
A2	5.9	3.43	0.22	5.1	8	4.92	0.46	0.74	0.37	81.13
A4	5.3	3.05	0.23	5.3	8.9	2.48	0.48	0.42	0.35	41.91
A5	4.1	2.38	0.15	4.8	7.3	2.94	0.23	0.47	0.22	52.88
A6	3.8	2.2	0.09	5.9	4	2.95	0.36	0.46	0.29	101.5
A7	3.6	2.09	0.13	5	5.3	2.95	0.46	0.49	0.39	80.94
A71	3.3	1.9	0.06	5	9.7	3.75	0.42	0.83	0.47	56.39
A8	3.8	2.2	0.22	4.8	22.6	2.8	0.72	0.38	0.27	18.45
A9	4.1	2.4	0.13	4.4	4.8	1.76	0.66	0.25	0.2	59.79
A10	7.6	4.4	0.25	4.6	13.1	2.78	0.98	0.6	0.42	36.49
A11	3.3	1.9	0.09	4.9	10.5	2.81	0.55	0.58	0.28	40.19
A12	4.3	2.48	0.24	5.2	20.3	3.12	0.38	0.48	0.23	20.74
A13	7.6	4.4	0.26	5.1	39.9	4.9	0.43	0.83	0.26	16.09

CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Iones: Ca⁺⁺ = calcio, Mg⁺⁺ = magnesio, Na⁺ = sodio, K⁺ = potasio; pH= potencial de hidrógeno; MO= Materia Orgánica.

Fuente: (Coyotl, 2015)

VII.6.1 Análisis estadístico

Dado que el objetivo es identificar si existe diferencia significativa entre las variables de fertilidad respecto al tipo de manejo, se consideró el desarrollo del modelo MANOVA de un factor (tipo de manejo del suelo) de dos niveles (suelos bajo manejo de sistema agroecológico “Metepantle” y suelos con manejo de agricultura convencional).

Las variables de fertilidad o variables respuesta corresponden a las propiedades del suelo descritas en párrafos anteriores, siendo estas: % Carbón orgánico (CO), pH del suelo en agua (pH), % Nitrógeno total (NT), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), % Saturación de bases (PSB) y bases intercambiables [Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio(K)].

La primera etapa para el desarrollo del modelo de MANOVA, corresponde a la verificación del cumplimiento de los diferentes supuestos estadísticos subyacentes a las variables dependientes de tipo numéricas y continuas. Los supuestos considerados para el cumplimiento de dichas variables fueron: normalidad, homocedasticidad, linealidad, ausencia de autocorrelación o correlación serial y ausencia de multicolinealidad (Pérez, 2004).

Con el objetivo de determinar si existe alguna diferencia en las variables de fertilidad, con respecto al manejo que se tiene en un suelo con manejo de agricultura convencional y un suelo manejado bajo un sistema agroecológico, fue necesario definir las siguientes hipótesis:

H_0 : No existe diferencia significativa en las variables de fertilidad del suelo con respecto a los dos tipos de manejo (agroecológico y agricultura convencional).

H_1 : Existe diferencia significativa en las variables de fertilidad del suelo con respecto a los dos tipos de manejo (agroecológico y agricultura convencional).

Una vez planteada H_0 y H_1 , se fijó un nivel de significación alpha igual a 0.05, obteniendo los resultados que se pueden observar en la Tabla 24.

Tabla 24. MANOVA de un factor de dos niveles: SA y AGR, para el SE de fertilidad del suelo.

Criterio	Prueba estadística	Estadístico F	GL Numerador	GL Denominador	Valor p
Wilks'	0.08026	29.794	10	26	0.000
Lawley-Hotelling	11.45925	29.794	10	26	0.000
Pillai's	0.91974	29.794	10	26	0.000
Roy's	11.45925				

GL=Grados de Libertad; Valores: $s=1$, $m=3.5$ y $n=6.5$

En la Tabla 24 se muestra el resultado de tres estadísticos de pruebas (Wilks, Lawley-Hotelling y Pillai) para probar la hipótesis nula (H_0) contra la hipótesis alterna (H_1). Dado los resultados de la Tabla 24 de datos, se obtuvo un valor de $p = 0.000$ (en cada uno de los tres criterios), que es menor que el alpha prefijado, de manera que se rechaza H_0 y se acepta H_1 .

Con el propósito de determinar cuáles medias de las variables respuesta tienen la diferencia más grande para el factor, se procedió a realizar un análisis de valores y vectores propios, dando como resultado las Tablas 25 y 26.

Tabla 25. Valores propios para el factor Manejo, de fertilidad del suelo.

Valor propio	11.459	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Proporción	1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Acumulativo	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Fuente: Elaboración propia.

En estos resultados, el primer valor propio para manejo es de 11.459, por lo que es mayor que el segundo valor propio (0.00000) y todos los restantes. De acuerdo con lo anterior, se debe poner mayor importancia al primer vector propio, de manera que solo se presentan los resultados para la columna 1 de los vectores propios.

Tabla 26. Vectores propios para el factor Manejo, de fertilidad del suelo.

Vector propio	Columna 1
CIC	3.17
Ca	-0.08
Mg	0.29
Na	-0.45
K	0.47
V	-0.14
pH	0.85
NT	0.16
CO	-38.43
MO	66.14

Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en la Tabla 26, el valor absoluto más alto es para la variable del porcentaje de materia orgánica (MO), seguido del porcentaje de carbono orgánico (CO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), esto sugiere que las medias de MO tienen la mayor diferencia entre los dos niveles (manejo agroecológico y manejo agrícola convencional) del factor Manejo.

Resultados univariados

Aunado a lo anterior, se determinó si la asociación entre la respuesta y cada término incluido en el modelo es estadísticamente significativa, para lo cual se comparó el valor p del término con el nivel de significancia (α) para evaluar la hipótesis nula, donde:

H_0 : no hay asociación entre el término y la respuesta

H_1 : hay asociación entre el término y la respuesta

El nivel de significancia (α) se consideró de 0.05, lo cual indica un riesgo de 5% de concluir que existe una asociación cuando no hay una asociación real.

En función de lo anterior, se realizó la comparación del valor p con el nivel de significancia establecido, dando como resultados la Tabla 27, donde:

Valor $p \leq \alpha$: La asociación es estadísticamente significativa

Valor $p > \alpha$: La asociación no es estadísticamente significativa

Tabla 27. ANOVA para cada una de las variables respuesta, para el efecto Manejo.

	Estadístico F	gl (Factor, error)	Valor de p	Asociación	R2 ajustado (%)
CIC	0.01	(1,35)	0.911	No significativa	0.00
Ca	0.06	(1,35)	0.805	No significativa	0.00
Mg	33.54	(1,35)	0.000	Significativa	47.48
Na	145.05	(1,35)	0.000	Significativa	80.01
K	6.83	(1,35)	0.013	No significativa	13.94
V	0.78	(1,35)	0.384	No significativa	0.00
pH	32.37	(1,35)	0.000	Significativa	46.56
NT	0.92	(1,35)	0.344	No significativa	0.00
CO	0.19	(1,35)	0.668	No significativa	0.00
MO	0.16	(1,35)	0.668	No significativa	0.00

gl=grados de libertad. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con estos resultados, el valor de p del efecto Manejo es estadísticamente significativo en el nivel de significancia de 0.05 en Mg, Na y pH, por lo tanto, se puede concluir que los cambios en el Manejo están asociados con los cambios en las variables respuesta. Dado que estos resultados no concuerdan con las variables que marcan la diferencia en la prueba de valores y vectores propios, donde se considera al porcentaje de MO y CO y la CIC, puede ser debido a que el ajuste del modelo no es significativo, siendo este de 0.00%.

Gráficas de residuos

Para determinar si el modelo del MANOVA cumple con los supuestos del análisis se realizaron gráficas de residuos para todas las variables de fertilidad.

Gráfica de residuos vs. ajustes

En esta gráfica se verifica el supuesto de que los residuos están distribuidos de forma aleatoria y varianza constante.

“Lo ideal es que los puntos se ubiquen aleatoriamente a ambos lados del 0, con patrones no detectables en los puntos”(Minitab, 2023, p. 1).

Gráfica de residuos vs. Orden

En esta gráfica se verifica el supuesto de que los residuos son independientes entre sí. Este supuesto se confirma cuando:

- J “Los residuos independientes no muestran tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico.
- J Los patrones en los puntos podrían indicar que los residuos que están cercanos entre sí podrían estar correlacionados y, por lo tanto, podrían no ser independientes.
- J Lo ideal es que los residuos que se muestran en la gráfica se ubiquen aleatoriamente alrededor de la línea central” (Minitab, 2023, p. 1).

Gráfica de probabilidad normal de los residuos

En esta gráfica se verifica el supuesto de que los residuos están distribuidos de manera normal.

“La gráfica de probabilidad normal de los residuos debe seguir aproximadamente una línea recta” (Minitab, 2023, p. 1).

Dados los resultados obtenidos en las gráficas (Anexo II) se confirma que el modelo (MANOVA) cumple con los supuestos del análisis, los cuales se mencionaron en párrafos anteriores y, por tanto, se ajusta adecuadamente a los datos.

VII.7 Fortalecimiento de la investigación transdisciplinaria

A continuación, se presentan algunas referencias de diferentes actividades realizadas con la participación de investigadores y alumnos de la BUAP y el Grupo Tleyolotli.

- **Libro: Ciencia y Transdisciplinarietà (ISBN: 978-84-19588-03-06). Capítulo de libro: 2. Investigación Transdisciplinaria para la Evaluación de un Proyecto sobre los Servicios Ecosistémicos Prestados por el Suelo en el Parque Nacional La Malinche, México.**

Autores: ¹Gladys Linares Fleites, ¹María Guadalupe Tenorio Arvide, ¹Josefina Cervantes Vargas, ¹Miguel Ángel Valera Pérez. ¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

El objetivo del trabajo (Imagen 22) fue la evaluación y síntesis de la experiencia en el desarrollo de una investigación transdisciplinaria, en la evaluación de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en el Parque Nacional La Malinche, México, en su etapa de preparación, aplicando los principios rectores de la transdisciplinarietà.

Los resultados encontrados es que existe colaboración entre la academia, la comunidad campesina y demás partes interesadas, el cual es un proceso recursivo que requiere una intensa comunicación, adaptación y conocimientos específicos.

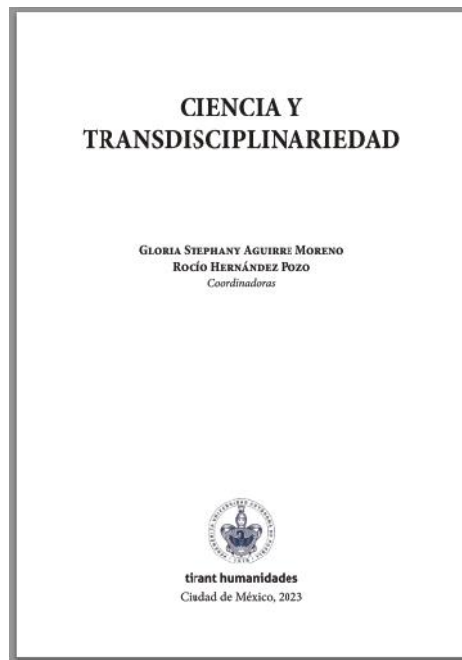


Imagen 22. Portada preliminar del libro "Ciencia y Transdisciplinarietà".

- **Curso: Materia orgánica del suelo y el uso de residuos orgánicos en el ciclo global del carbono**

Del curso mencionado se realizó una **práctica de campo** (Imagen 23) en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokikall”, cuyo objetivo fue la identificación y aplicación de diferentes conceptos y procesos en el ciclo de la materia orgánica del suelo y su relación con el cambio climático.

El objetivo fue logrado gracias a la colaboración del Grupo Tleyotli, quien recibió en sus instalaciones al grupo de estudiantes e investigadores de la BUAP además de su participación al compartir sus experiencias con el tema mencionado, y aquellas relacionadas con su cosmovisión y cultura respecto al uso y manejo de recursos naturales de su montaña.



Imagen 23. Recorrido de la práctica de campo, del curso de materia orgánica, desarrollada en el “Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

Fuente: Fotografías propias.

- **Feria de la Milpa (1ª Edición)**

Con la participación de diferentes instituciones académicas, como el Posgrado de Ciencias Ambientales y la Facultad de Antropología de la BUAP, así como la Universidad Intercultural del Estado de Puebla; representantes de instituciones gubernamentales como el Instituto Nacional de Pueblos Indígenas (INPI); el Grupo Tleyolotli y personas de la comunidad de San Miguel Canoa (Imagen 24) se realizó la primera edición de la Feria de La Milpa. En esta Feria, en la que además de presentarse diversas pláticas en torno a la temática de este sistema, se generó un acercamiento entre los diferentes participantes respecto a la cosmovisión y cultura que envuelven este tema, además de la degustación de una gran diversidad de alimentos que se prepararon a partir de los distintos productos que se obtienen de este sistema.



Imagen 24. Actividades desarrolladas en la Feria de la Milpa (1ª Ed.) en el Centro de Cultura Ambiental “Tezokihkall”.

Fuente: Fotografías tomadas de

<https://www.facebook.com/photo/?fbid=146030631897430&set=pcb.146030771897416>

- **Sistema Agroecológico “Metepantle”**

Una de las actividades más importantes en las que se destaca la participación de la comunidad, con una intensidad que va de la colaboración a la de empoderamiento, es la de la siembra de maguey (*Agave Salmiana*) para el restablecimiento del sistema agroecológico “Metepantle” en una parcela muy cercana al Centro de Cultura Ambiental que pueda ser un referente de los beneficios ambientales, sociales y económicos que se obtienen de la implementación de este tipo de sistemas de agricultura tradicional.

Para el desarrollo de esta actividad la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP proporcionó los recursos económicos para que a través de los investigadores y alumnos del Posgrado en Ciencias Ambientales la comunidad pudiera obtener estas plantas. Las plantas fueron adquiridas a un grupo de productores de agave de la región de Nanacamilpa Tlaxcala, denominado Grupo Pulmex, para posteriormente ser sembradas en el sector de referencia por parte de los campesinos de la comunidad, quienes determinaron de acuerdo con sus conocimientos ancestrales de agricultura tradicional, la forma, distanciamiento y ubicación de las plantas de maguey en la parcela de referencia (Imagen 25).



Imagen 25. Siembra de maguey (*Agave salmiana*) para el restablecimiento del Sistema Agroecológico “Metepantle”.

Fuente: Fotografías propias.

Tal ha sido la magnitud del empoderamiento de los campesinos, que, por iniciativa propia, decidieron que se estableciera en otras de sus parcelas dentro del paraje Huey Tecoch, este mismo

sistema agroecológico que considera técnicas de uso tradicional como la plantación del agave de forma perpendicular a la pendiente de la montaña.

VIII. CONCLUSIONES

1. El tipo de suelo identificado en la zona de estudio corresponde a un Andosol, según criterios de la WRB, y un Andisol, según criterios de la Soil Taxonomy, de tipo Ustdand dado su régimen de humedad Ústico.
2. Los agroecosistemas del Centro de Cultura Ambiental, en el Parque Nacional La Malinche, proporcionan servicios ecosistémicos en las cuatro categorías de la clasificación, establecidas por la FAO(2022b). Respecto a los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo, algunos de los más importantes que se identificaron son el de fertilidad del suelo, prevención de la erosión y almacenamiento de carbono.
3. La identificación de los servicios ecosistémicos prestados por los sistemas agroecológicos permitió:
 - o La identificación de las prácticas de manejo de uso tradicional, realizadas por los campesinos de la comunidad.
 - o El rescate del conocimiento ancestral respecto a las técnicas agrícolas de uso tradicional del sistema agroecológico.
 - o La identificación de potenciales prácticas de manejo que se pueden aplicar, permitiendo de esta manera potencializar e incrementar los servicios ecosistémicos prestados por el sistema.
4. Algunas de las formas de manejo agrícola tradicionales, efectuadas por los pueblos originarios de la región, en lo referente al servicio ambiental de almacenamiento de carbono en los suelos, son benéficas para el sistema, lo cual reivindica dichas formas de manejo por lo que deberían ser promovidas por los gestores del Área Natural Protegida (ANP).
5. El modelo de calidad de suelo permitió estimar la pérdida de suelo a partir de las propiedades del suelo con calidad inherente y calidad dinámica.
6. Dados los resultados de erosión del sistema de terrazas clasificada como media o moderada, referida a la masa de suelo pérdida, pareciera no ser tan urgente la atención del problema. Sin embargo, al observar las condiciones climáticas de la región y las

características del tipo de suelo que se ubica en la zona (andosoles susceptibles a la erosión), así como la altura de las capas de suelo pérdidas, siendo en algunos puntos hasta de 69 cm, es más evidente la necesidad de la aplicación de medidas de conservación que permitan detener el proceso erosivo, y, por tanto, la pérdida de la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos que este presta.

7. Existe una diferencia significativa respecto al efecto que tiene el manejo del suelo (sistema agroecológico y agricultura convencional) en las propiedades de fertilidad de éste, observándose una mayor diferencia en el porcentaje de materia orgánica (MO).
8. La investigación transdisciplinaria es indispensable en el estudio de los agroecosistemas, especialmente en los de uso tradicional de la región de la montaña Malinche. De esta manera, se fortalece la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo.

LOGROS Y RECOMENDACIONES

1. En la identificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el sistema agroecológico, en función de las prácticas agrícolas desarrolladas en el sistema, la recomendación es la implementación de nuevas prácticas agroecológicas como la fertilización orgánica del suelo para de esta manera eliminar por completo la aplicación de fertilizantes, y, por otro lado, implementar técnicas de manejo de plagas y enfermedades que permitan eliminar el uso de plaguicidas; entre otras prácticas sostenibles que pueden aplicarse al sistema.
2. Dado que la investigación transdisciplinaria es un proceso recursivo, es conveniente una intensa comunicación para fortalecer la intensidad de la participación de los campesinos de la comunidad del Centro de Cultura Ambiental, la comunidad académica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y otras instituciones académicas, autoridades gubernamentales como CONANP e INPI, y otras partes interesadas.

3. El establecimiento de un sector de referencia, de un sistema agroecológico, que sea referente de agricultura tradicional sostenible, que es compatible con los lineamientos de la subzona de uso tradicional del Área Natural Protegida.
4. El establecimiento de una base de referencia en la evaluación de la restauración de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo, a través del sistema agroecológico “Metepantle”. Es recomendable continuar con el estudio de las propiedades indicadoras de calidad de suelo evaluadas, que permitan observar la restauración de los servicios ecosistémicos del suelo a través del restablecimiento del sistema agroecológico “Metepantle”.

IX. REFERENCIAS

- Aguilar, G., & Aguilar, D. (2023). Uso de la tierra en las comarcas del municipio de Zinapécuaro, Michoacán, México. *Revista Geográfica de América Central*, 70(1), 243-272.
- Altieri, M. A. (1995). El estado del arte de la agroecología y su contribución al desarrollo rural en América Latina. En *Agricultura y desarrollo sostenible* (pp. 151-204).
- Alvarado, M., Colmenero, J. A., & Valderrábano, M. L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *CIENCIA ergo-sum*, 14(3), 317-326.
- Banco, Y., & Leyva, Á. (2007). Las arvenses en el Agroecosistema y sus beneficios naturales. *Cultivos Tropicales*, 28, 21-28.
- Basile-Doelsch, I., Chevallier, T., Dignac, M. F., & Erktan, A. (2023). Carbon storage in soils. En *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 229-241).
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Blackwell Science Ltd., June*, 1346-1366. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c38>
- Bautista, A., Etchevers, J., Del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 5(8), 90-97.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality - A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(September 2017), 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Campos, A., Oleschko, K., Cruz, L., Etchevers, J., & Hidalgo, C. (2001). Estimation of Allophane and its Relationship with Other Chemical Parameters in Mountain Andisols of the Volcano Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana*, 19(2), 1-13.
- Castro, R. (2007). *Historia eruptiva del volcán La Malinche y estudio del emplazamiento del flujo piroclástico Pilares Superior*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro, R., & Siebe, C. (2009). La historia eruptiva del volcán la malinche. En *Matlacuéyetl: visiones populares sobre cultura, ambiente y desarrollo* (Primera).
- Cerdá, A. (1996). Régimen hídrico de los suelos en zonas acarvavadas. Algunos ejemplos en la cuenca experimental de Petrer Alicante. *IV Reunión de Geomorfología*, 685-694.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (McGraw-Hill, Ed.).

CONABIO. (1989). *RTP-106 La Malinche*.

CONAFOR. (2021). *Continuo de Uso de Suelo y Vegetación Puebla*. CONAFOR-SEMARNAT.

<https://snmf.cnf.gob.mx/infys/>

CONAGUA. (s/f). *Información Estadística Climatológica*.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

CONANP. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional la Montaña Malinche o Matlacuéyatl* (1a ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cotler, H. (2020). *Manual para evaluar la erosión de los suelos en zonas forestales* (Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, Ed.).

Coyotl, A. (2015). *Hidrología de los suelos forestales del Parque Nacional Malinche y su importancia como servicio ambiental*.

Dale, V. H., & Polasky, S. (2007). Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 64(2), 286-296.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.009>

Decreto que declara Parque Nacional la montaña Malinche o Matlacuéyatl, 2 (1938).

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *USA: SSSA Special Publication*, 35(35), 1-21.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. *Methods for Assessing Soil Quality*, 49, 25-37. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2>

FAO. (s/f). *Textura del suelo*.

https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo* (Vol. 03).

FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. En *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (Vol. 3, Número 4, p. 100).

- FAO. (2015a). *Funciones del suelo* (pp. 1-1). <https://www.fao.org/documents/card/en?details=0a7cfc0-e14e-4b18-a06c-856af6ff046e/>
- FAO. (2015b). *Las amenazas a nuestros suelos* (pp. 1-1). <https://www.fao.org/global-soil-partnership/about/why-the-partnership/es/>
- FAO. (2017a). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto* (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Ed.).
- FAO. (2017b). Classification Systems: FAO ☆. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (Número January). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10520-2>
- FAO. (2018). *Los 10 elementos de la agroecología. Guía para la transición hacia sistemas alimentarios y agrícolas sostenibles*. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/19037ES>
- FAO. (2022a). *¿Qué es el Suelo?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO. (2022b). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. FAO. <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>
- FAO. (2023). *Agroecología y Agricultura Familiar*. Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar. <https://www.fao.org/family-farming/themes/agroecology/es/#:~:text=La Agroecología es una manera,la vez regionales y locales.>
- Farrel, J. G., & Altieri, M. A. (1992). Sistemas agroforestales. En *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable* (Vol. 6, Número 2, pp. 281-293). <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1992.174>
- Fernández, J. A., & López-Dominguez, J. C. (2005). Biodiversidad del parque nacional malinche. En Coordinación General de Ecología del Gobierno del Estado de Tlaxcala (Ed.), *Natural History* (1a ed.).
- Galicia, L., Gómez-Mendoza, L., García-Romero, A., & Ramírez, M. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia*, 58, 50-59.

https://www.researchgate.net/publication/283353151_Cambio_de_uso_del_suelo_y_degradacion_ambiental/citation/download

- Gallardo, J., González, M., & Pérez, C. (1982). *La materia orgánica del suelo: su importancia en suelos naturales y cultivados* (p. 239).
- Gliessman, S. R. (2002). Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible. En *Diversidad y estabilidad del agroecosistema*.
- Gliessman, S. R., Engles, Eric., & Krieger, Robin. (1998). *Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture*. Ann Arbor Press.
- Gómez, G. (1992). Trabajos metodológicos–El análisis multivariable de la varianza (MANOVA): claves para su interpretación. *Revista De Investigación Educativa*, 1992, 69–79.
- González, A. (2014). Sistemas agrícolas en orografías complejas: las terrazas de Tlaxcala. *Etnoagroforestería en México*, 111–144.
- Guadalix, M. E., & Pardo, M. T. (s/f). *Reacción del anión fosfato en los suelos de carga variable*.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (S. A. D. C. V. McGRAW–HILL / INTERAMERICANA EDITORES, Ed.; 6a Ed.).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2018). Metodología de la investigación. En *Metodología de la investigación*. <https://doi.org/10.17993/ingytec.2018.46>
- Hidalgo, C. M. I. (1988). *Caracterización y dispersión en suelos de Ando*. Universidad Autónoma de Puebla.
- Hirsch, G., Bradley, D., Pohl, C., & Rist, S. (2006). *Implications of transdisciplinarity for sustainability research. 0*.
- INECC. (2007). 3. *Muestreo y caracterización de un sitio*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap3.html>
- INEGI. (2003). *Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente*.
- INEGI. (2014). *Conjunto de Datos de Erosión del Suelo*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223>
- INEGI. (2021, marzo 16). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Subsistema de Información Demográfica y Social.

- Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. En *Universidad Nacional de Colombia*.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114(3-4), 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), Diario Oficial de la Federación 1 (2021).
- Licona, E., & Pérez, M. I. (2020). *Bendición de semillas. Ritual agrario religioso* (El Errante, Ed.; 1a ed.).
- Linares, G., Tenorio, M. G., Cervantes, J., & Valera, M. Á. (2023a). Investigación Transdisciplinaria para la Evaluación de un Proyecto sobre los Servicios Ecosistémicos Prestados por el Suelo en el Parque Nacional La Malinche, México. En *Ciencia y transdisciplinarietàad*.
- Mahmut, E. (2023). *Piedra pómez*. Geology Science. <https://es.geologyscience.com/rocks/igneous-rocks/extrusive-igneous-rocks/pumice/?amp>
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental* (Reverté, Ed.).
- Martínez, R. (2021). *Conflicto socioambiental en el paraje Huey Tecoch, Parque Nacional La Malinche, Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Martínez, S., & Garbi, M. (2020). *Evapotranspiración y balance hidrológico del suelo* (pp. 1-18). Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Martínez-Herrera, Y. D., Fuentes-Andrade, M. S., Valera-Pérez, M. Á., Rosas-Guerrero, V. M., Ramírez-Guzmán, A. H., & Alemán-Figueroa, B. L. (2018). Calidad inherente y dinámica del suelo en una zona cafetalera, en el estado de Guerrero, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5(5), 1-15.
- MEA. (2003). *Ecosystems and human well-being: a framework for assesment*.
- MEA. (2005). Ecosystems and Human Well-being. En *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment* (Vol. 21, Número February, pp. 71-84).
- Minitab Inc. (2013). *Minitab* (17.1.0).
- Minitab, L. (2023). *Interpretar los resultados clave para MANOVA general*.

- Moebius–Clune, B. N., Moebius–Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual, Edition 3.1. En *Cornell University, Geneva, NY*.
- Mojica, K. (2021). *La Malinche pierde vegetación por plaga de escarabajo descortezador e incendios*. Poblanerías. <https://www.poblanerias.com/2021/10/puebla-en-100-deforestacion-en-la-malinche/>
- Montero, I. (2012). *Matlacueye. El Volcán del alma tlaxcalteca*. (Gobernador del Estado de Tlaxcala, Secretaría de Educación Pública del Estado de Tlaxcala, Dirección de Cultura del Estado de Tlaxcala, Fideicomiso de la Historia del Estado de Tlaxcala, & Colección Científica Tlaxcallan, Eds.; 1a ed., Vol. 1, Número 69).
- Montes–León, M. A. L., Uribe–Alcántara, E. M., García–Celis, E., & Agrosamex. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua, II*, 5–17.
- Moreno–Calles, A. I., Toledo, V. M., & Casas, A. (2013). Agroforestry systems of Mexico: A biocultural approach. *Botanical Sciences, 91*(4), 375–398. <https://doi.org/10.17129/botsci.419>
- Morin, E. (2019). *¿Qué es Transdisciplinariedad?* <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/que-es-transdisciplinariedad.html>
- Munsell, A. H. (2000). *Cartas de color del suelo de Munsell*.
- Nicolescu, B. (1996). *La transdisciplinariedad. Manifiesto*.
- Nicolescu, B. (2006). Transdisciplinariedad: pasado presente y futuro. *Visión Docente Con-Ciencia, 31*.
- Nieto, G. P. (2017). *Agrobiodiversidad y Servicios Ecosistémicos: Una Revisión Desde Los Componentes Y Prácticas De Manejo*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Norma Oficial Mexicana NOM–021–RECNAT–2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., Diario Oficial de la Federación (2002).
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación*.

- ONU. (2022). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. FAO. <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>
- Participantes del Primer Congreso Mundial de Transdisciplinariedad. (1994). *Carta de la Transdisciplinariedad*.
- Paxton, K. W., & Levergne, D. R. (1991). *An economic analysis of reduced tillage cotton production*.
- Pérez, C. (2004). Técnicas de análisis multivariante de datos. En *Pearson Prentice Hall*.
- Pérez, J. M. (2012). Terrazas y metepantles: Manejo de tierra y agua en una comunidad en el altiplano mexicano. *Perspectivas Latinoamericanas*, 9, 99-111.
- Pérez, J. M., Moctezuma, S., Sales, J., Reyes, L., & Juan, J. I. (2017). Manejo del suelo en la agricultura tradicional de laderas en Tlaxcala y el valle de Toluca, México. En Universidad Autónoma Chapingo (Ed.), *Patrimonio biocultural. Experiencias integradoras* (1a ed., Número November, pp. 79-99).
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdés, R., Olivares, C., & Balocchi, F. (2010). Evaluación de la Erosión Hídrica Superficial en zonas áridas y Semiáridas de Chile Central. *Aqua-Lac*, 2(2), 1-11.
- Porras Velázquez, A. (2017). Método Kriging de inferencia espacial. *Repositorio Nacional CONACYT*, 7. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-Método Kriging de Inferencia espacial - Diplomado en Análisis de Información Geoespacial.pdf>
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3a ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Posit Software PBC. (2023). *RStudio* (2023.06.1 Build 524).
- Pritchett, W. L. (1990). *Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento* (Limusa, Ed.).
- Ramírez-González, A. (2016). Inter y transdisciplinariedad en investigaciones ambientales. Una sinopsis. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 318-331.

- Restrepo, J., Angel, D. I., & Prager, M. (2000). Agroecología. *Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, Inc. (CEDAF)*.
- Rzedowski, J. (2006a). Capítulo 5. Relaciones geográficas y posibles orígenes de la flora *. En *Vegetación de México*.
- Rzedowski, J. (2006b). Capítulo 6. Provincias florísticas de México. *Vegetación de México*, 104-121.
- SADER. (2023). *Conoce los beneficios de un buen manejo de suelo*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conoce-los-beneficios-de-un-buen-manejo-de-suelo?idiom=es>
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. (2000). *Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos* (C. N. de R. de Suelos, S. de C. de R. Naturales, & D. de A. de los EE.UU., Eds.).
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1972). *Instructivo para la determinación del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite*.
- SEMARNAT. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México, Suelos*. SEMARNAT.
- Soil Survey Staff-NRCS/USDA. (1999). *Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*.
- Tenorio, M. G. (2008). *Relación de las propiedades fisicoquímicas y calidad de los suelos de Tetelilla, Teziutlán, Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2021). *Los suelos y su fertilidad* (Reverté, Ed.; 4a ed.).
- Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. (2009). La Memoria Biocultural. En I. Editorial (Ed.), *Cuadernos de Biodiversidad*.
- USDA-NRCS. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo* (Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, & Instituto de Calidad de Suelos, Eds.).
- USDA-NRCS. (2001). Guidelines for soil quality assessment in conservation planning. En *United States Department of Agriculture* (pp. 1-38).
- USDA-NRCS. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. En *NRCS-USDA*.

- USDA–NRCS. (2015). Soil Quality Indicators (Physical, Chemical, and biological indicators for soil Quality Assessment and Management). En *Natural Resources Conservation Service*.
- Valera, M. A. (1993). *Fisicoquímica y mineralogía de andosoles de la región Teziutlán, estado de Puebla*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Valera, M. Á., Licona, E., Soni, M. E., Zúñiga, F. E., Urizar, L. P., García, D. A., Vega, M., Silveti, Á., Ramirez, L. A., Chavarín, Y., & Tenorio, M. G. (2020). Recuperación de la Milpa Nahua como estrategia para la recarga del acuífero a partir de la conservación de suelos y rehabilitación del Metepantle en comunidades indígenas de las zonas de montaña de la cuenca Alto Atoyac (Estados de Puebla y Tlaxcala), des. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 11(11), 1–12.
- Vela–Correa, G., Vázquez–Martínez, B. E., Rodríguez–Gamiño, M. L., & Domínguez–Rubio, I. V. (2007). Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de pinus montezumae lamb en el volcán la Malinche, México. *Agrociencia*, 41(4), 371–383.
- Viniegra González, G., de la Torre, M., Favela Torres, E., Cruz Guerrero, A. E., Figueroa Martínez, F., & Cázarez Jiménez, E. (2019). *EL METEPANTLE (milpa entre magueyes) ¿La biorrefinería campesina del futuro?*
- Werner, G., Miehlich, G., & Aeppli, H. (1976). *Mapa de los suelos de la cuenca alta Puebla–Tlaxcala y sus alrededores* (p. 1). Instituto de Edafología y Conservación de Suelos de la Universidad Justus Liebig de Giessen. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/mapa-de-los-suelos-de-la-cuenca-alta-de-puebla-tlaxcala-y-sus-alrededores-1>
- Wiek, A., Talwar, S., Shea, M. O., & Robinson, J. (2014). *Toward a methodological scheme for capturing societal effects of participatory sustainability research*. 1–16. <https://doi.org/10.1093/reseval/rvt031>

ANEXO I

Caracterización

fisicoquímica del suelo

agrícola convencional de

referencia

Suelo agrícola convencional

Propiedades físicas en suelos agrícolas convencionales de la misma zona

Muestra	Estructura	Textura	Densidad aparente g/cm ³		Color	
			Núcleo	Probeta	Suelo Seco	Suelo Húmedo
A1	Sin estructura	franco arenosa	1.21	1.26	10YR 5/3	10YR 3/2
A2	Sin estructura	franco arenosa	0.97	1.07	10YR 5/4	10 YR 3/2
A4	Sin estructura	franco arenosa	1.29	1.23	10YR 5/3	10YR 3/2
A5	Sin estructura	franco arenosa	1.4	1.34	10YR 5/4	10YR 3/3
A6	Sin estructura	franco arenosa	1.24	1.29	10YR 4/3	10YR 3/2
A7	Sin estructura	franco arenosa	1.33	1.32	10YR 5/3	10YR 3/2
A71	Sin estructura	franco limosa	1.23	1.25	10YR 6/6	10YR 4/4
A8	Sin estructura	franco arenosa	1.39	1.4	10YR 5/3	10YR 3/2
A9	Sin estructura	franco arenosa	1.31	1.35	10YR 5/3	10YR 3/2
A10	Sin estructura	franco arenosa	1.14	1.22	10YR 5/3	10YR 3/2
A11	Sin estructura	franco arenosa	1.15	1.23	10YR 5/4	10YR 3/4
A12	Sin estructura	arenosa	1.37	1.26	10YR 5/4	10 YR 3/2
A13	Bloques sub-angulares que se descomponen en pequeños, friable.	arenosa	0.97	1.01	10YR 4/3	10YR 3/1

Fuente: Coyotl (2015).

Propiedades químicas en suelos agrícolas convencionales de la misma zona

Muestra	% M.O.	% Carbono	Relación C/N	% Nitrógeno	pH		Δ pH	CIC	Bases intercambiables meq/100g				% Saturación en bases
					H ₂ O	KCl			Cmol(+)/kg	[Ca] ⁺⁺	[Na] ⁺	[Mg] ⁺⁺	
A1	3.4	1.96	22.46	0.09	5.1	4.6	-0.5	12.1	1.56	0.28	0.3	0.19	19.26
A2	5.9	3.43	15.95	0.22	5.1	4.5	-0.5	8	4.92	0.46	0.74	0.37	81.13
A4	5.3	3.05	13.35	0.23	5.3	4.3	-1	8.9	2.48	0.48	0.42	0.35	41.91
A5	4.1	2.38	16.11	0.15	4.8	4.8	-0.1	7.3	2.94	0.23	0.47	0.22	52.88
A6	3.8	2.2	23.4	0.09	5.9	4.6	-1.3	4	2.95	0.36	0.46	0.29	101.5
A7	3.6	2.09	15.57	0.13	5	4.5	-0.5	5.3	2.95	0.46	0.49	0.39	80.94
A71	3.3	1.9	31.43	0.06	5	4.6	-0.4	9.7	3.75	0.42	0.83	0.47	56.39
A8	3.8	2.2	10.24	0.22	4.8	4.6	-0.2	22.6	2.8	0.72	0.38	0.27	18.45
A9	4.1	2.4	17.87	0.13	4.4	4.2	-0.2	4.8	1.76	0.66	0.25	0.2	59.79
A10	7.6	4.4	17.71	0.25	4.6	4.6	-0.1	13.1	2.78	0.98	0.6	0.42	36.49
A11	3.3	1.9	20.21	0.09	4.9	4.6	-0.3	10.5	2.81	0.55	0.58	0.28	40.19
A12	4.3	2.48	10.53	0.24	5.2	4.7	-0.4	20.3	3.12	0.38	0.48	0.23	20.74
A13	7.6	4.4	16.8	0.26	5.1	4.6	-0.5	39.9	4.9	0.43	0.83	0.26	16.09

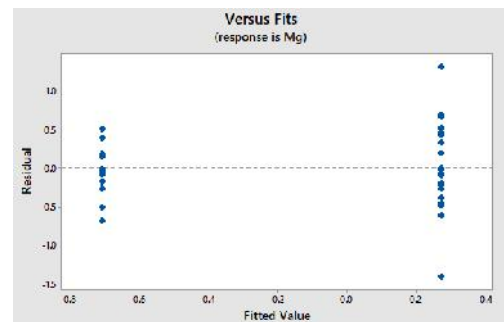
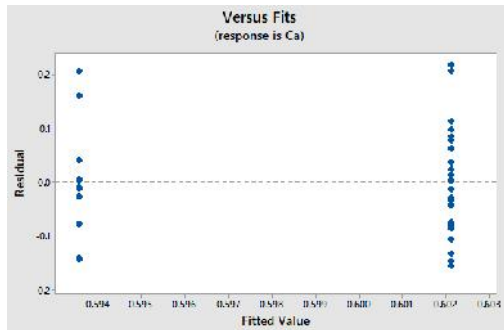
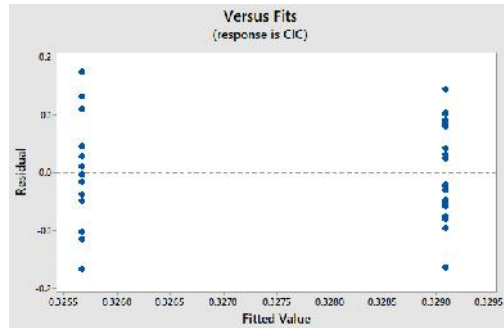
Fuente: Coyotl (2015).

ANEXO II

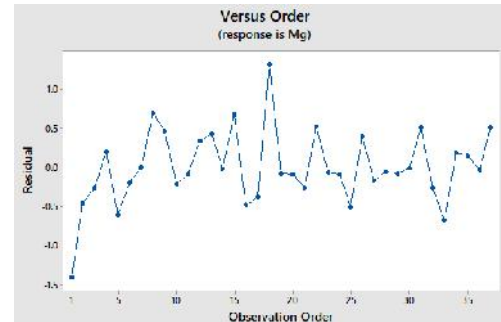
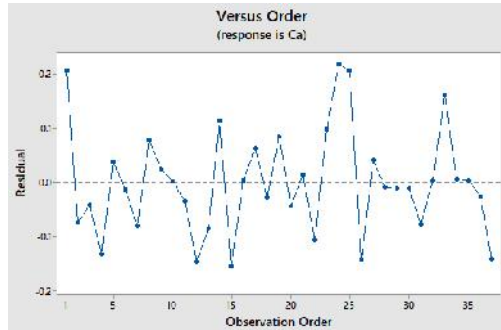
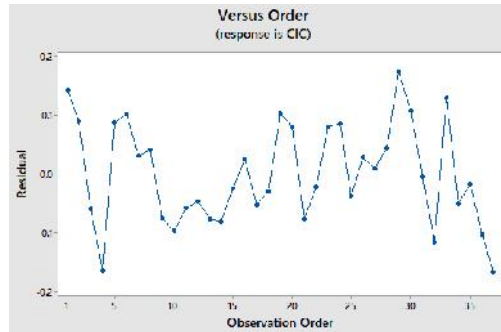
Gráficas de cumplimiento de supuestos MANOVA

Gráficas de residuos de cumplimiento de los supuestos del MANOVA, para cada variable respuesta.

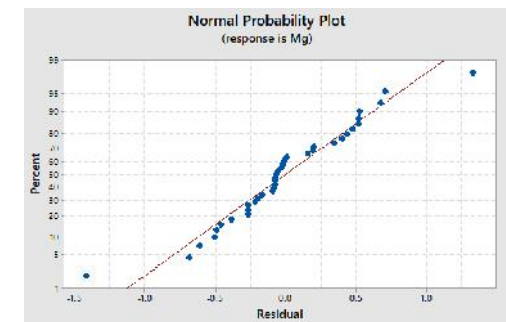
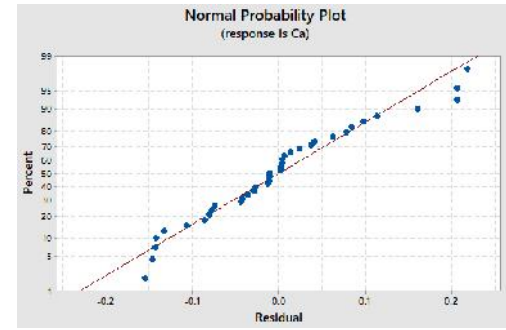
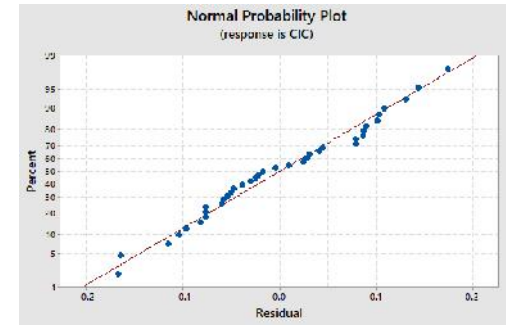
Gráfica de residuos vs. ajustes



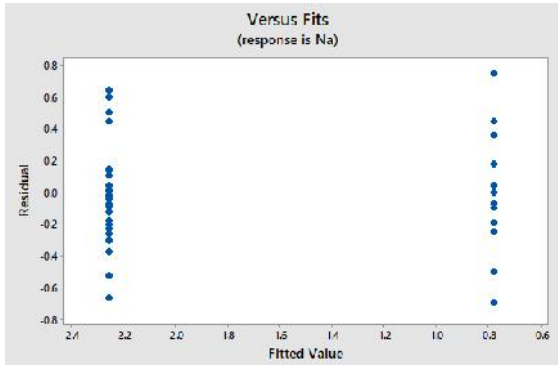
Gráfica de residuos vs. orden



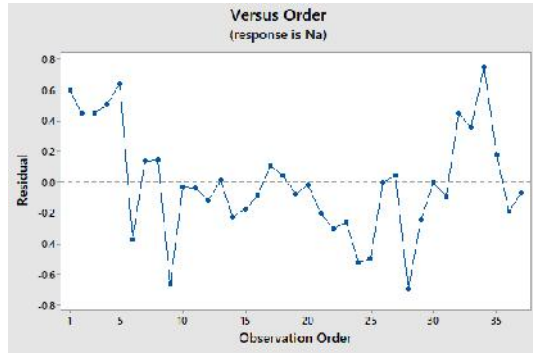
Gráfica de probabilidad normal de los residuos



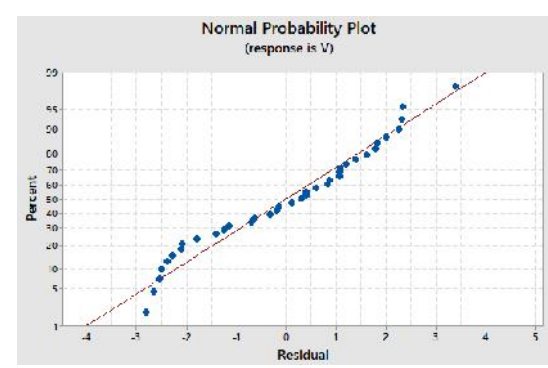
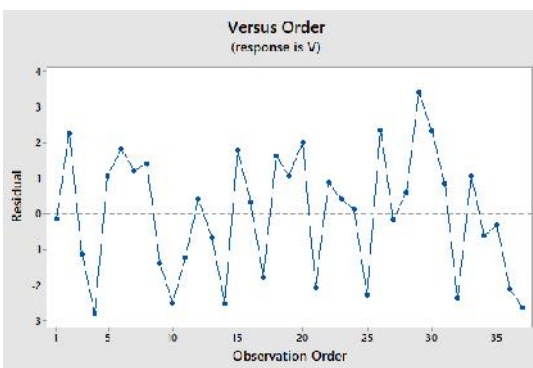
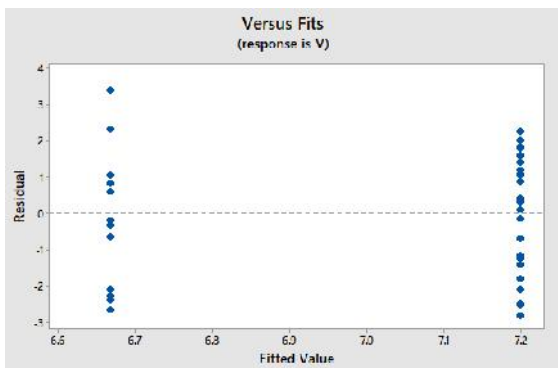
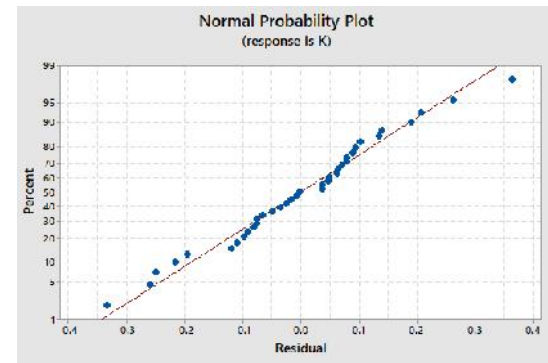
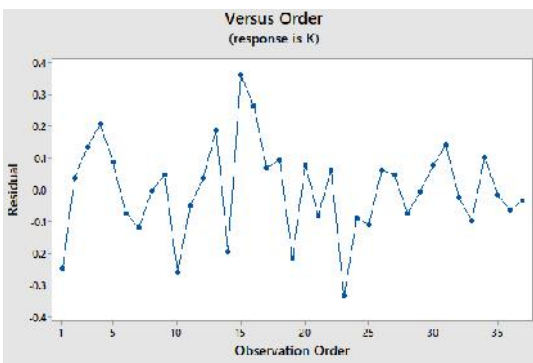
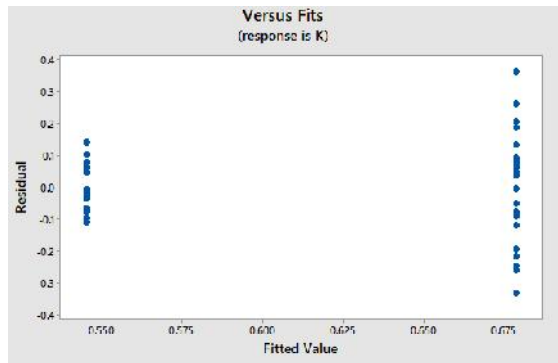
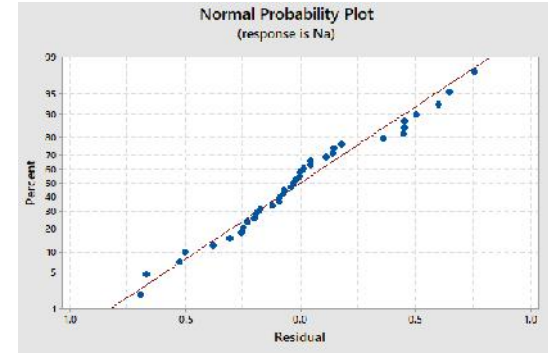
Gráfica de residuos vs. ajustes



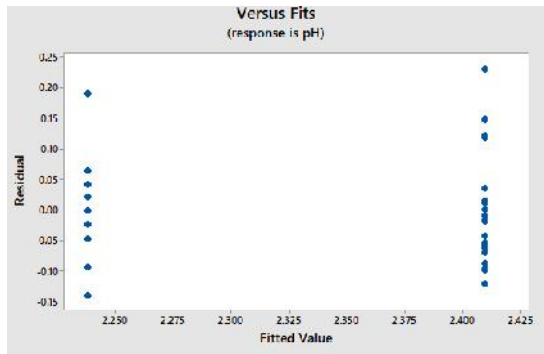
Gráfica de residuos vs. orden



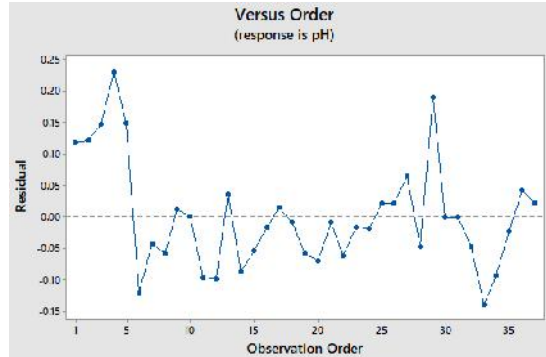
Gráfica de probabilidad normal de los residuos



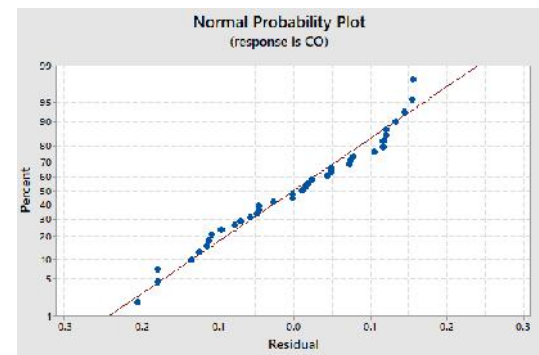
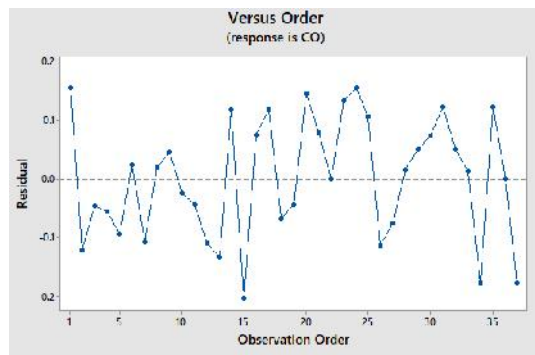
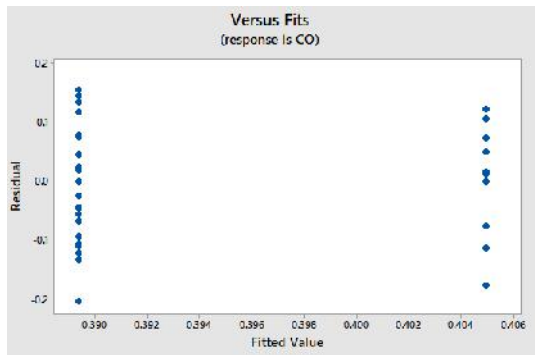
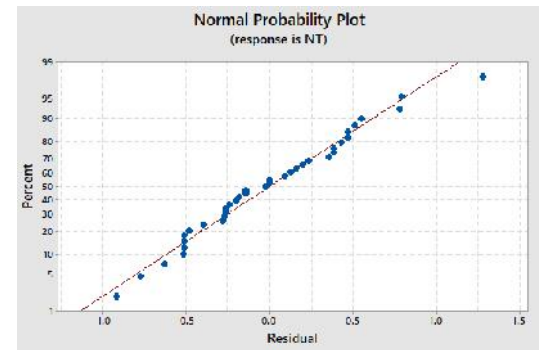
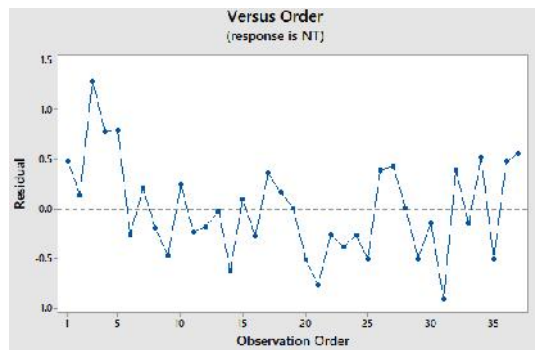
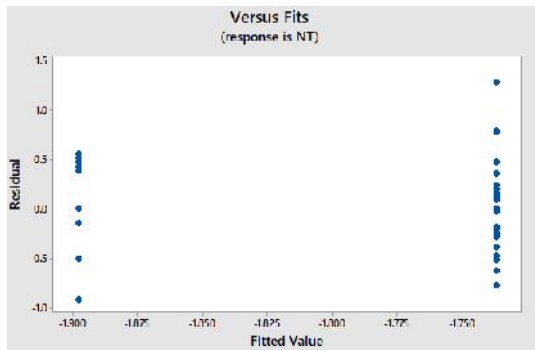
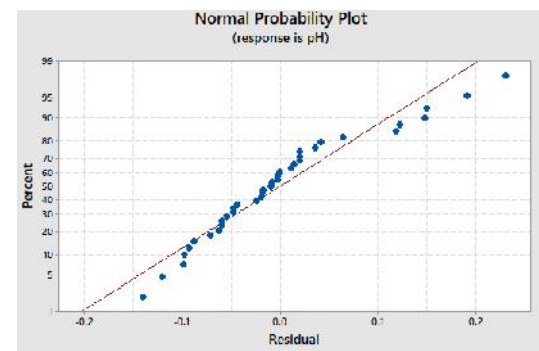
Gráfica de residuos vs. ajustes



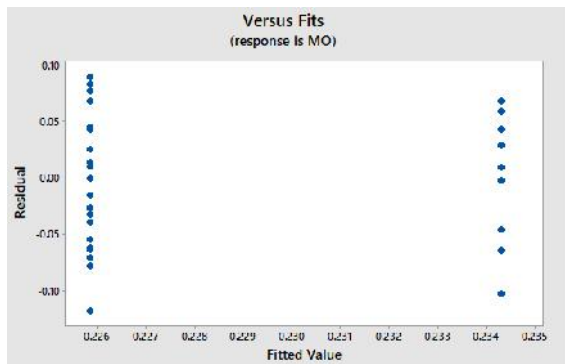
Gráfica de residuos vs. orden



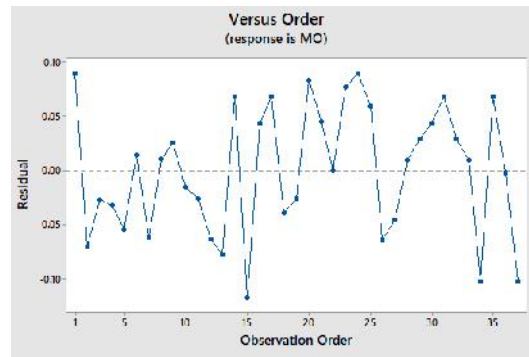
Gráfica de probabilidad normal de los residuos



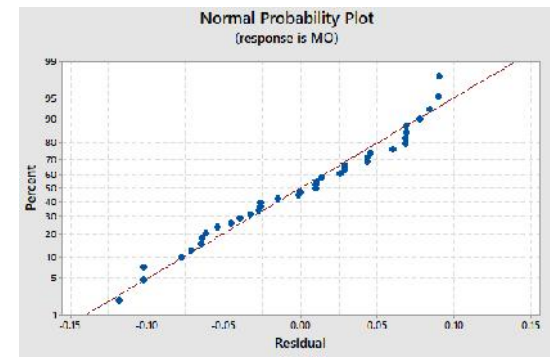
Gráfica de residuos vs. ajustes



Gráfica de residuos vs. orden



Gráfica de probabilidad normal de los residuos



Fuente: Elaboración propia.