



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

**“METEPANTLE” SISTEMA AGROFORESTAL TRADICIONAL,
COMO SERVICIO HIDROLÓGICO, EN LA MICROCUENCA RIO
COXCACOACO.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA

Nandi Espino Espinoza

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ



CHAPINGO, TEXCOCO DE MORA, ESTADO DE MÉXICO, MAYO 2026

**"METEPANTLE" SISTEMA AGROFORESTAL TRADICIONAL, COMO
SERVICIO HIDROLÓGICO, EN LA MICROCUENCA RÍO COXCACOACO.**

Tesis realizada por Nandi Espino Espinoza bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

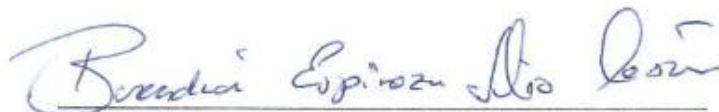
**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR



DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. JULIO CESAR BUENDIA ESPINOZA

ASESOR



DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
DEDICATORIAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Hipótesis	4
1.2 Objetivo General	4
1.3 Objetivos Particulares	4
1.4 Estructura de la Tesis	5
1.5 Literatura Citada	6
2. MARCO TEÓRICO	1
2.1 Sistemas agroforestales tradicionales	1
2.2 Interacción agroforestería y suelo	4
2.3 Recarga de Acuíferos	6
2.4 Infiltración	7
2.5 Disponibilidad de agua en los cultivos	8
2.6 Las terrazas agrícolas en la microcuenca Coxacoaco: definición, tipología del metepantle	9
2.7 Producción de Metepantle en terrazas	10
2.8 Literatura Citada	13

3.	Dinámica temporal de la humedad del suelo en sistemas productivos: interacción entre manejo, textura y precipitación	20
3.1	RESUMEN.....	20
3.2	ABSTRACT	22
3.3	Introducción	23
3.4	Materiales y Métodos.....	25
3.4.1	Área de estudio	25
3.4.2	Sitio Experimental.....	26
3.4.3	Diseño experimental.....	26
3.4.4	Caracterización del suelo	29
3.4.5	Mediciones de la precipitación y humedad del suelo.....	30
3.4.6	Análisis Estadístico.....	32
3.4.7	Estimación de medias ajustadas y comparaciones múltiples	33
3.4.8	Análisis de la dinámica temporal	34
3.5	Resultados.....	35
3.5.1	Caracterización de variables físicas y químicas del suelo.....	35
3.5.2	Ajuste del modelo y estructura de la variación	36
3.5.3	Efectos principales e interacción sistema–tiempo	38
3.5.4	Comparación de medias estimadas con el modelo de ajuste entre sistemas	39
3.5.5	Dinámica temporal de la humedad del suelo.....	40
3.5.6	Tendencias temporales y tasas de cambio	41
3.5.7	Evaluación en distintos momentos del tiempo.....	44
3.6	Discusión	45
3.6.1	Análisis de los sistemas sobre la humedad del suelo.....	45
3.6.2	Dinámica temporal e interacción sistema–tiempo	46

3.6.3	Influencia de las propiedades edáficas.....	47
3.6.4	Interacción precipitación y la altitud.....	48
3.6.5	Implicaciones hidrológicas y de manejo	48
3.7	Conclusiones	50
3.8	Literatura citada	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Promedios y desviaciones estándar de los contenidos de partículas en el suelo.	36
Cuadro 2. Coeficientes de regresión (β) del modelo matemático de ajuste y valores de significancia de los factores determinantes de humedad en el suelo..	37
Cuadro 3. Análisis de varianza del modelo lineal mixto para la humedad del suelo en función del sistema productivo, el tiempo y las variables edáficas	38
Cuadro 4. Tendencias de humedad para cada sistema por pendiente.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Terrazas, San Dieguito Xochimanca, Texcoco.	3
Figura 2. Esquema del Metepantle, tomado de López (2020).	10
Figura 3. Metepantle nopal y terraza de avena.	11
Figura 4. Terraza higo y metepantle de magueyes.	12
Figura 5. Mapa de Ubicación de la Microcuenca Coxcacaco y ubicación de sitio experimental, Texcoco, México.	26
Figura 6. Perfil topográfico del sitio experimental.	27
Figura 7. Diseño de Muestreo: Identificación de los sitios de muestreo (puntos azules) en la terrazas y metepantles.	28
Figura 8. Muestreo de Suelo: recolección y etiquetado.	30
Figura 9. Pluviómetro Davis® para el registro de la precipitación.	31
Figura 10. Medición de humedad en el suelo.	32
Figura 11. Medias marginales de la humedad del suelo (%) por sistema productivo, obtenidas mediante el modelo lineal mixto. Las barras representan los valores promedio ajustados y las líneas horizontales los intervalos de confianza al 95%.	39
Figura 12. Dinámica temporal de la humedad del suelo en los diferentes sistemas productivos y precipitación registrada durante el periodo de evaluación.	41

DEDICATORIAS

A mí, por la perseverancia, la paciencia y el coraje de llevar este proyecto hasta el final.

A Paty mamá, por ser mi primera maestra de la vida. Tu amor incondicional y tus palabras de aliento que aún me acompañan en mi andar fueron y serán el motor para no rendirme.

A José papa, por tu ejemplo de trabajo en campo, luchador y aguerrido. Por enseñarme que la fuerza está en la perseverancia y que los sueños se construyen paso a paso.

A Xarani y a Manuel por estar siempre presentes, por las risas que alivian el alma y por recordarme que, pase lo que pase, estamos juntos.

A Yun, tu apoyo discreto y por ser parte de esta familia que me sostiene.

A José Armando, que sepas que el estudio y la pasión por conocer pueden abrir caminos insospechados.

Tíos Paty, Raudel y Raudelito, gracias por esas tardes y largas noches de estudio, en su cálida casa.

Amiga Ivon, por compartir consejos y apoyo incondicional cuando sentía que ya no podía más, gracias por compartirme a tu familia mis niñas Vane, Meli.

Y de manera muy especial, al señor Gumerindo y su familia, quien sin más recompensa que la confianza me permitió trabajar en sus parcelas. Gracias a usted esta investigación se pudo realizar.

Para Paty y Pablo Espinoza. Aunque ya no están aquí para celebrar físicamente este logro, sé que me acompañaron y me dieron fuerza en cada paso de este camino.

A todos ustedes, mi más profundo y eterno agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado durante mi formación en el programa de maestría, el cual fue fundamental para dedicarme de lleno a mis estudios e investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado de Ciencias en Agroforestería para el desarrollo Sostenible por brindar el espacio para mi desarrollo profesional.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, al Dr. Julio César Espinoza Buendía y al Dr. David Cristóbal Acevedo, excelentes investigadores, por su invaluable guía, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso académico.

A José Espino, Xarani Espino y José Armando Espino por el acompañamiento y apoyo en campo.

A Mario Espinoza por compartir su conocimiento y pasión de la producción de pulque en el metepantle.

Aron García Olivares por el perfil topográfico y lo aprendido en campo.

A la C. María Dolores Coronel Sánchez por su ayuda a lo largo de mi estancia en la maestría.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Nandi Espino Espinoza

Fecha de Nacimiento: 23 de marzo de 1992

Lugar de Nacimiento: Ciudad de México, México

CURP: EIEN920323MDFSSN04

Profesión: Licenciada en Biología Ambiental

Cedula: 10101369



Desarrollo Académico

Bachillerato: Bachillerato Tecnológico de Texcoco, México, 2008-2011

Licenciatura: Biología Ambiental, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, Estado de México. 2011-2015.

Desarrollo profesional

Técnico Auxiliar en campo en la Campaña Nacional de Moscas de la Fruta, en el Comité de Sanidad Vegetal de Morelos A.C. 2016-2017.

Profesional Fitosanitario en el Programa de Vigilancia Epidemiológica Contra Moscas Exóticas de la Fruta, en el Comité de Sanidad Vegetal de Morelos A.C. 2017-2020.

Subjefe Departamento 4, responsable del Programa Operativo de Diagnostico de Morelos, por Instituto Interamericano de Cooperación a la Agricultura (IICA). 2020-2021.

Técnico por parte de la Subdirección de capacitación para la sustentabilidad en la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR), en la Ciudad de México. 2022.

Técnico en el área de Producción de Jitomate en la empresa Agro Ashnan de México S.A. de C.V. 2023

RESUMEN GENERAL

“METEPANTLE” SISTEMA AGROFORESTAL TRADICIONAL, COMO SERVICIO HIDROLÓGICO, EN LA MICROCUENCA RIO COXCACOACO.

La presencia de varios estratos de vegetación en los sistemas agrícolas garantiza una mejor cubierta vegetal, lo que se traduce en una mayor cantidad de materia orgánica, así como en un incremento en la retención e infiltración de agua. Por esta razón, surge la necesidad de evaluar la cantidad de humedad que retienen los sistemas agroforestales, en específico los sistemas tradicionales conocidos como metepantles en comparación con los sistemas de manejo convencional. La investigación se llevó a cabo durante la temporada de lluvias del año 2025 en la Microcuenca del Río Coxcacaco, ubicada en el ejido de la comunidad de San Dieguito Xochimanca, Texcoco, Estado de México. El experimento en campo consistió en la evaluación de cuatro terrazas y dos metepantles con diferentes arreglos forestales y agrícolas: terraza con cultivo de maíz (TM), terraza con nopal xoconoxtle (TX), terraza con higos y nopales (THN), terraza con avena (TA), metepantle con frutales (Metfrut) y metepantle con nopales (Metnop). Para analizar la dinámica de la humedad del suelo, se empleó un modelo lineal mixto, en el que se incorporaron efectos fijos y aleatorios. Los resultados demostraron que la dinámica de la humedad del suelo está determinada fundamentalmente por el tipo de sistema productivo, el tiempo y el contenido de arcilla. Se observó que la terraza de avena (TA) presentó la mayor retención de humedad durante el periodo de precipitación, superando significativamente al resto de los sistemas estudiados. En conclusión, se evidencia que los sistemas productivos no solo difieren en los volúmenes totales de agua que logran retener, sino en la forma dinámica en que responden al paso del tiempo y a la precipitación. Esto destaca la importancia de la estructura física del suelo y el manejo agrícola en la conservación hídrica.

Palabra clave: Sistemas agroforestales, humedad del suelo, metepantles, modelo lineal mixto, dinámica del agua.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Nandí Espino Espinoza

Director: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

GENERAL ABSTRACT

“METEPANTLE” TRADITIONAL AGROFORESTRY SYSTEM AS A HYDROLOGICAL SERVICE IN THE COXCACOACO RIVER MICRO-BASIN

The presence of multiple vegetation strata in agricultural systems guarantees better vegetative cover, which translates into a greater amount of organic matter, as well as an increase in water retention and infiltration. For this reason, the need arises to evaluate the amount of moisture retained by agroforestry systems, specifically the traditional systems known as *metepantles*, compared to conventional management systems. The research was carried out during the 2025 rainy season in the Coxcacacoaco River Micro-basin, located in the ejido of the San Dieguito Xochimanca community, Texcoco, State of Mexico. The field experiment consisted of evaluating four terraces and two *metepantles* with different forestry and agricultural arrangements: terrace with maize crop (TM), terrace with xoconostle cactus (TX), terrace with figs and prickly pears (THN), terrace with oats (TA), *metepantle* with fruit trees (Metfrut), and *metepantle* with prickly pears (Metnop). To analyze soil moisture dynamics, a linear mixed model was used, incorporating fixed and random effects. The results demonstrated that soil moisture dynamics are fundamentally determined by the type of productive system, time, and clay content. It was observed that the oat terrace (TA) presented the highest moisture retention during the precipitation period, significantly surpassing the rest of the studied systems. In conclusion, it is evident that productive systems differ not only in the total volumes of water they manage to retain but also in the dynamic way they respond to the passage of time and precipitation. This highlights the importance of soil physical structure and agricultural management in water conservation.

Keywords: Agroforestry systems, soil moisture, *metepantles*, linear mixed model, water dynamics.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Nandi Espino Espinoza

Director: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El recurso agua es esencial para la vida; es un elemento fundamental para el funcionamiento de los ecosistemas y su disponibilidad depende de la dinámica del ciclo hidrológico, en el cual intervienen procesos como la evapotranspiración, la precipitación, la transpiración y los escurrimientos, así como variables climáticas, las características del suelo, la cobertura vegetal y la ubicación geográfica. Esta dinámica permite la recarga de los acuíferos, proceso mediante el cual se repone el agua subterránea y se contribuye al suministro de agua para las actividades humanas y agrícolas.

En México, la disponibilidad y calidad del agua enfrentan importantes desafíos. Se estima que una proporción considerable de los cuerpos de agua (60%) presenta algún grado de contaminación, mientras que numerosos acuíferos (157%) muestran condiciones de sobreexplotación (Sosa Rodríguez, 2025). Asimismo, la pérdida de cobertura vegetal ha modificado diversos procesos ecosistémicos relacionados con la regulación hídrica. Este contexto ha generado un interés creciente por identificar sistemas productivos capaces de contribuir a la conservación del agua y a la mejora de los procesos hidrológicos.

Estudios realizados en zonas semiáridas de México han demostrado que algunos sistemas con componentes arbóreos presentan una mayor capacidad para conservar la humedad del suelo en comparación con cultivos anuales de temporal (Pulido-Esquivel et al., 2025). Este comportamiento se atribuye principalmente a la protección que proporciona la cobertura vegetal, al aporte de materia orgánica y a la reducción de las pérdidas de agua por evaporación. De manera complementaria, otros estudios han documentado que el microclima generado bajo el dosel arbóreo y la acumulación de hojarasca favorecen la retención de humedad en el suelo (Kokila et al., 2024).

La infiltración del agua en el suelo ha sido analizada en diversos sistemas agrícolas, enfocándose principalmente en los monocultivos convencionales. Un caso representativo es la investigación de Hernández et al. (2017) en la cuenca

del lago de Zirahuén, Michoacán. En dicho estudio, se calcularon los niveles de infiltración mediante modelos matemáticos alimentados por variables físicas del suelo, tales como la humedad, la conductividad hidráulica, la tensión y los registros de lluvia. El objetivo principal fue determinar la disponibilidad hídrica de la región para la gestión del uso sostenible del agua.

En la región Texcoco no está exento de los problemas de la crisis hídrica del país, actualmente está sobreexplotado, a pesar de su alto grado de explotación aun es una fuente de abastecimiento para la población (CONAGUA, 2024).

Los cambios de uso de suelos y la cubierta vegetal derivado de diferentes actividades antrópicas han generado impactos negativos en los servicios ecosistémicos que contribuyen a la pérdida de los recursos como el agua (Brauman et al., 2007).

La presencia de varios estratos garantiza una mejor cubierta vegetal, mayor cantidad de materia orgánica, mayor retención del agua e infiltración. De acuerdo a dicho efecto hidrológico favorable surge la necesidad de evaluar la cantidad de humedad que aportan los metepantles los cuales son sistemas agroforestales tradicionales representativos de un gran interés biocultural (Moreno-Calles et al., 2014), técnica agrícola utilizada presumiblemente por favorecer la retención de agua y la conservación de suelos, declarado patrimonio mundial agrícola y representativo de México.

La Microcuenca del Río Coxcacaco, en Texcoco, Estado de México, constituye un ecosistema de gran importancia desde la perspectiva ambiental. Es parte de la subcuenca Texcoco-Zumpango y su red de drenaje superficial es abastecida por las aguas de la Sierra Nevada (Latargère, 2023). La microcuenca tiene una superficie de 80 km², y la longitud de su cauce principal es de 14.2 kilómetros el cual establece una conexión hidrológica y territorial entre las comunidades de San Nicolás Tlaminca, San Miguel Tlaixpan y San Dieguito Xochimanca (CONANP, 2021).

Esta microcuenca, con una larga historia ecológica y social, alberga una biodiversidad importante que contribuye al mantenimiento de los procesos ecológicos de la región. No obstante, presenta problemas de contaminación y disminución del flujo hídrico, situación que preocupa a las comunidades que dependen de sus aguas para abastecerse.

El deterioro de los recursos naturales, así como el crecimiento de la población ha provocado que el recurso agua cada vez sea más limitado, debido a que el flujo de los manantiales que abastece a las comunidades ha mermado drásticamente, como resultado de la reducción de la cobertura vegetal, la cual puede afectar los procesos de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar el sistema agroforestal tradicional metepantle, que data de hace más de 2,000 años (Sánchez & Pérez, 2016), sistema representativo en las comunidades de San Miguel Tlaixpan, San Nicolás Tlaminca y San Dieguito Xochimanca con el objetivo de cuantificar la retención de agua del sistema tradicional metepantle y compararla con la de otros sistemas productivos convencionales. Con el estudio se podría cuantificar de manera más efectiva la contribución a la recarga potencial hídrica al acuífero Texcoco por la microcuenca del Río Coxcacaco con el uso de diferentes sistemas productivos, y generar conciencia de la importancia de los sistemas agroforestales en los productores agrícolas y habitantes de las comunidades previamente citadas, así como de otras comunidades de la región de Texcoco y de otros sitios del país. Este estudio busca caracterizar esos sistemas y evaluar su efecto sobre la dinámica de la humedad del suelo, ofreciendo así información útil para el manejo y conservación de los recursos suelo y agua en la región.

La investigación proporcionará una comprensión más profunda de la interacción entre los ecosistemas productivos y la dinámica de la humedad del suelo, generando información que contribuya al diseño de estrategias de conservación y manejos sostenible del recurso hídrico en la microcuenca.

1.1 Hipótesis

Los sistemas agroforestales con metepantle modifican favorablemente los parámetros hidráulicos del suelo, lo que incrementa significativamente su capacidad de retención de agua y prolonga su disponibilidad temporal, favoreciendo una mayor conservación de la humedad del suelo en respuesta a la precipitación, en comparación con los sistemas convencionales.

1.2 Objetivo General

Evaluar comparativamente la dinámica de humedad del suelo entre sistemas agroforestales con metepantle y cultivos en terrazas convencionales, mediante el análisis de sus parámetros hidráulicos y su respuesta temporal a los eventos de precipitación, en la microcuenca del Río Coxcacaco, durante la temporada de lluvias del 2025.

1.3 Objetivos Particulares

1. Caracterizar los parámetros hidráulicos de los suelos de los sistemas de producción estudiados, mediante el análisis de laboratorio de muestras recolectadas en campo durante la temporada de lluvias de 2025.
2. Cuantificar la variación temporal y espacial de la humedad en el suelo en campo mediante reflectometría de dominio temporal (TDR), de manera simultánea al registro de la precipitación local en los sistemas evaluados.
3. Determinar la correlación entre los eventos de precipitación y la dinámica de la humedad del suelo, para identificar el efecto de conservación de humedad en los sistemas con metepantle respecto a los sistemas convencionales.

1.4 Estructura de la Tesis

Esta tesis está estructurada en tres capítulos. El primer capítulo corresponde a la "Introducción general", presenta el contexto de la investigación, destacando la problemática relacionada con la retención de agua en la región la Microcuenca Rio Coxcacaco. Se justifica la necesidad de evaluar y comparar los sistemas agrícolas convencionales del sistema tradicional de metepantle.

El segundo capítulo corresponde a la revisión de literatura, donde se presenta la conceptualización y los antecedentes necesarios para la comprensión y sustento teórico del estudio.

El capítulo 3 está constituido por el artículo de esta investigación, titulado **"Dinámica temporal de la humedad del suelo en sistemas productivos: interacción entre manejo, textura y precipitación"**. En este capítulo se detalla la metodología del experimento de campo y del tratamiento de la información, se presentan y discuten los resultados con un sólido sustento estadístico, y se concluyen los hallazgos de lo obtenido en los seis sistemas de producción agrícola evaluados.

1.5 Literatura Citada

- Brauman, K. A., Daily, G., Duarte, T., & Mooney, H. (). *The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services*. Retrieved June 1, 2026, from <https://papers.ssrn.com/abstract=1076747>
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*. Ciudad de México: CONAGUA. - *Buscar con Google*.
- CONANP. (2021). *Programa de manejo Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco*.
- Kokila, A., Nagarajaiah, C., Hanumanthappa, D. C., Shivanna, B., Sathish, K., & Mahadevamurthy, M. (2024). Effect of Tree Canopy Cover on Soil Moisture Dynamics in Different Agroforestry Systems under Semi-arid Condition. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(9), 485–495. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2024/V14I94432>
- Latargère, J. (2023). Analizar la transformación de los ríos Coxacoaco y Cuautla para impulsar nuevos procesos de cambio. *Sociedad y Ambiente*, (26), 1–32. <https://doi.org/10.31840/SYA.VI26.2753>
- Moreno-Calles, A. I., Jazmín Galicia-Luna, V., Casas, A., Toledo, V. M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D., & Camou-Guerrero, A. (2014). *LA ETNOAGROFORESTERÍA: EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES TRADICIONALES DE MÉXICO*.
- Pérez Sánchez, J. M., & Juan Pérez, J. I. (2016). Agricultura de terrazas en el cerro Tenismo, Toluca, México. *Terra*, 32(51), 163–184. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892016000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Prado Hernández, J. V., Víctor, J., Hernández, P., Ramírez, P., Acevedo, D. C., Carrillo García, M., Raúl, F., Saucedo, H., & Ruíz, A. M. (2017).

EVALUATION OF GREENAMPT INFILTRATION EQUATION IN SOME AGRICULTURAL SOILS IN MEXICO, USING USDA INFORMATION AND A MODIFIED METHOD FROM BROOKS AND COREY. *Interciencia*, 42(9), 563–569.

Pulido-Esquivel, A. Y., Prado-Hernández, J. V., Buendía-Espinoza, J. C., & García-Núñez, R. M. (2025). Agroforestry Systems Enhance Soil Moisture Retention and Aquifer Recharge in a Semi-Arid Mexican Valley. *Water (Switzerland)*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/W17101488>

Sosa Rodríguez, F. S. (2025). La crisis hídrica en la Ciudad de México: estamos cerca del Día Cero. *Investigación En Diseño 2. Contribuciones Para El Reposicionamiento de La Agenda Científica*, 105–128. <https://doi.org/10.24275/UAMA.6341.13003>

2. MARCO TEÓRICO

El análisis de los sistemas agroforestales en los últimos años ha cobrado gran relevancia, con respecto a estudios socioambientales relacionados principalmente con la producción de alimentos, el cambio climático, la degradación del suelo y la disminución de la disponibilidad hídrica.

Estudios recientes reconocen que los sistemas agroforestales y las formas en cómo están constituidos favorecen a la interacción de los diferentes ecosistemas, al combinar especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, inciden en los procesos biofísicos fundamentales interactuando con la dinámica de la materia orgánica, la regulación microclimática, la conservación del suelo y el ciclo hidrológico.

2.1 Sistemas agroforestales tradicionales

Los sistemas agroforestales son un arreglo espacial o secuencia temporal caracterizado por diferentes tecnologías de uso del suelo, se compone de especies leñosas perennes, la asociación de otros cultivos agrícolas y la presencia de animales (Burley & Speedy AW, 1998). En estos sistemas se desarrollan diferentes procesos para potencializar interacciones ecológicas entre sus diferentes componentes, biológicos, cultural y económico (Nair, 1997). La importancia de los sistemas agroforestales es recuperar y conservar prácticas tradicionales que mantienen su identidad biocultural en las comunidades.

Existe una gran clasificación de estos sistemas cada uno con diferentes arreglos que los diferencian, dentro de estos están los sistemas agroforestales tradicionales caracterizados por las prácticas que emplean en las formas de uso de suelo acompañados de larga historia (Toledo & Bassols, 2009) y preservación cultural.

Los sistemas agroforestales tradicionales, como formas tecnológicas que interactúan entre el hombre, la tierra, los cultivos y ciertas especies de animales domésticos, son importantes porque están integrados a estrategias múltiples de uso, proveen diversos beneficios a los seres humanos a escala local, regional y

global; conservan especies endémicas y de importancia cultural, conservando conocimiento y prácticas tradicionales (Moreno C., M.Toledo, & Casas, 2013) y tienen un mínimo uso o nulo de insumos provenientes de la agricultura moderna.

En México se han identificado diversos sistemas agrícolas tradicionales, estos ofrecen la posibilidad para una agricultura sostenible, considerados por no requerir grandes esfuerzos de inversión económica, están adaptados al ambiente local, hacen uso de los recursos naturales, son capaces de tomar ventaja en la producción a nivel parcela, y mantienen una diversidad espacial y temporal (Sánchez, 2012).

Para el caso de México, se encuentran las terrazas y bancales que son consideradas también como obras de conservación para el control de la erosión de los suelos. Las terrazas se refieren a construcciones con paredes de piedra o adobe, que son estrechas y se encuentran en laderas muy pronunciadas, tienen como efecto de retener el agua de lluvia (Palerm, 1992), cuyas principales características son: reducir la erosión, aumentar la infiltración de agua para los cultivos, disminuir el escurrimiento hacia aguas abajo y acondicionar terrenos agrícolas.

La construcción de terrazas ha sido asociada con las condiciones climáticas como la temperatura y precipitación, especialmente se asocian con los climas áridos y semiáridos. La condición climática es importante porque se considera principalmente la disponibilidad de agua.

Los sistemas de terrazas funcionan como una solución integrada de conservación, estos no solo evitan la erosión y mejoran la retención de agua para impulsar la producción agrícola, sino que también generan beneficios ecosistémicos cuantificables. Estudios respaldan su eficacia, ya que muestran reducciones significativas en la escorrentía superficial y la pérdida de sedimentos (más del 41.9% y 52%, respectivamente); además, de un aumento notable en la humedad del suelo (Adgo et al., 2021; Shi et al., 2004).

Además de su aprobada eficacia técnica, las terrazas agrícolas (Figura 1) son reconocidas como un patrimonio cultural, por su atractivo estético, su ingeniosa construcción y su testimonio histórico sobre la gestión sostenible del suelo y el agua, lo que les dan relevancia local, así como como una herencia de importancia mundial.



Figura 1. Terrazas, San Dieguito Xochimanca, Texcoco.

Actualmente en México, uno de los sistemas agroforestales tradicionales en terrazas ha sido reconocido como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) (FAO, 2025). Se trata del metepantle, metipantli o metepancle (del náhuatl metl, "maguey", y nepantla, "en medio", o panctli, "pared" o "rodeado de"). Este sistema es característico de tierras en laderas pronunciadas. Las zonas secas con largas estaciones sin precipitación y las bajas temperaturas en algunas épocas del año son rasgos predominantes en los escenarios agrícolas de México (Rojas Rabiela, 1991). Por ello, en estos sistemas, el aprovechamiento y la conservación del agua son una preocupación constante para los campesinos (Wilken, 1969), ya que de ello dependen sus cultivos.

Un metepantle es un terreno de cultivo que se caracteriza por tener un borde o muro de contención de tierra donde se cultivan diversos cultivos, árboles maderables, magueyes, frutales, maíz, entre otros; aparte de proveer alimentos, tiene como funciones la retención del suelo, el control de la erosión, la formación de cercos vivos y la presencia de zanjas a lo largo del bordo que permiten conservar humedad, captar agua de lluvia y favorecer la acumulación de materia orgánica.

Entre los principales componentes de los metepantles destaca la forma en la que se realizan, este puede o no tener, cajetes, zanjas o estribos, los cuales son elementos que ayudan a la captación de agua y materia orgánica (Bilbao, 1979). Su construcción depende de la inclinación del terreno y el tipo de suelo. Tienen como principal función moderar la velocidad del agua y lo más importante aportar humedad a los cultivos.

El sistema del metepantle preserva las semillas nativas, mantiene la biodiversidad de las tierras secas y fortalece los sistemas alimentarios y los medios de subsistencia locales, ofreciendo resiliencia y continuidad cultural en una de las regiones de México más vulnerables al cambio climático (FAO, 2025).

2.2 Interacción agroforestería y suelo

Uno de los pilares de la agroforestería es su impacto positivo en las propiedades físicas y químicas del suelo, pero además promueve la interacción de diferentes especies que favorecen a la composición del suelo, así como en la regulación hídrica (Abbas et al., 2024). Entre las propiedades físicas más relevantes están la textura y la densidad aparente, las cuales presentan una variabilidad espacial significativa dependiendo del terreno y el tipo de cultivo. La influencia de la textura en el agua del suelo se refleja tanto en su capacidad de almacenamiento como en su desplazamiento, y dicha influencia está determinada por las proporciones de arcilla y arena presentes (Henríquez et al., 2005.; Porta Casanellas et al., 2003). Algunas propiedades físicas relacionadas con el agua son la conductividad hidráulica (K), parámetro que indica la capacidad del suelo y los

sedimentos para transmitir agua a través de los poros (Goodarzi et al., 2024), lo que permite evaluar la velocidad de flujo del agua en el subsuelo.

Otro parámetro evaluado con efectos positivos de la agroforestería en el suelo son la densidad aparente. Esta propiedad física juega un papel importante en la retención de humedad y en la disponibilidad de agua; un estudio reciente reportó que la densidad aparente fue mayor en tierras cultivables en las que se integraron árboles (Panagos et al., 2024). Además de favorecer el movimiento del agua y nutrientes, reduce la erosión del suelo y aumenta el crecimiento de las raíces y los rendimientos de los cultivos (Maddonni et al., 1999).

La interacción de arreglos forestales con pastos en suelos arcillosos ha favorecido la conductividad hidráulica saturada, con respecto a los suelos con cultivos (Seobi et al., 2005). Esto debido a una descomposición de las raíces profundas de árboles, dando como resultado mayor proporción de poros más grandes al suelo, por lo que mejora las condiciones hidráulicas del suelo en comparación de un monocultivo (Cadisch et al., 2004). Estas modificaciones en las propiedades físicas del suelo pueden influir directamente en la retención y disponibilidad temporal de la humedad, por lo que resultan de especial interés en la evaluación de sistemas agroforestales tradicionales como el metepantle.

Así mismo, la composición de diferentes especies arbóreas favorece un enriquecimiento de nutrientes, principalmente provenientes de la descomposición de la materia orgánica, generada por la acumulación de hojarasca y ramas de árboles (Maharjan et al., 2024). La materia orgánica contribuye a mejorar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua, por lo que constituye un factor relevante en la dinámica de la humedad del suelo.

Además de la interacción dentro de los sistemas agroforestales y las características particulares de cada uno de ellos, su función está determinada por las estrategias de manejo, principalmente los métodos de cultivos que se emplean, la fertilización que se aplique, el manejo de los residuos del cultivo, el tamaño del terreno y el momento en que se cosecha (Feliciano et al., 2018).

También se encontró que los sistemas agroforestales tienen la capacidad de almacenar cantidades mayores de materia orgánica y nutrientes que los monocultivos (Junior Yannick Ngaba et al., 2023), favoreciendo a la fertilidad del suelo y potenciando los servicios ecosistémicos. Estas condiciones pueden contribuir a una mayor conservación de la humedad del suelo y a una mayor estabilidad de su dinámica temporal.

2.3 Recarga de Acuíferos

La recarga de acuíferos se produce casi en su totalidad de forma natural mediante procesos de infiltración de agua proveniente de la precipitación. Dicha recarga está condicionada por múltiples factores asociados al tipo de cobertura vegetal (Matus et al., 2009). Las transformaciones en la vegetación y el aumento de la erosión de los suelos pueden reducir la velocidad de infiltración; aunque la recarga subterránea no es evaluada directamente en esta investigación, los procesos de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo están estrechamente relacionados con la dinámica de la humedad del suelo.

El proceso de recarga de los acuíferos está determinado por variables climáticas, edafológicas, topográficas y de cobertura vegetal. Las variaciones del clima son importantes en lo que respecta al comportamiento de las lluvias (Scanlon, 2011; Xu, 2011).

Una forma de calcular la cantidad de agua que entra al sistema es mediante la medición de agua en el suelo, a través de un balance hídrico del agua en el que se consideran variables biofísicas como: la precipitación, profundidad de raíces, cobertura vegetal, interceptación de lluvia follaje, entre otras (Figueredo, 2019). Para el caso especial de los de cultivos en terrazas, aún es limitado el conocimiento sobre su comportamiento hidrológico. Para su evaluación cuantitativa se han sugerido modelos como Kostikov (Kunst et al; Mao et al., 2024) utilizados para contrastar la infiltración entre usos de suelo, con base en las propiedades físicas que influyen en el ingreso y almacenamiento del agua.

En este contexto, el estudio de la humedad del suelo representa una herramienta útil para evaluar la respuesta hidrológica de los sistemas agroforestales y de terrazas, particularmente en regiones donde el agua constituye un recurso limitante.

2.4 Infiltración

Comprender las propiedades de hidrodinámicas del suelo es fundamental para la conservación de recursos y el desarrollo de los cultivos. La conductividad hidráulica es un factor clave en el proceso de la infiltración.

La infiltración se define como el proceso de penetración del agua en el suelo desde la superficie por efecto de la fuerza de gravedad y de la fuerza capilar (Avila, 2025). Se determina a partir de la medición de la velocidad en la que el agua penetra el suelo (lámina de agua por unidad de tiempo), y se expresa en centímetros por hora (cm/h) o en milímetros por hora (mm/h).

El agua que penetra el suelo a través del proceso de infiltración, en el interior del suelo se distribuye en los horizontes o capas; a este movimiento del agua se le asocia la conductividad hidráulica de tal forma que las propiedades como la porosidad, textura y estructura influyen de manera importante.

La capacidad de infiltración del suelo es un indicador que refleja de forma directa el impacto de las prácticas productivas y el manejo de la tierra (Hernández Saldaña et al., 2025). Cuando dicha capacidad es alterada, se modifican otros componentes del ciclo hidrológico, especialmente la escorrentía superficial. Por ejemplo, la agroforestería en comparación con los monocultivos mejora la capacidad de infiltración (promedio de + 50%) y la capacidad de retención de agua (+81% en promedio) lo que proporciona un mejor manejo del recurso hídrico (De Stefano & Jacobson, 2017). El incremento en la infiltración y en la capacidad de retención de agua representa uno de los principales mecanismos mediante los cuales los sistemas agroforestales pueden modificar la dinámica de la

humedad del suelo, aspecto que resulta central en la evaluación del sistema tradicional metepantle.

2.5 Disponibilidad de agua en los cultivos

Las coberturas vegetales del suelo se relacionan positivamente con la infiltración, a través de sus propiedades como la textura del suelo, la porosidad, el grado de compactación, el contenido materia orgánica, dinámica radicular y la estimulación de la actividad biológica del suelo (Garcia-Fayos, 2004).

Se ha encontrado que la tipología del suelo y la vegetación son indicadores precisos para explicar los procesos de escorrentía e infiltración en las siembras sobre surcos y en las siembras con árboles (Herrera & Posada , 2020). Las zonas con cobertura vegetal son vitales para recuperar el funcionamiento hidrológico (Blanco, 2017); la inclusión de árboles en zonas de pastos aumenta la infiltración y microporosidad de los suelos. Se han encontrado valores infiltración de 3 a 6 veces más, en el suelo de matorral, que cubren el 45% de superficie que en aquellos suelos que no tienen vegetación (Garcia-Fayos, 2004).

Lo anterior muestra que el ciclo del agua se relaciona con los tipos de cobertura, arbórea y herbácea, las cuales determinan la cantidad de agua que se infiltra en suelo; tal es el caso de los sistemas silvopastoriles (Rios , Andrade, & Muhammad, 2008), en donde se presentó una mayor infiltración en los pastos con árboles, este incremento es significativo ya que favorece a la disponibilidad del agua y su almacenamiento en el suelo.

La diversificación espacial y temporal de los cultivos favorecen las propiedades físicas de los suelos y se genera un mayor beneficio cuando la biomasa se incorpora al suelo. En algunas investigaciones se encontró que diferentes coberturas vegetales y la estacionalidad influyen en la estructura e infiltración de un suelo bajo labranza cero y con la incorporación de biomasa (Mario et al.2021, Rauber et. al.2025). Estas experiencias muestran que hay alternativas de producción que pueden favorecer una mayor retención y disponibilidad temporal

de agua en el suelo, aspecto de particular interés en sistemas agroforestales tradicionales como el metepantle.

El uso de cultivos de cobertura en las parcelas labradas convencionalmente condujo a un aumento de retención de agua; por lo tanto, el uso de labranza reducida, surcos de siembra angostos o cultivos de cobertura en las parcelas labradas convencionalmente resulta deseable para la mitigación de la erosión de los suelos y para la conservación del agua en el suelo (Vlček et al., 2022). Estudios recientes han demostrado que, a diferencia de los monocultivos, los cultivos agroforestales intercalados ayudan a promover servicios agroecosistémicos, además de aumentar los rendimientos de los cultivos y por consiguiente favorecen la mejora de la calidad de los suelos (Kimura et al., 2018; Ma et al., 2017). Investigaciones previas ya habían señalado que estos sistemas intercalados ayudan a mejorar la fertilidad del suelo (Du et al., 2019; Xia et al., 2019).

2.6 Las terrazas agrícolas en la microcuenca Coxacoaco: definición, tipología del metepantle

Las terrazas agrícolas son construcciones artificiales, en forma escalonada, con muros o bordes de diferentes materiales, destinadas a distintos cultivos: El terrazo es creado por las condiciones de los terrenos, principalmente en la parte media y alta de la microcuenca Coxacoaco donde las pendientes son más pronunciadas.

Dependiendo de la complejidad estructural y del nivel de alteración de la pendiente, se pueden diferenciar tres tipos principales de terrazas: las terrazas de ladera, formadas con muros de piedra (Figura 2); las terrazas de presas, ubicada en cauces de agua intermitentes; y los metepantles empleados en terrenos con pendientes suaves (López, 2020).

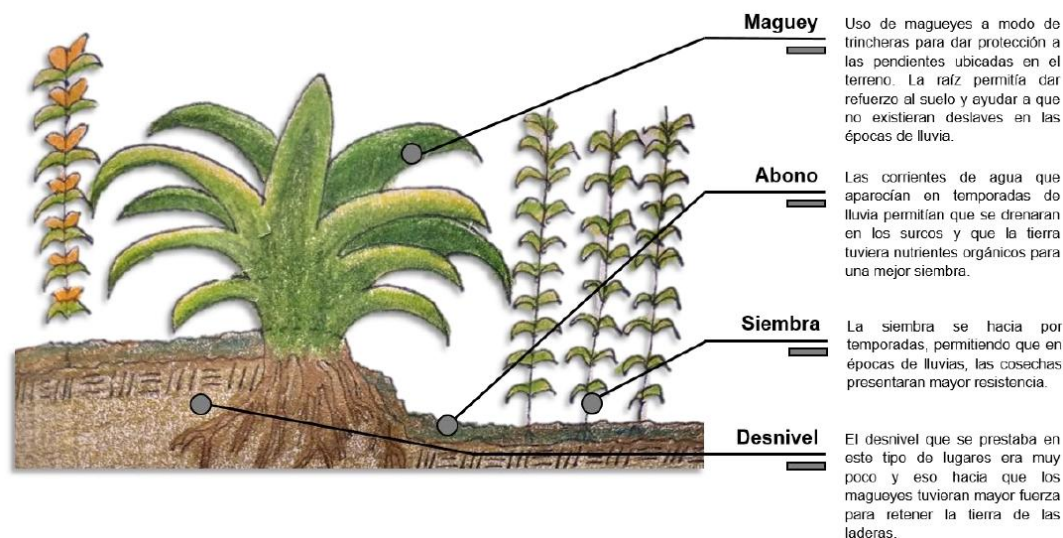


Figura 2. Esquema del Metepantle, tomado de López (2020).

El metepantle con un arreglo característico en la microcuenca Coxcacaco es principalmente con la siembra de magueyes en el bordo (o en ocasiones con nopales o árboles frutales), colocados en hileras, ya sean sencillas o dobles para dar refuerzo al terreno con ayuda de las raíces; este arreglo permite evitar el deslave, la creación de abonos naturales y la retención de humedad, considerado una producción agrícola de temporal. Estas características sugieren que el metepantle puede generar condiciones favorables para el almacenamiento y la conservación de la humedad del suelo, particularmente en terrenos con pendiente pronunciada.

2.7 Producción de Metepantle en terrazas

Debido a las condiciones del sitio de estudio, ubicado en la microcuenca Coxcacaco, en los años 70's se realizaron obras de conservación con el fin de mitigar la erosión del suelo y aumentar la retención de humedad, mismas que potencializaron la agricultura del sitio y la recuperación de las tecnologías agrícolas ancestrales, permitiendo integrar nuevos cultivos y la conservación de otros. Estas obras permitieron que se retomaran las prácticas agrícolas de la región, principalmente enfocadas a la producción de cultivos básicos, de los

cuales destacan el maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y haba (*Vicia Faba*) (Flores-Sánchez et al., 2012).

Las especies presentes en las terrazas, utilizadas tanto para consumo como para preservación ancestral, son: maíz (*Zea mays*); hileras de nopal xoconostle (*O. joconostle*) intercalado con árboles de durazno (*Prunus persica*); nopales (*Opuntia* spp.); tepozán o toposán (*Buddleja americana*); encino (*Quercus* spp.); pino (*Pinus leiophylla*); arbustos de romero (*Rosmarinus officinalis* L), higos (*Ficus carica*); y el cultivo de avena (*Avena sativa*) (Figura 3).



Figura 3. Metepantle nopal y terraza de avena.

La metepantles más representativos y predominantes que componen a las terrazas, están conformados por nopal y maguey por tratarse de especies resistentes a la sequía. También incorporan especies leñosas y frutales perennes con fines multipropósito, algunos de ellos son (Raj, Lal 2014): peras (*Pyrus*); manzana silvestre (*Malus* spp.) y membrillo (*Cydonia oblonga*); arboles nativos como tejocote (*Crataegus mexicana*) y capulín (*Prunus serotina*); arbustos como la siempre viva (*Sedum praealtum*), romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y rosas de castilla (*Rosa centifolia* L.). Como barreras de retención predominan el nopal spp.

y el maguey carrizo y ayoteco (*Agave spp.*) (Figueredo-Urbina et al., 2019) (Figura 4).



Figura 4. Terraza higo y metepantle de magueyes.

Esta composición de árboles y arbustos generalmente suele soportar bien la falta de agua cumpliendo funciones muy valiosas, principalmente los magueyes. El maguey, por ejemplo, al tener raíces extensas y superficiales ayudan a la retención del suelo. Las demás especies que componen el metepantle son utilizadas para uso alimenticio y para la preservación del ecosistema. Estas características contribuyen a la conservación del suelo y pueden favorecer la retención de humedad, aspectos relevantes en el funcionamiento de los sistemas agroforestales tradicionales.

2.8 Literatura Citada

- Abbas, F., Hammad, H. M., Ishaq, W., Farooque, A. A., Bakhat, H. F., Zia, Z., Fahad, S., Farhad, W., & Cerdà, A. (2024). The role of temperate agroforestry in mitigating climate change: A review. *Forest Policy and Economics*, 159, 103136.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110319>
- Adgo, E., Teshome, A., & Mati, B. (2021). Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3), 344–359.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.026>
- Avila, E. A. (2025). *Propiedades físicas de los suelos y su importancia en el desarrollo de cultivos*. 302.
- Bilbao, J. A. (1979). *Sistemas y prácticas agrícolas en una comunidad de Tlaxcala. Ponencia presentada en el 43 Congreso Internacional de Americanistas, Canadá. 91 p.* Sistemas y Prácticas Agrícolas En Una Comunidad de Tlaxcala. Ponencia Presentada En El 43 Congreso Internacional de Americanistas, Canadá. 91 p.
- Blanco, J. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 1-9 pp. doi:Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01
- Burley, J., & Speedy AW. (1998). Investigación Agroforestal Perspectiva Globales. *Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica*, 13.
- Cadisch, G., Willigen, P. de, Suprayogo, D., Mobbs, D. C., Noordwijk, M. van, & Rowe, E. C. (2004). Catching and competing for mobile nutrients in soils. *Below-Ground Interactions in Tropical Agroecosystems*:

Concepts and Models with Multiple Plant Components, 171–191.
<https://doi.org/10.1079/9780851996738.0171>

Garcia-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En F. Valladares, *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (págs. 309-334 p). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid.

De Stefano, A., & Jacobson, M. G. (2017). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry Systems* 2017 92:2, 92(2), 285–299. <https://doi.org/10.1007/S10457-017-0147-9>

Du, B., Pang, J., Hu, B., Allen, D. E., Bell, T. L., Pfautsch, S., Netzer, F., Dannenmann, M., Zhang, S., & Rennenberg, H. (2019). N₂-fixing black locust intercropping improves ecosystem nutrition at the vulnerable semi-arid Loess Plateau region, China. *Science of The Total Environment*, 688(4), 333–345.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.245>

FAO. (2025). *Sistema Agrícola Ancestral Metepantle en las Zonas Montañosas de Tlaxcala, México*. <https://www.fao.org/giahs/giahs-around-the-world/mexico-meteplante/en>

Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., & Nayak, D. R. (2018). Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 117–129. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.11.032>

Figueredo-Urbina, C. J., Arce-Cervantes, O., Castañeda-Ovando, A., Figueredo-Urbina, C. J., Arce-Cervantes, O., & Castañeda-Ovando, A. (2019). Diversidad de agaves utilizados para la producción de jarabe de aguamiel en el estado de Hidalgo, México. *Polibotánica*, 0(58), 265–290. <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.58.19>

- Flores-Sánchez, D., Navarro-Garza, H., Carballo-Carballo, A., & Pérez-Olvera, Ma. A. (2012). Sistemas de cultivo y biodiversidad periurbana: Estudio de caso en la Cuenca del Río Texcoco. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 9(2), 209–223.
- García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En F. Valladares, *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (págs. 309-334 p). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid.
- Goodarzi, M. R., Vazirian, M., & Niazkar, M. (2024). Hydraulic Conductivity Estimation: Comparison of Empirical Formulas Based on New Laboratory Experiments. *Water* 2024, Vol. 16, Page 1854, 16(13), 1854. <https://doi.org/10.3390/w16131854>
- Henríquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., Costarricense, F. S.-A., & 2005, undefined. (n.d.). La geostatística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging. *Redalyc.Org* C Henríquez, R Killorn, F Bertsch, F Sancho Agronomía Costarricense, 2005•redalyc.Org. Retrieved April 22, 2026, from <https://www.redalyc.org/pdf/436/43629206.pdf>
- Hernández Saldaña, L. V., Meneses Padilla, D. A., Ruiz-Ochoa, M. A., & Oviedo-Celis, R. A. (2025). Infiltration in forestry, livestock and agricultural soils, analysis for water management in Málaga Santander - Colombia. *Bosque*, 46(2), 157–167. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002025000200157>
- Herrera, D., & Posada, P. (2020). Metodologías de recarga de agua subterránea en un sistema de producción de *Tectona Grandis* Linn F.(Teca) en la Finca Yacoí. *Periodicidad Semestral*, 15, 29. Obtenido de
- Jhosep Antony Raj. (2014). *Agroforestry Theory and Practices* (Scientific Publishers, Ed.).

José M. Pérez Sánchez. (2012). *Terrazas y Metepantles: Manejo tierra y agua en una comunidad en el Altiplano Mexicano*.

Junior Yannick Ngaba, M., Said Mgelwa, A., Abdisa Gurmesa, G., Uwiragiye, Y., Zhu, F., Qiu, Q., Fang, Y., Hu, B., Rennenberg, H., Y Ngaba, M. J., Hu, B., Rennenberg, H., Mgelwa, A. S., Gurmesa, G. A., Zhu, F., Fang, Y., & Uwiragiye, Y. (2023). Meta-analysis unveils differential effects of agroforestry on soil properties in different zonobiomes. *Plant and Soil* 2023 496:1, 496(1), 589–607. <https://doi.org/10.1007/S11104-023-06385-W>

Kimura, E., Fransen, S. C., Collins, H. P., Stanton, B. J., Himes, A., Smith, J., Guy, S. O., & Johnston, W. J. (2018). Effect of intercropping hybrid poplar and switchgrass on biomass yield, forage quality, and land use efficiency for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, 111(1), 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.011>

Kuns, C. C. , L. R. , B. N. , A. M. , P. G. , & Godoy, J. (2003). *Rolado de fachinales e infiltración de agua en el suelo en el Chaco occidental argentino*. 105–106.

López, C. (2020, December). *Los molinos hidráulicos, como innovación tecnológica en las haciendas del siglo XVI*. Tesis de Maestría En Arquitectura y Urbanismo.

Ma, Y. hua, Fu, S. ling, Zhang, X. ping, Zhao, K., & Chen, H. Y. H. (2017). Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality. *Applied Soil Ecology*, 119(15), 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.028>

Maddonni, G. A., Urricariet, S., Ghera, C. M., & Lavado, R. S. (1999). Assessing soil quality in the rolling pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agronomy Journal*, 91(2), 280–287. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100020017x>

- Maharjan, M., Ayer, S., Timilsina, S., Ghimire, P., Bhatta, S., Thapa, N., Timilsina, Y. P., Lama, S., Yadav, V. K., & Okolo, C. C. (2024). Impact of agroforestry intervention on carbon stock and soil quality in mid-hills of Nepal. *Soil Security*, 16, 100164. <https://doi.org/10.1016/J.SOISEC.2024.100164>
- Mao, W., Zhu, Y., Huang, S., Han, X., Sun, G., Ye, M., & Yang, J. (2024). Assessment of spatial and temporal seepage losses in large canal systems under current and future water-saving conditions: A case study in the Hetao Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*, 291, 108615. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108615>
- Mario, E. E., Lucas, Z., Jesús, E., Chavarría, P., Luís, A., & Duicela, G. (2021). Evaluación multianual de las variables climatológicas y su relación con el balance hídrico para el cultivo de maíz duro. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*. <https://doi.org/10.46377/DILEMAS.V8I.2604>
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez Otárola, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica : Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*.
- Moreno-Calles, A. I., Jazmín Galicia-Luna, V., Casas, A., Toledo, V. M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D., & Camou-Guerrero, A. (2014). *LA ETNOAGROFORESTERÍA: EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES TRADICIONALES DE MÉXICO*.
- Nair, P. K. R. (1997). Directions in tropical agroforestry research: past, present, and future. *Agroforestry Systems* 1997 38:1, 38(1), 223–246. <https://doi.org/10.1023/A:1005943729654>
- Palerm Ángel. (1992). *Guía y lecturas para una primera práctica de campo. 2a edición corregida y aumentada*. "Sistemas Agrícolas En Mesoamérica Contemporánea" En Guía y Lecturas Para Una Primera Práctica de Campo, México: Universidad Autónoma de Querétaro. .

- Panagos, P., De Rosa, D., Liakos, L., Labouyrie, M., Borrelli, P., & Ballabio, C. (2024). Soil bulk density assessment in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 364(7), 108907.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108907>
- Porta Casanellas, J. autor/a, López Acevedo Reguerín, M. autor/a, & Roquero de Laburu, C. autor/a. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España Ediciones Mundi-Prensa.
- Rojas Rabiela. (1991, January). *Agricultura prehispánica*.
https://www.researchgate.net/publication/288261177_Agricultura_prehispanica
- Scanlon, B. R. (2011). Estimating groundwater recharge. *Estimating Groundwater Recharge*, 9780521863964, 1–245.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>
- Seobi, T., Anderson, S. H., Udawatta, R. P., & Gantzer, C. J. (2005). Influence of Grass and Agroforestry Buffer Strips on Soil Hydraulic Properties for an Albaqualf. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 893–901. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0280>
- Shi, Z. H., Cai, C. F., Ding, S. W., Wang, T. W., & Chow, T. L. (2004). Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China. *CATENA*, 55(1), 33–48. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00088-2)
- Toledo, V. M., & Bassols, N. B. (2009). La memoria biocultural. La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales. *Ciencias*, (096).
<https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/17958>
- Vlček, L., Šípek, V., Zelíková, N., Čáp, P., Kincl, D., & Vopravil, J. (2022). Water retention and infiltration affected by conventional and conservational tillage on a maize plot; rainfall simulator and infiltrometer comparison study. *Agricultural Water Management*, 271, 107800.
<https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107800>

Xia, J., Ren, J., Zhang, S., Wang, Y., & Fang, Y. (2019). Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 349(5), 25–35.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.032>

Xu, Y. (2011). Recensão de Livro: Estimating Groundwater Recharge (Estimação da Recarga de Água Subterrânea), por Richard W Healy (Cambridge University Press, 2010). *Hydrogeology Journal*, 19, 1451–1452.

3. Dinámica temporal de la humedad del suelo en sistemas productivos: interacción entre manejo, textura y precipitación

Nandi Espino Espinoza, Jorge Víctor Prado Hernández, Julio César Buendía Espinoza, David Cristóbal Acevedo.

Universidad Autónoma de Chapingo, km. 38.5 Carr. México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. MÉXICO.

3.1 RESUMEN

La humedad del suelo es una variable clave que regula los procesos hidrológicos en los agroecosistemas; sin embargo, su dinámica temporal en distintos sistemas productivos es escasamente estudiada. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica de la humedad del suelo en seis sistemas productivos (Avena, Maíz, Higos–Nopales, Metepantle Frutales, Metepantle Nopales y Xoconoxtle) durante la temporada de lluvias de 2025 en el centro de México. Se analizaron 1634 observaciones provenientes de 38 unidades de muestreo mediante un modelo lineal mixto que incorporó efectos del sistema productivo, el tiempo, su interacción y variables edáficas y ambientales. Los resultados mostraron que la humedad del suelo estuvo significativamente influenciada por el sistema productivo ($p = 0.0002$), el tiempo ($p = 0.0003$) y el contenido de arcilla ($p = 0.0004$), destacando una interacción significativa entre sistema y tiempo ($p < 0.0001$), lo que indica trayectorias temporales diferenciadas entre sistemas. El sistema Avena presentó consistentemente los mayores niveles de humedad, mientras que Maíz mostró un incremento progresivo a lo largo del tiempo. En contraste, los sistemas agroforestales presentaron tendencias decrecientes o estables, reflejando diferencias en su capacidad de humedad del suelo. El contenido de arcilla emergió como un factor clave en la regulación de la humedad del suelo, mientras que la altitud no mostró un efecto significativo. En conjunto, los resultados evidencian que la dinámica de la humedad del suelo está determinada por la interacción entre el manejo del sistema productivo y las propiedades físicas del suelo. Este estudio resalta la importancia de integrar el

diseño de los sistemas productivos con las características edáficas para mejorar la retención de agua en el suelo de los agroecosistemas frente a la variabilidad climática.

Palabras Clave: Humedad del suelo, Sistemas productivos, Metepantle, Variables edáficas y Variabilidad Climática.

3.2 ABSTRACT

Soil moisture is a key variable regulating ecohydrological processes in agroecosystems; however, its temporal dynamics across different production systems remain poorly understood. This study aimed to analyze soil moisture dynamics in six production systems (Oat, Maize, Figs–Cactus Pear, Fruit Metepantle, Cactus Pear Metepantle, and Xoconoxtle) during the 2025 rainy season in central Mexico. A total of 1,634 observations from 38 sampling units were analyzed using a linear mixed-effects model that incorporated the effects of the production system, time, their interaction, and edaphic and environmental variables. The results showed that soil moisture was significantly influenced by the production system ($p = 0.0002$), time ($p = 0.0003$), and clay content ($p = 0.0004$). A significant interaction between system and time was observed ($p < 0.0001$), indicating distinct temporal trajectories among systems. The Oat system consistently exhibited the highest moisture levels, while Maize showed a progressive increase over time. In contrast, agroforestry systems exhibited decreasing or stable trends, reflecting differences in their soil moisture capacity. Clay content emerged as a key factor in regulating soil moisture, whereas altitude showed no significant effect. Overall, these results demonstrate that soil moisture dynamics are determined by the interaction between production system management and physical soil properties. This study highlights the importance of integrating the design of production systems with edaphic characteristics to improve water retention in the soil and the resilience of agroecosystems in the face of climate variability."

Keywords: Soil moisture, Production systems, Metepantle, Edaphic variables, and Climate variability.

3.3 Introducción

En el contexto actual de crisis climática, y del estrés hídrico global y la agricultura enfrenta el desafío de optimizar el uso del agua y conservar la salud de los suelos. En los últimos años los sistemas de cultivos comerciales se han establecido en gran parte de la superficie del territorio de México, desplazando y sustituyendo a otros sistemas de cultivos representativos locales. Los sistemas de cultivos comerciales, además de destacar por la producción a gran escala pueden generar, dependiendo las prácticas de manejo implementadas, una degradación de los suelos, impactando en la reducción del contenido de materia orgánica y en la capacidad de retención de agua.

La implementación de sistemas agroforestales es considerada una estrategia para la mitigación de los efectos del cambio climático en la agricultura; esta alternativa ofrece una solución complementaria o potencialmente más sostenible que los monocultivos convencionales (Verchot et al., 2007; Vieira et al., 2009). Investigaciones realizadas durante 40 años respaldan que los sistemas agroforestales tienen la capacidad de rehabilitar las funciones ecosistémicas del suelo, aumentando la diversificación radicular, la porosidad, la capacidad de retención del agua y la recuperación de reservas de agua subterránea (Dollinger & Jose, 2018).

La composición de estos sistemas ha demostrado diferentes capacidades de retención y distribución de la humedad en el suelo, las cuales dependen del tipo de cultivo, de su etapa de desarrollo y manejo, de las características físicas y químicas del suelo, así como de la precipitación entre otros factores (Tarasov et al., 2025). Al respecto, se ha encontrado que el comportamiento de la humedad tiende a ser más estable en sistemas agroforestales en comparación con los sistemas con cultivos convencionales (Ronaldson Meitei & Author, 2023).

Son escasos los estudios y reportes formales sobre el comportamiento de la humedad del suelo en los sistemas de producción de metepantle en México. Los estudios de se han enfocado en sistemas de monocultivos, con el objetivo de

explicar la relación entre el rendimiento de los cultivos y la dinámica del agua y nutrientes en la zona de raíces (Liu et al., 2019; Prado-Hernández et al., 2019).

Aunque se conoce la capacidad de retención del agua en diferentes texturas de suelos, se desconoce el comportamiento espacio-temporal en respuesta a eventos de precipitación de los sistemas productivos con manejo agroforestal y convencional en la microcuenca del río Coxcacoco.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue analizar la dinámica temporal de la humedad del suelo en diferentes sistemas productivos en la microcuenca del río Coxcacoco y evaluar el efecto del manejo, las propiedades edáficas y su interacción con el tiempo mediante un modelo lineal mixto.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Área de estudio

El sitio de estudio se encuentra dentro de la Microcuenca del Río Coxcacaco, en Texcoco, Estado de México. Esta Microcuenca es un ecosistema crucial desde una perspectiva ambiental (Figura 5). Se ubica en la subcuenca Texcoco-Zumpango Nevada (Latargere, 2023), y su río principal tiene una longitud de 14.2 km el cual recibe la escorrentía superficial de 80 km²; genera un vínculo vital entre los pueblos de San Nicolás Tlaminca y San Miguel Tlaixpan y San Dieguito Xochimanca (CONANP, 2021). La Microcuenca se localiza al pie de monte de la Sierra Nevada, entre las coordenadas 19° 29'53'' Norte y 98° 47'55'' Oeste, Texcoco, estado de México. La microcuenca tiene una altitud promedio de 2550 m con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, con un pendiente promedio del terreno de 10%. La microcuenca del Río Coxcacaco es heterogénea, en la que predominan los siguientes usos de suelo: pastizal inducido, bosque secundario arbóreo de encino y la agricultura de temporal anual.

Según la clasificación climática de Köppen, adaptada por Enriqueta García (1964) para México, esta área presenta principalmente un clima seco templado (BS1kw(w)(i')), que se caracteriza por veranos cálidos, lluvias estival y escasa precipitación invernal (menos del 5% anual). La oscilación térmica anual es baja, con una diferencia entre 5 y 7 °C entre las temperaturas medias anuales (CONAGUA, 2024).

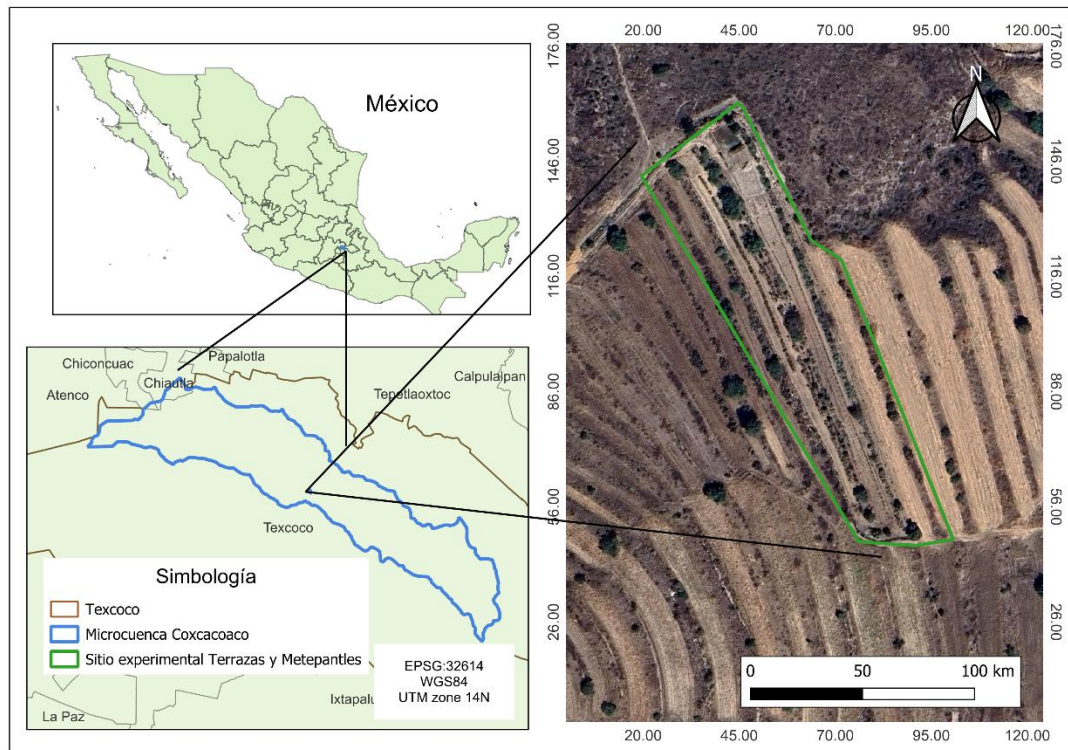


Figura 5. Mapa de Ubicación de la Microcuenca Coxcoaco y ubicación de sitio experimental, Texcoco, México.

3.4.2 Sitio Experimental

El sitio experimental se estableció en la parte alta de la microcuenca Río Coxcoaco, en el ejido de la comunidad de San Dieguito Xochimanca al oriente de la cabecera municipal de Texcoco, a una elevación de 2 410 m y una superficie, de 10000 m². Esta área forma parte de la zona climática (BS1kw(w)(i')), con temperaturas medias que oscilan de -2.0 °C a 32 °C y precipitaciones de 900 mm (Pueblos de América, 2025).

3.4.3 Diseño experimental

El estudio se desarrolló durante la temporada de lluvias de 2025, entre los meses de julio y octubre, periodo caracterizado por condiciones de alta disponibilidad hídrica que permiten evaluar procesos de infiltración, retención y pérdida de humedad en el suelo. Las mediciones se realizaron en sistemas productivos

localizados bajo un gradiente de condiciones edáficas y de manejo, lo que permitió capturar tanto la variabilidad espacial como la respuesta temporal de la humedad del suelo en distintos contextos agroproductivos.

El experimento en campo se estableció en cuatro terrazas y dos metepantles; con diferentes arreglos forestales, la primera terraza fue cultivo de maíz (*Zea mays*) (TM), la segunda terraza con una hilera de nopal xoconostle (*O. joconostle*) (TX), intercalado con árboles de durazno (*Prunus persica*) y romero (*Rosmarinus officinalis* L.); la tercera terraza con hilera de nopal (*O. ficus-indica*) e higos (*Ficus carica*) (THN), en hileras separadas; la cuarta terraza cultivada de avena (*Avena sativa*) (TV); uno de los metepantles tiene una diversidad de árboles frutales (Metfrut) y el segundo tiene nopales (*O. ficus-indica*) y magueyes ssp. (Metnop). (Figura 6).

La longitud promedio de las terrazas y los metepantles es de 229.35 metros; y las pendientes en el sentido transversal de las terrazas oscilan entre 1.7% (TX) y 4.2 % (THN).

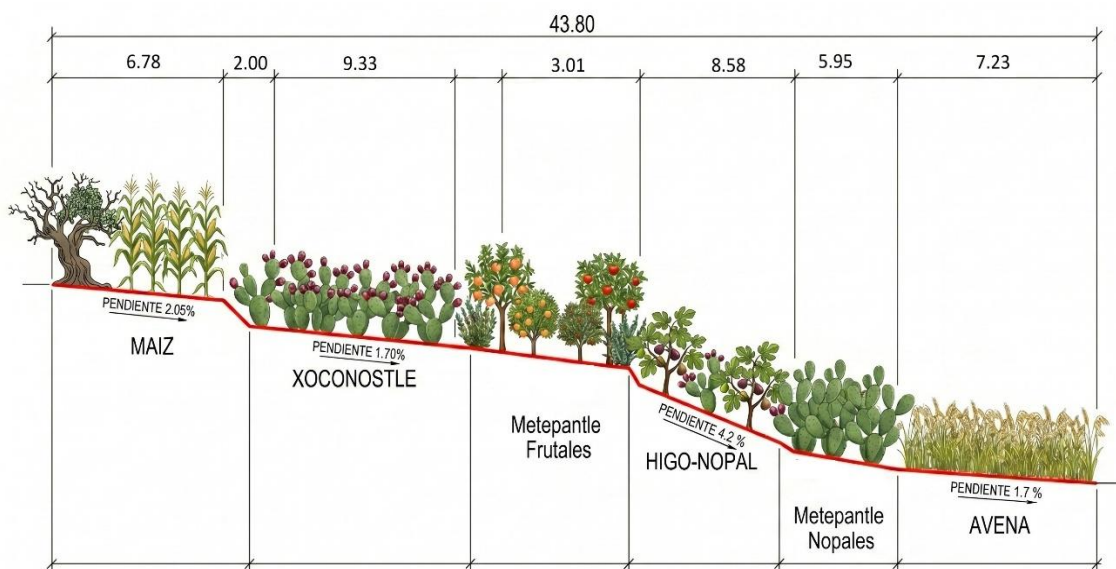


Figura 6. Perfil topográfico del sitio experimental.

Las terrazas con cultivo convencional maíz y avena son sembradas cada año, de forma semimecanizada en meses de mayo y junio. En total, se consideraron 38 sitios de muestreo de la humedad en el suelo, con una distancia de 30 metros de separación entre sí en el sentido longitudinal cuyos números fueron: 7 en la terraza (TM); 5 para la terraza (TX) debido a que solo en una parte de la superficie tenía cultivo; 6 en el metepantle (MetFrut); 7 en la terraza (THN); 7 el metepantle (MetNop) y finalmente 6 en la terraza (TA) (Figura 7). Cada punto de muestreo fue considerado como una unidad de observación para el seguimiento temporal de la humedad del suelo.

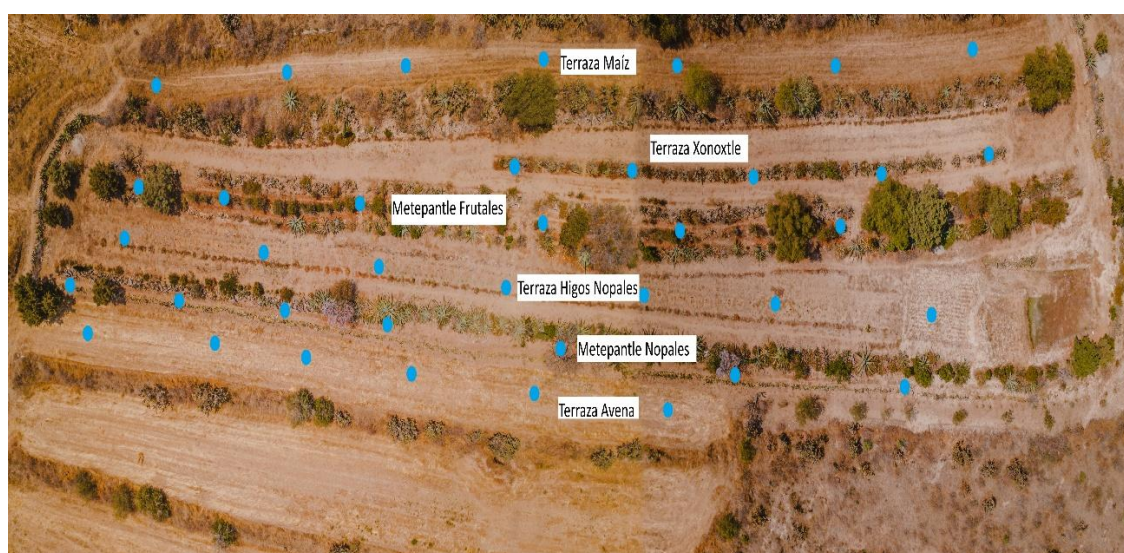


Figura 7. Diseño de Muestreo: Identificación de los sitios de muestreo (puntos azules) en la terrazas y metepantles.

En cada unidad se realizaron mediciones repetidas de humedad del suelo a lo largo del periodo de estudio, generando un conjunto de datos longitudinal con 1634 observaciones. Las mediciones se realizaron en fechas sucesivas durante el periodo de evaluación, permitiendo capturar la dinámica temporal de la humedad del suelo bajo condiciones de variación en la precipitación y en las características del sistema.

3.4.4 Caracterización del suelo

La caracterización física y química del suelo en las cuatro terrazas y los dos sistemas de metepantles se llevó a cabo mediante un muestreo sistemático. En cada punto de muestreo se establecieron cuadrantes de 25 x25 cm, realizando excavaciones a una profundidad de 0 a 30 cm. Se seleccionó esta profundidad por ser la zona de mayor actividad radicular, concentración de materia orgánica y donde ocurre la dinámica más activa de infiltración y humedad del suelo (Young, 1998)

Se recolectaron un total de 38 muestras de suelo, en los sitios donde se monitoreo la humedad para asegurar la representatividad de sus características físicas y químicas (Figura 8). Las características físicas y químicas, determinadas en el laboratorio fueron: la textura con el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), la densidad aparente (ρ_a) con el método de la probeta, la densidad real con el método del Picnómetro (Blake, 2015), el contenido de materia orgánica por el método Walkley-Black (Poudel, 2020). Las muestras fueron tomadas dentro de las parcelas de cada uno de los puntos de medición de humedad. Las variables edáficas obtenidas fueron utilizadas como covariables en el modelo lineal mixto para evaluar su efecto sobre la dinámica de la humedad del suelo.



Figura 8. Muestreo de Suelo: recolección y etiquetado.

3.4.5 Mediciones de la precipitación y humedad del suelo

La precipitación se monitoreó con un pluviómetro marca Davis® (Figura 9) automatizado, con una precisión de $\pm 4\%$, con una resolución de 0.2 mm, instalado a menos de 1 km de las parcelas experimentales, registrando la precipitación diariamente a cada minuto, durante 90 días, comprendidos en un periodo de julio a octubre de 2025.



Figura 9. Pluviómetro Davis® para el registro de la precipitación.

El contenido de humedad volumétrica del suelo se midió (Figura 10) utilizando un TDR (Time Domain Reflectometry) FIELDSCOUT 300® con una precisión del $\pm 3\%$ VWC (Volumetric water Content). Dentro de cada terraza, los puntos de medición se ubicaron a una distancia de 30 metros entre sí. La humedad del suelo se midió a una profundidad de 20 cm; la variable de respuesta correspondió al contenido de humedad en los diferentes arreglos forestales de cada terraza y metepantle. Las mediciones se realizaron durante 43 días, de forma manual en cada punto de muestreo, regularmente un día después de que ocurriera un evento de precipitación (Figura 10).



Figura 10. Medición de humedad en el suelo.

3.4.6 Análisis Estadístico

La dinámica de la humedad del suelo se analizó mediante un modelo lineal mixto, el cual permitió incorporar tanto efectos fijos como efectos aleatorios, considerando la estructura jerárquica de los datos derivada de mediciones repetidas dentro de cada unidad de muestreo.

El modelo incluyó como efectos fijos el sistema productivo, el tiempo (variable continua) y su interacción, así como las variables edáficas y ambientales (contenido de arcilla, materia orgánica, altitud y precipitación). La variable precipitación correspondió a la precipitación acumulada diaria registrada para cada fecha de medición de humedad y fue incorporada como covariable continua en el modelo.

Se incorporó un intercepto aleatorio asociado a la unidad de muestreo, con el fin de capturar la variabilidad inherente entre unidades y la dependencia de las observaciones repetidas.

De manera formal, el modelo se expresó como:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1(\text{Sistema}_i) + \beta_2(\text{Tiempo}_{ij}) + \beta_3(\text{Sistema}_i \times \text{Tiempo}_{ij}) + \beta_4(\text{Arcilla}_i) \\ + \beta_5(\text{Materia orgánica}_i) + \beta_6(\text{Altitud}_i) + \beta_7(\text{Precipitación}_i) + u_i \\ + \varepsilon_{ij}$$

donde Y_{ij} representa la humedad del suelo en la unidad de muestreo i en el momento de medición (tiempo) j , cada uno de los 43 días de medición, u_i corresponde al efecto aleatorio asociado a cada unidad de muestreo y ε_{ij} al error residual. Se asumió que tanto los efectos aleatorios como los errores siguen una distribución normal con media cero y varianza constante.

El modelo fue ajustado mediante máxima verosimilitud restringida (REML) utilizando el paquete nlme en el entorno estadístico R. La significancia de los efectos fijos se evaluó mediante un análisis de varianza del modelo mixto, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Bajo este enfoque, se evaluaron hipótesis relacionadas con la existencia de diferencias en la humedad del suelo entre sistemas productivos, la presencia de cambios a lo largo del tiempo, la interacción entre sistema y tiempo, y el efecto de las variables edáficas sobre la variable respuesta.

3.4.7 Estimación de medias ajustadas y comparaciones múltiples

Las diferencias entre sistemas productivos se analizaron mediante el cálculo de medias marginales estimadas a partir del modelo ajustado. Estas medias permitieron comparar los niveles de humedad del suelo entre sistemas, controlando por el efecto de las covariables incluidas. Las comparaciones múltiples se realizaron utilizando el método de Tukey, lo que permitió evaluar diferencias significativas entre pares de sistemas productivos considerando el ajuste por comparaciones simultáneas.

3.4.8 Análisis de la dinámica temporal

La dinámica temporal de la humedad del suelo se evaluó mediante un enfoque combinado. Por un lado, se analizaron las tendencias temporales mediante representaciones gráficas basadas en las medias observadas para cada sistema de producción, utilizando un suavizado LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing), método de regresión local no paramétrica que permite describir patrones temporales sin asumir una relación funcional específica entre las variables. Este procedimiento facilita la identificación de tendencias generales, cambios graduales y posibles fluctuaciones en la humedad del suelo a lo largo del periodo de estudio, además de representar adecuadamente relaciones potencialmente no lineales entre la humedad del suelo y el tiempo. Por otro lado, se estimaron las pendientes temporales a partir del modelo matemático ajustado, lo que permitió cuantificar la tasa de cambio de la humedad del suelo en cada sistema productivo y distinguir si hubo incremento, disminución o estabilidad a lo largo del periodo de evaluación.

Para analizar la variación de la humedad del suelo en diferentes etapas del periodo de estudio, se seleccionaron tres momentos representativos definidos a partir de los cuantiles 25, 50 y 75 de la distribución temporal. Estos momentos corresponden a fases inicial, intermedia y final del periodo de evaluación y fueron expresados en fechas reales para facilitar su interpretación en términos ecológicos y de manejo.

Cabe señalar que la variable tiempo (j) incluida en el modelo matemático de ajuste descrito en el apartado 3.4.6 correspondió a cada uno de los 43 días de muestreo considerados durante el estudio, por lo que el ajuste del modelo se realizó utilizando la totalidad de las observaciones temporales disponibles. Los cuantiles 25, 50 y 75 no fueron empleados para el ajuste del modelo, sino que se utilizaron posteriormente como puntos temporales representativos para estimar medias ajustadas (medias marginales estimadas) de la humedad del suelo y

realizar comparaciones entre sistemas productivos en momentos clave del periodo de evaluación. Este procedimiento permitió interpretar la evolución temporal de la humedad del suelo a partir de las predicciones del modelo, controlando simultáneamente el efecto de las covariables incluidas en el análisis.

Las medias ajustadas de la humedad del suelo se estimaron mediante medias marginales estimadas (Estimated Marginal Means, EMMs), obtenidas a partir del modelo lineal mixto utilizando el paquete emmeans de R. Estas estimaciones representan los valores promedio esperados de humedad para cada sistema productivo, controlando estadísticamente el efecto de las covariables incluidas en el modelo (precipitación, altitud relativa, contenido de arcilla y materia orgánica).

El procesamiento de los datos, el ajuste del modelo y la generación de las visualizaciones se realizaron en el entorno R. Las figuras fueron elaboradas mediante el paquete ggplot2, incluyendo gráficos de medias ajustadas con intervalos de confianza, curvas de tendencia temporal y diagramas de pendientes, lo que permitió representar de manera clara y coherente los patrones observados en los datos.

3.5 Resultados

3.5.1 Caracterización de variables físicas y químicas del suelo

En el (cuadro 1) análisis físico del suelo en los seis sistemas evaluados presenta una clara dominancia entre las clases franco-arenosa y franco-arcillo-arenosa. La arena constituyó el componente principal en todos los, sistemas representando sistemáticamente más del 50 % de la composición granulométrica. Los niveles máximos de la se registraron en el TM (61.84 ± 9.07 %) y en el arreglo MetFrut (60.53 ± 5.37 %).

En contraparte, la arcilla fue el indicador que exhibió la mayor variabilidad entre los sistemas de manejo. La TX presentó la concentración más alta de partículas finas con un 28.39 ± 6.75 %, seguido por el sistema de THN (24.74 ± 11.45 %) y

la TA ($23.85 \pm 5.25 \%$). Las proporciones más bajas de arcilla se cuantificaron en el MetFrut ($17.23 \pm 5.48 \%$), MetNop ($17.75 \pm 6.72 \%$) y el TM ($17.93 \pm 7.66 \%$).

La proporción de limo mostró un comportamiento estable a través de los diferentes sistemas. Los valores medios de esta fracción se mantuvieron en un rango estrecho, fluctuando únicamente entre un mínimo de $20.23 \pm 4.10 \%$ en el TM y un máximo de $24.12 \pm 7.21 \%$ en La TA. Esta homogeneidad indica que la fracción limosa no experimenta alteraciones del sistema productivo.

Cuadro 1. Promedios y desviaciones estándar de los contenidos de partículas en el suelo.

Sistema	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
TM	17.93 ± 7.66	20.23 ± 4.10	61.84 ± 9.07
TX	28.39 ± 6.75	23.24 ± 4.31	50.34 ± 7.37
MetFrut	17.23 ± 5.48	22.24 ± 2.42	60.53 ± 5.37
THN	24.74 ± 11.45	21.51 ± 2.58	53.75 ± 10.15
MetNop	17.75 ± 6.72	23.22 ± 4.88	59.04 ± 11.08
TA	23.85 ± 5.25	24.12 ± 7.21	52.03 ± 6.30

3.5.2 Ajuste del modelo y estructura de la variación

El modelo lineal mixto permitió describir adecuadamente la dinámica de la humedad del suelo en función del sistema productivo y el tiempo, considerando un total de 1634 observaciones distribuidas en 38 unidades de muestreo. El modelo incluyó efectos fijos asociados al sistema y al tiempo, así como covariables ambientales, además de un intercepto aleatorio por unidad de muestreo para capturar la dependencia de las mediciones repetidas. Los coeficientes estimados de los efectos fijos se presentan en el (Cuadro 2).

Cuadro 2. Coeficientes de regresión (β) del modelo matemático de ajuste y valores de significancia de los factores determinantes de humedad en el suelo.

Parámetro	β	Error estándar	Gl	t	p
Intercepto	42.799	2.295	1627	18.645	<0.0001
Higos-Nopales	-8.985	2.807	29	-3.201	0.0033
Maíz	-9.423	3.388	29	-2.781	0.0094
Metepantle-Nopales	-6.341	3.777	29	-1.679	0.1039
Metepantle Frutales	-10.516	3.230	29	-3.256	0.0029
Xoconoxtle	-11.705	3.095	29	-3.782	0.0007
Tiempo (Dias_c)	-0.029	0.015	1627	-1.955	0.0508
Precipitación	0.055	0.028	1627	1.955	0.0508
Altitud	0.062	0.051	29	1.230	0.2287
Arcilla	0.537	0.138	29	3.902	0.0005
Materia orgánica	-2.033	1.963	29	-1.035	0.3090
Higos-Nopales × Tiempo	-0.007	0.020	1627	-0.337	0.7362
Maíz × Tiempo	0.081	0.020	1627	4.014	0.0001
Metepantle-Nopales × Tiempo	-0.010	0.020	1627	-0.502	0.6156
Metepantle Frutales × Tiempo	-0.023	0.021	1627	-1.109	0.2674
Xoconoxtle × Tiempo	0.021	0.022	1627	0.968	0.3334

El ajuste del modelo mediante máxima verosimilitud restringida (Restricted Maximum Likelihood, REML) produjo valores de AIC (Akaike Information Criterion) = 11094.04, BIC (Bayesian Information Criterion) = 11191.46 y log-verosimilitud = -5529.02. El AIC y el BIC son criterios de selección de modelos que evalúan simultáneamente la calidad del ajuste y la complejidad del modelo; su principal utilidad radica en la comparación entre modelos alternativos ajustados al mismo conjunto de datos, favoreciendo aquellos que presentan valores menores y, por tanto, una mejor relación entre capacidad explicativa y parsimonia.

La estructura de varianza mostró una desviación estándar del efecto aleatorio entre unidades de muestreo de $\sigma_u = 4.94$, lo que indica diferencias espaciales importantes en la capacidad de retención de humedad entre sitios. Por su parte, la desviación estándar residual fue de $\sigma = 6.33$, reflejando la variabilidad temporal y la fracción de variación no explicada por las variables incluidas en el modelo. En conjunto, estos resultados indican que la humedad del suelo estuvo determinada tanto por la heterogeneidad espacial entre unidades de muestreo como por procesos temporales dinámicos, lo que justifica el empleo de un modelo

lineal mixto para representar adecuadamente la estructura jerárquica de los datos.

3.5.3 Efectos principales e interacción sistema–tiempo

El análisis de varianza del modelo lineal mixto (Cuadro 3) mostró que el sistema productivo ($F = 6.94$; $p = 0.0002$), el tiempo ($F = 13.14$; $p = 0.0003$) y el contenido de arcilla ($F = 15.80$; $p = 0.0004$) tuvieron efectos significativos sobre la humedad del suelo. De manera destacada, se detectó una interacción altamente significativa entre sistema y tiempo ($F = 7.29$; $p < 0.0001$), lo que indica que la dinámica temporal de la humedad difiere entre sistemas productivos.

Cuadro 3. Análisis de varianza del modelo lineal mixto para la humedad del suelo en función del sistema productivo, el tiempo y las variables edáficas.

Efecto del modelo	Grados de libertad de numerador	Grados de libertad de denominador	Valor F	Valor de p
Sistema productivo	5	29	6.94	0.0002
Tiempo (días desde la primera medición)	1	1627	13.14	0.0003
Precipitación acumulada	1	1627	3.82	0.0508
Altitud (variación dentro de cada sistema productivo)	1	29	0.16	0.6946
Contenido de arcilla del suelo	1	29	15.80	0.0004
Contenido de materia orgánica del suelo	1	29	1.07	0.3090
Interacción entre sistema productivo y tiempo (días desde la primera medición)	5	1627	7.29	<0.0001

La precipitación presentó un efecto marginal ($p = 0.0508$), mientras que la variación altitudinal dentro de los sistemas ($p = 0.6946$) y el contenido de materia orgánica ($p = 0.3090$) no mostraron efectos estadísticamente significativos.

La variación de la humedad del suelo está determinada tanto por factores estructurales asociados al sistema productivo y a las propiedades físicas del suelo, como por procesos dinámicos en el tiempo, siendo la interacción entre ambos componentes un elemento clave en su explicación.

3.5.4 Comparación de medias estimadas con el modelo de ajuste entre sistemas

Los valores promedio de humedad del suelo estimados a partir del modelo lineal mixto ajustado (medias ajustadas o medias marginales estimadas), calculados manteniendo constantes las covariables incluidas en el modelo, mostraron un patrón claro de diferenciación entre los sistemas productivos (Figura 11). El sistema TA presentó el mayor contenido de humedad (42.8 ± 2.30), seguido por MetNop (36.5 ± 2.43). En contraste, los sistemas THN (33.8 ± 2.11), TM (33.4 ± 2.10), MetFrut (32.3 ± 2.12) y TX (31.1 ± 2.62) presentaron valores menores.

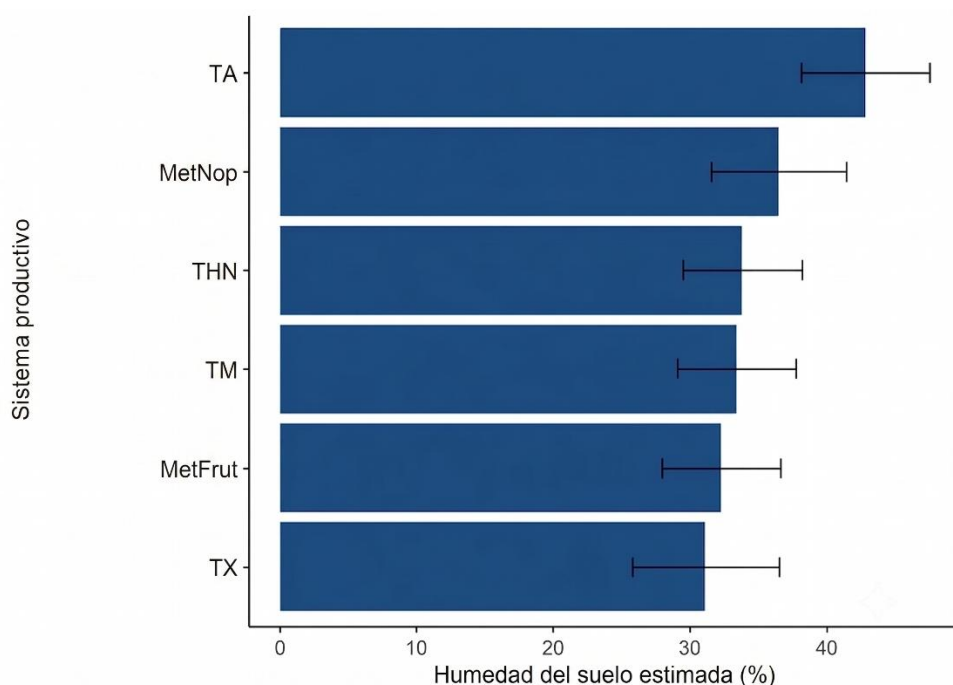


Figura 11. Medias marginales de la humedad del suelo (%) por sistema productivo, obtenidas mediante el modelo lineal mixto. Las barras representan los valores promedio ajustados y las líneas horizontales los intervalos de confianza al 95%.

Las comparaciones múltiples con la prueba (Tukey) indicaron que el sistema TA presentó valores significativamente superiores a THN ($p = 0.035$), MetFrut ($p = 0.031$) y TX ($p = 0.008$), mientras que no se detectaron diferencias significativas entre los sistemas restantes. No obstante, dado que el modelo incluyó una

interacción significativa entre sistema y tiempo, estas diferencias deben interpretarse como un promedio global a lo largo del periodo de estudio.

Los resultados en la retención de humedad del suelo entre sistemas productivos indicaron que el sistema TA presenta la mayor capacidad de almacenamiento hídrico, mientras que los demás sistemas muestran condiciones intermedias a bajas.

3.5.5 Dinámica temporal de la humedad del suelo

El análisis de la dinámica temporal de la humedad del suelo (Figura 12) se realizó utilizando los valores observados de humedad del suelo, sobre los cuales se ajustaron curvas de suavizado LOESS para describir la tendencia temporal de cada sistema productivo. Los puntos corresponden a las medias observadas por fecha de evaluación, mientras que las líneas representan la tendencia suavizada obtenida mediante regresión local no paramétrica. En términos generales, la humedad del suelo mostró fluctuaciones a lo largo del periodo de estudio, asociadas a procesos de recarga y pérdida de agua, con respuestas específicas según el sistema productivo.

El sistema TA mantuvo los mayores niveles de humedad durante gran parte del periodo de evaluación, evidenciando una mayor capacidad de conservación de agua en comparación con los demás sistemas. Los sistemas THN, TX, MetNop, MetFrut y TM presentaron trayectorias temporales diferenciadas, caracterizadas por periodos alternados de incremento y disminución de la humedad del suelo en respuesta a la dinámica de precipitación observada durante el estudio. Asimismo, las curvas suavizadas mostraron que la magnitud y dirección de los cambios temporales variaron entre sistemas, sugiriendo diferencias en los procesos de infiltración, almacenamiento y pérdida de agua en el suelo.

En conjunto, los patrones temporales observados son consistentes con la interacción significativa entre sistema productivo y tiempo detectada en el modelo lineal mixto (Cuadro 1), lo que indica que la respuesta temporal de la humedad del suelo dependió del tipo de sistema productivo y que los sistemas evaluados

difirieron en su capacidad para retener y conservar agua a lo largo del periodo de evaluación.

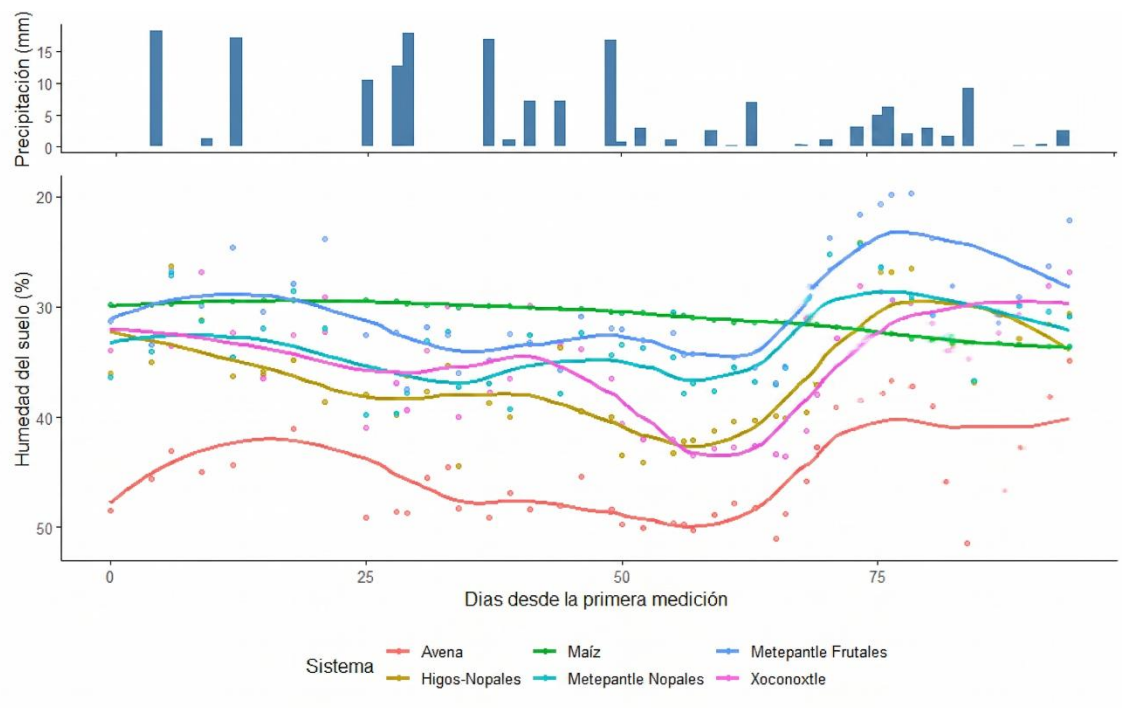


Figura 12. Dinámica temporal de la humedad del suelo en los diferentes sistemas productivos y precipitación registrada durante el periodo de evaluación.

3.5.6 Tendencias temporales y tasas de cambio

El análisis de pendientes temporales (Figura 13) permitió cuantificar la dirección y magnitud del cambio en la humedad del suelo para cada sistema productivo. Los resultados evidenciaron diferencias claras en las trayectorias temporales de la humedad. El sistema TM fue el único que presentó una pendiente positiva significativa ($\beta = 0.0517 \pm 0.0138$), indicando un incremento sostenido de la humedad del suelo a lo largo del periodo de evaluación. En contraste, los sistemas THN ($\beta = -0.0358 \pm 0.0138$), MetNo ($\beta = -0.0391 \pm 0.0138$) y MetFrut ($\beta = -0.0522 \pm 0.0148$) mostraron pendientes negativas significativas, reflejando una disminución progresiva de la humedad del suelo. El sistema TA presentó una

tendencia negativa marginal ($\beta = -0.0290 \pm 0.0148$), mientras que TX no mostró cambios significativos en el tiempo ($\beta = -0.0078 \pm 0.0162$). Estos resultados confirman que la dinámica temporal de la humedad del suelo difirió entre sistemas productivos y respaldan la interacción significativa entre sistema y tiempo identificada en el modelo lineal mixto.

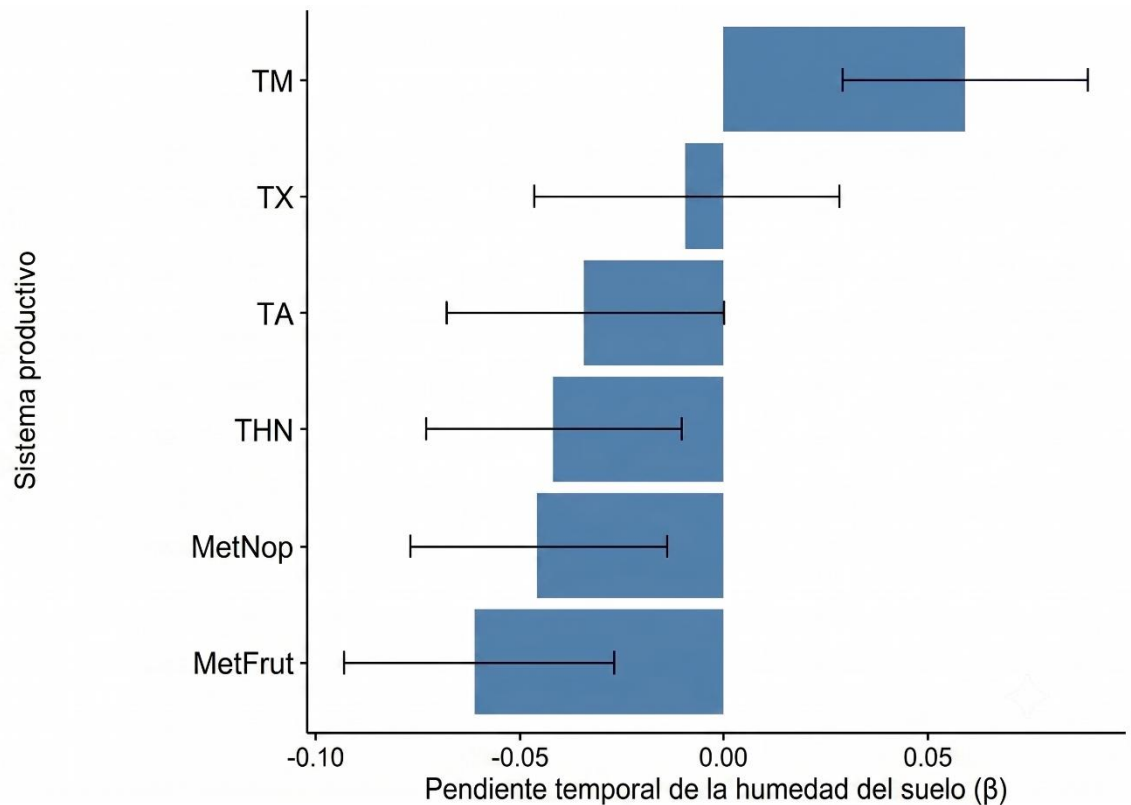


Figura 13. Pendientes temporales de la humedad del suelo. Valores positivos indican un incremento de la humedad en el tiempo y valores negativos indican una disminución.

El sistema TM presentó una pendiente positiva significativa ($\beta = 0.0517 \pm 0.0138$), indicando una tendencia general de incremento de la humedad del suelo a lo largo del periodo de evaluación (Cuadro 2). En contraste, MetFrut mostró la pendiente negativa más pronunciada ($\beta = -0.0522 \pm 0.0148$), seguido por

MetNop ($\beta = -0.0391 \pm 0.0138$) y THN ($\beta = -0.0358 \pm 0.0138$), evidenciando una disminución progresiva de la humedad en estos sistemas. El sistema TA presentó una tendencia negativa marginal, mientras que TX no mostró cambios significativos a través del tiempo, indicando una condición relativamente estable durante el periodo de evaluación.

Las comparaciones múltiples mediante el ajuste de Tukey mostraron que la pendiente temporal del sistema TM difirió significativamente de las observadas en TA, THN, MetNop y MetFrut ($p \leq 0.001$), lo que evidencia una respuesta hidrológica contrastante caracterizada por una tendencia de incremento de la humedad frente a la disminución observada en dichos sistemas. Estos resultados confirman que la dinámica temporal de la humedad del suelo dependió del sistema productivo y respaldan la interacción significativa entre sistema y tiempo identificada en el modelo lineal mixto.

Cuadro 4. Tendencias de humedad para cada sistema por pendiente.

Sistema	Pendiente(β) $\pm$ Error Estándar (EE)	Intervalo de Confianza (95%)	Tendencia de Humedad
TM	0.0517 $\pm$ 0.0138	0.0247 a 0.0787	Incremento sostenido (Positiva significativa)
TX	-0.0078 $\pm$ 0.0162	-0.0397 a 0.0240	Estable (Sin cambios significativos)
TA	-0.0290 $\pm$ 0.0148	-0.0581 a 0.0001	Negativa marginal
THN	-0.0358 $\pm$ 0.0138	-0.0628 a -0.0088	Disminución progresiva
MetNop	-0.0391 $\pm$ 0.0138	-0.0661 a -0.0121	Disminución progresiva
MetFrut	-0.0522 $\pm$ 0.0148	-0.0813 a -0.0231	Disminución (progresiva Negativa)

3.5.7 Evaluación en distintos momentos del tiempo

El análisis de medias ajustadas de la humedad del suelo en tres momentos representativos del periodo de estudio, definidos a partir de los cuantiles de la distribución temporal (inicio: finales de julio–inicios de agosto de 2025, fase media: finales de agosto–inicios de septiembre de 2025 y fase final: finales de septiembre–inicios de octubre de 2025), mostró que el orden relativo de los sistemas productivos no es estático a lo largo del tiempo.

El análisis de las medias ajustadas de humedad del suelo estimadas a partir del modelo lineal mixto en tres momentos representativos del periodo de estudio, definidos mediante los cuantiles de la distribución temporal (fase inicial: finales de julio–inicios de agosto de 2025; fase media: finales de agosto–inicios de septiembre de 2025; y fase final: finales de septiembre–inicios de octubre de 2025), mostró que el orden relativo de los sistemas productivos varió a lo largo del tiempo.

En la fase inicial, el sistema TA presentó los valores más altos de humedad del suelo ($\approx 43.4\%$), seguido por Metepantle Nopales ($\approx 37.3\%$), mientras que TM ($\approx 32.3\%$) y TX ($\approx 31.3\%$) registraron los valores más bajos. En la fase media, el patrón general se mantuvo, con TA conservando los mayores niveles de humedad ($\approx 42.7\%$), mientras que los demás sistemas presentaron valores intermedios comprendidos entre 31.0% y 36.0% . En la fase final se observaron cambios en la posición relativa de algunos sistemas; particularmente, TM su humedad estimada ($\approx 34.5\%$), superando a THN ($\approx 33.1\%$) y Metepantle Frutales ($\approx 31.2\%$), mientras que TA mantuvo los valores más altos ($\approx 42.2\%$).

En contraste, los sistemas MetFrut, MetNop y THN mostraron una disminución progresiva de la humedad a lo largo del periodo de evaluación, mientras que TX presentó valores relativamente constantes ($\approx 31.0\%$), indicando una condición temporalmente estable, aunque con menor contenido hídrico en comparación con los demás sistemas.

Estos resultados demuestran que las diferencias entre sistemas productivos dependieron del momento de evaluación, lo que es consistente con la interacción significativa entre sistema y tiempo identificada en el modelo lineal mixto (Cuadro 1). En conjunto, los resultados indican que los sistemas productivos no sólo difieren en sus niveles de humedad del suelo, sino también en la forma en que ésta cambia a través del tiempo, reflejando patrones contrastantes de conservación, pérdida o acumulación de agua durante el periodo de estudio.

3.6 Discusión

3.6.1 Análisis de los sistemas sobre la humedad del suelo

Las diferencias observadas entre sistemas productivos sugieren que el tipo de cobertura y manejo constituye uno de los principales determinantes de la humedad del suelo. Diversos estudios han demostrado que los cambios en el uso de suelo y en la cobertura vegetal modifican directamente los procesos de infiltración, retención y redistribución del agua en el perfil edáfico (Lin et al., 2024a; Udawatta & Gantzer, 2022).

En este contexto, los mayores contenidos promedio de humedad en los sistemas TA y MetNop (figuras 11 y 12) sugieren una mayor eficiencia en la retención hídrica. esta diferencia podría estar asociada con la configuración topográfica de las terrazas y con procesos de redistribución del agua dentro del sistema, aunque estos mecanismos no fueron evaluados directamente en el presente estudio

La evidencia reciente indica que sistemas con cobertura continua incrementan la porosidad superficial, mejoran la estructura del suelo y favorecen la infiltración, lo que se traduce en mayores contenidos de humedad y mayor estabilidad temporal (Alcudia-Aguilar et al., 2024; Blanco-Canqui & Lal, 2009; Pulido-Esquivel et al., 2025), en la que el sistema TA tenía un cultivo de porte medio y de alta densidad.

En contraste, los sistemas MetFrut y MetNop mostraron menores niveles de humedad y tendencias decrecientes, lo que sugiere una menor capacidad para mantener niveles elevados de humedad del suelo durante el periodo evaluado. En los sistemas agroforestales, este comportamiento se ha asociado con estructuras vegetales heterogéneas que generan variabilidad en la interceptación de la lluvia y en la competencia por agua entre especies (Jose, 2009; Mitrová et al., 2025).

3.6.2 Dinámica temporal e interacción sistema–tiempo

La interacción significativa entre sistema y tiempo indica que la humedad del suelo no responde de manera uniforme, sino que sigue trayectorias diferenciadas en función de las características del sistema. Este resultado es consistente con estudios que destacan que la dinámica de la humedad está controlada por la interacción entre precipitación, infiltración, evapotranspiración y propiedades del suelo (Lin et al., 2024b; Vereecken et al., 2008).

La tendencia general positiva observada en el sistema TM sugiere un proceso de acumulación de humedad a lo largo del periodo de evaluación, posiblemente asociado a cambios en la cobertura vegetal durante el desarrollo del cultivo. el crecimiento del dosel puede modificar el microclima del suelo, reducir la evaporación directa y favorecer una mayor conservación de agua. Este comportamiento ha sido documentado en sistemas agrícolas donde la evolución fenológica del cultivo influye en la dinámica hídrica del suelo (Rockström et al., 2002).

Por el contrario, los sistemas con tendencias decrecientes reflejan condiciones donde los procesos de pérdida de agua, como la evapotranspiración, podrían estar superando los procesos de ingreso de agua al suelo. La literatura reciente señala que la infiltración es un proceso clave que determina la partición de la precipitación entre escurrimiento e infiltración, condicionando directamente la humedad del suelo (Piraneque-Gambasica et al., 2025).

3.6.3 Influencia de las propiedades edáficas

El efecto significativo del contenido de arcilla confirma su papel fundamental en la regulación de la humedad del suelo. Los suelos con mayor contenido de arcilla presentan una mayor capacidad para mantener humedad en el perfil del suelo de almacenamiento hídrico debido a su mayor área superficial y a la presencia de microporos que retienen agua por fuerzas capilares (Webster, 2005). Este resultado coincide con estudios recientes que destacan la textura del suelo como uno de los principales determinantes de la dinámica hídrica (Lin et al., 2024).

Los resultados obtenidos sugieren que la textura del suelo contribuyó a la variación de la humedad observada entre sistemas productivos; sin embargo, las diferencias registradas no pueden atribuirse exclusivamente al contenido de arcilla. Aunque el sistema TA presentó los mayores niveles de humedad durante el periodo de evaluación, su contenido promedio de arcilla ($\approx 23.9\%$) no fue el más alto entre los sistemas evaluados, de hecho, TX presentó un contenido promedio de arcilla aproximadamente de 28.4% , mientras que THN alcanzó valores cercanos a 24.7% . Estos resultados indican que la mayor disponibilidad de agua observada en TA no puede explicarse únicamente por la textura del suelo, sino que probablemente fue resultado de la interacción entre las propiedades físicas del suelo, la cobertura vegetal, la densidad del cultivo y las características estructurales del sistema productivo. En este sentido, el efecto significativo de la arcilla identificado por el modelo lineal mixto debe interpretarse como un factor que favorece la retención de humedad a escala general, pero cuya influencia está modulada por otros componentes del agroecosistema que determinan la dinámica temporal del agua en el suelo.

En contraste, la falta de significancia de la materia orgánica sugiere que su efecto puede estar condicionado por la textura del suelo o por su limitada variabilidad en el área de estudio. Aunque la materia orgánica es reconocida por mejorar la estructura del suelo y la retención de agua, su influencia puede ser secundaria cuando predominan variables físicas como la textura (Bronick & Lal, 2005).

3.6.4 Interacción precipitación y la altitud

La precipitación presentó un efecto marginal, lo que sugiere que su influencia sobre la humedad del suelo no es directa ni uniforme. Sin embargo, la precipitación no explica las diferencias entre sistemas productivos, debido a que todos los sistemas evaluados estuvieron expuestos a las mismas condiciones pluviométricas durante el periodo de estudio. Por tanto, las diferencias observadas en la humedad del suelo deben atribuirse principalmente a las características propias de cada sistema y a las propiedades del suelo.

Estudios recientes han demostrado que la respuesta del suelo a la precipitación depende de la capacidad de infiltración, la cobertura vegetal y la estructura del suelo, lo que puede generar respuestas no lineales en la humedad (Lin et al., 2024). A escala regional, en México se ha documentado que cambios en el uso del suelo, como la intensificación agrícola, pueden reducir la humedad del suelo y alterar el balance hídrico (Barreras et al., 2026).

Por otro lado, la ausencia de un efecto significativo de la altitud dentro de los sistemas indica que las variaciones topográficas locales no son determinantes en la dinámica de la humedad del suelo a la escala del estudio. Este resultado sugiere que los factores asociados al manejo del sistema y a las propiedades del suelo tienen un mayor peso explicativo que la topografía, particularmente en contextos con variabilidad altitudinal limitada (Vereecken et al., 2008).

3.6.5 Implicaciones hidrológicas y de manejo

En conjunto, los resultados evidencian que la humedad del suelo es el resultado de la interacción entre procesos físicos, los diferentes arreglos y de manejo. La literatura reciente señala que los sistemas agroforestales pueden modificar significativamente los flujos hidrológicos, incluyendo la infiltración, el almacenamiento de agua en el suelo y la regulación de la humedad edáfica, dependiendo de su estructura y composición (Alcudia-Aguilar et al., 2024; Pulido-Esquivel et al., 2025).

Este estudio no evaluó directamente el escurrimiento ni la recarga de acuíferos; sin embargo, los patrones de humedad observados sugieren diferencias en la capacidad de los sistemas productivos para captar, retener y conservar agua en el perfil del suelo.

Este comportamiento ha sido documentado en agroecosistemas de México, donde los sistemas agroforestales incrementan la retención de humedad y mejoran la fertilidad del suelo (Alcudia-Aguilar et al., 2024). Los resultados obtenidos mostraron que el sistema TA mantuvo los mayores niveles de humedad durante todo el periodo de evaluación, mientras que TM presentó una tendencia general positiva de acumulación de humedad. En contraste, los sistemas metepantle frutales, metepantle nopales y THN mostraron tendencias decrecientes, lo que sugiere diferencias en la capacidad de conservación de agua entre sistemas productivos.

Desde una perspectiva de manejo, los sistemas que favorecen la retención de humedad pueden contribuir a mejorar la resiliencia frente a la variabilidad climática. En particular, los resultados sugieren que la presencia de cobertura vegetal continua y una mayor protección de la superficie del suelo podrían favorecer la conservación de agua, reduciendo las pérdidas por evaporación y mejorando el aprovechamiento de los eventos de precipitación.

En contraste, los sistemas con pérdidas progresivas requieren estrategias orientadas a mejorar la cobertura del suelo, incrementar la infiltración y reducir la evaporación. Entre las prácticas potencialmente beneficiosas se encuentran el mantenimiento de coberturas vegetales, el uso de residuos orgánicos como acolchado, el incremento de la diversidad vegetal y el fortalecimiento de estructuras de conservación de suelo y agua.

En este sentido, la implementación de prácticas agroecológicas y agroforestales bien diseñadas puede ser clave para optimizar la disponibilidad hídrica y la sostenibilidad de los sistemas productivos (Manono & Mwami, 2026).

En conjunto, los resultados indican que el manejo del sistema productivo puede modificar de manera importante la dinámica de la humedad del suelo, por lo que su consideración es fundamental para el diseño de estrategias de adaptación y resiliencia frente a la variabilidad climática en agroecosistemas de temporal.

3.7 Conclusiones

La dinámica de la humedad del suelo estuvo determinada principalmente por el sistema productivo, el contenido de arcilla y su interacción con la variación temporal, evidenciando trayectorias diferenciadas de retención y pérdida de agua entre sistemas. El sistema TA mantuvo los mayores niveles de humedad durante todo el periodo de evaluación, mientras que TM fue el único sistema que presentó una tendencia temporal positiva significativa, indicando una acumulación relativa de humedad a lo largo del estudio. En contraste, los sistemas MetFrut, MetNop y THN mostraron disminuciones progresivas de la humedad del suelo, reflejando diferencias en la capacidad de conservación hídrica entre sistemas productivos.

El contenido de arcilla fue la única propiedad edáfica que presentó un efecto significativo sobre la humedad del suelo, confirmando la importancia de la textura en la regulación del almacenamiento de agua. Por el contrario, la materia orgánica y la altitud no mostraron efectos significativos sobre la humedad del suelo a la escala de estudio, lo que indica que las propiedades físicas del suelo y las características propias del sistema productivo tuvieron un mayor peso explicativo que la variabilidad topográfica local.

En conjunto, los resultados demuestran que la humedad del suelo constituye un proceso dinámico cuya variabilidad depende de la interacción entre las propiedades físicas del suelo, el sistema productivo y la dimensión temporal. Los resultados confirman que los sistemas productivos no solo difieren en sus niveles de humedad, sino también en la forma en que ésta cambia a lo largo del tiempo, evidenciando patrones contrastantes de conservación, pérdida o acumulación de agua. Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar criterios de manejo y

conservación del suelo en el diseño de sistemas agroforestales y agrícolas, con el fin de favorecer la retención de humedad y fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas frente a la variabilidad climática.

Estos resultados proporcionan evidencia de que la configuración y el manejo de los sistemas productivos pueden modificar la disponibilidad de agua en el suelo, con implicaciones directas para la sostenibilidad y adaptación de los agroecosistemas de temporal frente a escenarios de mayor variabilidad climática

3.8 Literatura citada

- Alcudia-Aguilar, A., Villanueva-López, G., Alayón-Gamboa, J. A., Nahed-Toral, J., Aryal, D. R., Casanova-Lugo, F., Ayala-Montejo, D., Martínez-Zurimendi, P., Jiménez-Ferrer, G., De la Cruz-López, C. A., & Medrano-Pérez, O. R. (2024). Plant species richness in agroforestry systems correlates to soil fertility in the humid tropic of Mexico. *Agroforestry Systems*, 98(4), 891–909. <https://doi.org/10.1007/S10457-024-00961-4>
- Barreras, A., Gutiérrez, S., Vázquez-Lule, A., Gómez-Tagle, A., Delgado, T., Kolb, M., Tarin, T., Torres-Gómez, M., Figueroa, D., Prado, B., & Guevara, M. (2026). Soil moisture decline across the Avocado “Green Gold Belt” in central Mexico. *Npj Sustainable Agriculture*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/S44264-026-00138-9>
- Blake, G. R. (2015). Bulk Density. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 374–390. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c30>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 139–163. <https://doi.org/10.1080/07352680902776507>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils¹. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2004.03.005>
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*.
- Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems* 2018 92:2, 92(2), 213–219. <https://doi.org/10.1007/S10457-018-0223-9>
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Lin, Z., Wang, Q., Xu, Y., Luo, S., Zhou, C., Yu, Z., & Xu, C. Y. (2024a). Soil moisture dynamics and associated rainfall-runoff processes under different land uses and land covers in a humid mountainous watershed. *Journal of Hydrology*, 636. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.131249>
- Lin, Z., Wang, Q., Xu, Y., Luo, S., Zhou, C., Yu, Z., & Xu, C. Y. (2024b). Soil moisture dynamics and associated rainfall-runoff processes under different land uses and land covers in a humid mountainous watershed. *Journal of Hydrology*, 636. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.131249>
- Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2019). Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *CATENA*, 182, 104147.
<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104147>
- Manono, B. O., & Mwami, B. (2026). Agroforestry and Soil Health: A Review of Impacts and Potential for Sustainable Agriculture. *Earth (Switzerland)*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.3390/EARTH7010031/S1>
- Mitrová, A. M., Vichta, T., Zapletal, P., Volánek, J., Neubauer, Š., & Vranová, V. (2025). Effects of tree features on hydrophysical soil properties in

- European agroforestry systems: systematic review. *Agroforestry Systems* 2025 99:8, 99(8), 246-. <https://doi.org/10.1007/S10457-025-01352-Z>
- Piraneque-Gambasica, N. V., Aguirre-Forero, S. E., & Ordoñez-Thalliens, L. J. (2025). Impacts of soil infiltration and its determinants on water resource management on semiarid conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 18(5), 205–214. <https://doi.org/10.25165/J.IJABE.20251805.9452>
- Prado-Hernández, J. V., Pineda-Pineda, J., Martinez-Ruiz, A., Carrillo-García, M., & Aparicio-Parra, J. J. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*) crop production using drip irrigation installed at different depths. *Acta Horticulturae*, 1253, 183–190. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2019.1253.25>
- Pueblos de América. (2025). *SAN DIEGUITO (Estado de México) Texcoco*. <https://mexico.pueblosamerica.com/ii/san-dieguito>
- Pulido-Esquivel, A. Y., Prado-Hernández, J. V., Buendía-Espinoza, J. C., & García-Núñez, R. M. (2025). Agroforestry Systems Enhance Soil Moisture Retention and Aquifer Recharge in a Semi-Arid Mexican Valley. *Water (Switzerland)*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/W17101488>
- Rockström, J., Barron, J., & Fox, P. (2002). Rainwater management for increased productivity among small-holder farmers in drought prone environments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(11–22), 949–959. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00098-0)
- Ronalson Meitei, K., & Author, C. (2023). Role of agroforestry in enhancing soil health and crop productivity. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 11(3), 84–88. <https://doi.org/10.22271/PLANTS.2023.V11.I3A.2024>
- Suraj Poudel. (2020). *Organic Matter determination (Walkley-Black method)*. 3–15. https://www.researchgate.net/publication/339941885_Organic_Matter_determination_Walkley_-

Black_method?channel=doi&linkId=5e6e50fc92851c6ba7063044&showFulltext=true

Tarasov, A., Podlesnykh, I., Tarasov, S., & Kaluzhskih, A. (2025). Distribution of soil moisture on slopes of an agroforestry landscape complex. *E3S Web of Conferences*, 613, 05005.

<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202561305005>

Udawatta, R. P., & Gantzer, C. J. (2022). Soil and water ecosystem services of agroforestry. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77(1), 5A-11A.

<https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.1028A>

Verchot, L. V., Meine, A. E., Noordwijk, V., Serigne, A. E., Ae, K., Tomich, T., Chin, A. E., Ae, O., Ae, A. A., Ae, J. M., Bantilan, C., Ae, A. K. V. A., Palm, C., Verchot, L. V., Van Noordwijk, Á. M., Kandji, Á. S., Tomich, Á. T., Ong, Á. C., Albrecht, A., ... Anupama, Á. K. V. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12:5, 12(5), 901–918.

<https://doi.org/10.1007/S11027-007-9105-6>

Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 46(4).

<https://doi.org/10.1029/2008WR006829>

Vieira, D. L. M., Holl, K. D., & Peneireiro, F. M. (2009). Agro-successional restoration as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Restoration Ecology*, 17(4), 451–459. <https://doi.org/10.1111/J.1526-100X.2009.00570.X>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Webster, R. (2005). Hillel, D. Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2004. xvi + 494 pp. £37.50, hardback. ISBN 0-12-348655-6. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 684–684. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2005.0756D.X>

Young, Anthony. (1998). *Agroforestry for soil management*. 320.