



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**POTENCIAL DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN BOSQUES
TEMPLADOS CON DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO EN
HUAYACOCOTLA, VERACRUZ**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. José Luis García Martínez

Director

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México, febrero de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**POTENCIAL DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN BOSQUES
TEMPLADOS CON DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO EN
HUAYACOCOTLA, VERACRUZ**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. José Luis García Martínez

Director

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Asesores

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Juan Capulín Grande

Dr. Josué Fabián Pérez Hernández

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México, febrero de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/001/2025

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E

Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado al alumno **José Luis García Martínez**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **No. 162551**, que presenta el manuscrito de tesis titulado **"Potencial de recarga de acuíferos en bosques templados con diferentes etapas de desarrollo en Huayacocotla, Veracruz"**, ha autorizado la impresión del mismo.

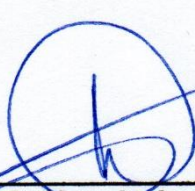
Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

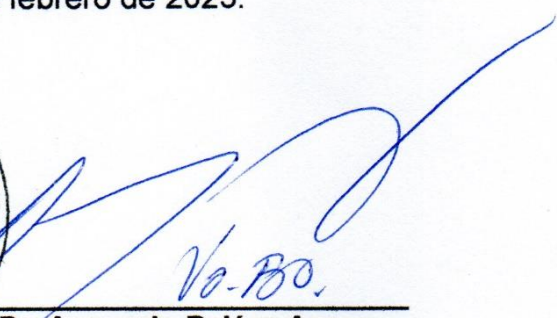
ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. a 04 de febrero de 2025.




Dr. Sergio Hernández León
Coordinador de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable


Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "Potencial de recarga de acuíferos en bosques templados con diferentes etapas de desarrollo en Huayacocotla, Veracruz.", que desarrolla el estudiante José Luis García Martínez.

Asistentes:

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Juan Capulín Grande

Dr. Josué Fabián Pérez Hernández

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por José Luis García Martínez, comunicando al estudiante, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 4 de febrero de 2025.

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Juan Capulín Grande

Dr. Josué Fabián Pérez Hernández



Handwritten signatures on lines

Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mis padres Ambrocio Inocencio García Gutiérrez y Patricia Martínez Martínez, por apoyarme siempre en cada proyecto que he decidido emprender, por su ejemplo y consejo.

A mis hermanas, Claudia Patricia García Martínez y Brenda Paola García Martínez, por estar al pendiente siempre y alentarme a lograr mis objetivos.

A mis sobrinas, Eliana Guadalupe Mejía García, Tania Vanessa Mejía García y Hanna Aylén Mejía García, por ser parte fundamental de mi existencia.

A todos mis amigos, que se han vuelto familia y que integran una parte importante en mi persona.

A los bosques templados, uno de los ecosistemas más benévolos con el ser humano, que nos sustentan desde nuestro primer aliento hasta el ocaso de nuestra existencia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al Instituto de Ciencias Agropecuarias, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y desarrollar este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por apoyarme económicamente, lo que me permitió alcanzar este objetivo de una forma satisfactoria.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna, por aceptar ser mi director de tesis, pero también, por brindarme su amistad, apoyo y consejos, factores importantes para la ejecución de esta investigación.

A mis asesores el Dr. Ramón Razo Zárate, Dr. Juan Capulín Grande y Dr. Josué Fabián Pérez Hernández, por aceptar ser parte de este equipo y conducirme oportunamente durante todo el proyecto.

Al ejido Viborillas Ojo de Agua, Juan Venancio Durán Gayosso, Pedro Ríos Fajardo, Jesús Rivera Licon, Graciela Soto Ríos, Urbano Cabañas Durán, Inés Soto Gayosso, Hilario Vargas Ortega y a sus asesores técnicos el Ing. Raúl García de la Cadena Villanueva y el Ing. Andrés Reynoso Pérez, por brindarme la confianza y abrirme las puertas del ejido para realizar esta investigación.

A María de los Ángeles Ramírez Angelino, Karla Herrera Fernández, Urbano Cabañas Durán, David Gayosso, Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna y Prof. Ambrocio García Gutiérrez, por apoyarme en la toma de datos y muestras en campo, cruciales para el desarrollo de este trabajo.

Al bosque por proveernos de tantos servicios ecosistémicos, entre ellos, uno de los más importantes, abastecer del vital líquido a todo ser viviente del mundo.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE GRÁFICOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3.- HIPÓTESIS	3
4.- ANTECEDENTES	4
4.1. Vegetación de México y los bosques templados	4
4.2. Etapas de desarrollo del bosque	5
4.3. Servicios ambientales	6
4.4. Ciclo hidrológico y balance hídrico	7
4.5. Infiltración	9
4.6. Infiltrómetros	10
4.7. Evapotranspiración	10
4.8. Lluvia interceptada por el follaje	11
4.9. Suelos forestales	11
4.10. Densidad aparente	13
4.11. Hidrómetro de Bouyoucos	14
4.12. Materia Orgánica	14
4.13. Estudios relacionados	15
5.- METODOLOGÍA	18
5.1. Área de estudio	18
5.2. Etapas de desarrollo del bosque	19
5.3. Infiltración	24

5.4. Contenido de humedad	26
5.5. Densidad aparente y porosidad	27
5.6. Textura del suelo	27
5.7. Materia orgánica	29
5.8. Potencial de hidrógeno	31
5.9. Perfil de suelo	31
5.10. Evapotranspiración potencial	32
5.11. Lluvia interceptada por el follaje	33
5.12. Balance hídrico	34
5.13. Diseño experimental	34
5.14. Análisis estadístico	35
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1. Velocidad de infiltración	36
6.2. Contenido de humedad	43
6.3. Textura	44
6.4. Densidad aparente y porosidad	45
6.5. Contenido de materia orgánica	46
6.6. Análisis de correlación de Pearson	46
6.7. Potencial de hidrógeno	47
6.8. Evapotranspiración potencial	48
6.9. Lluvia interceptada por follaje	50
6.10. Balance hídrico	52
7.- CONCLUSIONES	54
8.- REFERENCIAS	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1:	Velocidad de infiltración y contenido de humedad del suelo por etapa de desarrollo del bosque en el ejido Viborillas Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz.....	36
Cuadro 2:	Clase textural del suelo de las etapas de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	44
Cuadro 3:	Densidad aparente, porosidad y materia orgánica del suelo en el bosque templado del ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	45
Cuadro 4:	Coeficiente de variables evaluadas en diferente etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	47
Cuadro 5:	Evapotranspiración potencial mensual en Huayacocotla, Veracruz..	49
Cuadro 6:	Retención de agua de lluvia por el follaje en el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua Huayacocotla, Veracruz.....	50
Cuadro 7:	Balance hídrico para el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1:	Tasa de infiltración en la etapa de Brinzal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	37
Gráfico 2:	Tasa de infiltración en la etapa de Vardascal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	38
Gráfico 3:	Tasa de infiltración en la etapa de Latizal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	38
Gráfico 4:	Tasa de infiltración en la etapa de Fustal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	39
Gráfico 5:	Tasa de infiltración en el área de Conservación del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	40
Gráfico 6:	Comparación de la velocidad de infiltración por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	41
Gráfico 7:	Número de raíces por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	42
Gráfico 8:	Área cubierta por raíces por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	42
Gráfico 9:	Potencial de hidrógeno en las etapas de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	48

Gráfico 10:	Evapotranspiración potencial mensual	49
Gráfico 11:	Comparación de la retención mensual por follaje con respecto a la precipitación media mensual en el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Etapas de crecimiento del arbolado de un bosque de <i>Pinus patula</i> en la Sierra Alta Hidalguense.....	6
Figura 2:	Ciclo hidrológico.....	8
Figura 3:	Ubicación del ejido Viborillas Ojo de Agua (pruebas de infiltración) Huayacocotla, Veracruz.....	18
Figura 4:	Condición actual del Brinzal en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	20
Figura 5:	Condición actual del Vardascal en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	21
Figura 6:	Condición actual del Latizal en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz	22
Figura 7:	Condición actual del Fustal en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz	23
Figura 8:	Condición actual del área de Conservación en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz	24
Figura 9:	Infiltrómetro de doble anillo para evaluar la capacidad de infiltración de agua en el bosque.....	25
Figura 10:	Funcionamiento del infiltrómetro de doble anillo. Aforamiento del anillo interno (A), Relleno de ambos anillos e inicio de la prueba (B).....	26
Figura 11:	Barrena para extracción de muestras de suelo en bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	26

Figura 12: Muestras de suelo en estufa para obtener el peso seco constante.....	27
Figura 13: Determinación de la textura mediante el hidrómetro de Bouyoucos. Aplicación de $C_5H_{11}OH$ (A), Lectura del hidrómetro (B), Toma de temperatura en grados centígrados (C).....	28
Figura 14: Triángulo de las texturas del suelo.....	29
Figura 15: Procedimiento para calcular la cantidad de MOS. Suelo, $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 (A), Solución para titular (B), Titulación con $FeSO_4$ (C).....	30
Figura 16: Categorización del pH de los tratamientos evaluados. Muestra de 10 g de suelo (A), Solución 1:2 (B), Lectura con el potenciómetro (C).....	31
Figura 17: Perfil de suelo. Raíces en el perfil (A), Medición del diámetro de raíz (B), Lectura del diámetro con el vernier (C).....	32

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial de recarga de los acuíferos en bosques bajo manejo silvícola en diferentes etapas de desarrollo, mediante pruebas de infiltración, para adecuar estrategias de manejo que favorezcan la capacidad de absorción de agua de lluvia en Huayacocotla, Veracruz. Para el desarrollo de esta investigación se evaluó la capacidad de infiltración de agua de lluvia en bosques templados bajo manejo silvícola en Huayacocotla, se tomaron tres muestras por etapa de desarrollo del bosque: Brinzal (0.1 a 1.5 m de altura), Vardascal (> 3 m), Latizal (\pm 10 m), Fustal (> a 20 m) y el testigo fue el área de Conservación. Se evaluaron el contenido de humedad, textura, densidad aparente, porcentaje de porosidad, cantidad de materia orgánica, pH, número de raíces, área cubierta por raíces e infiltración (empleando el método del infiltrómetro de doble anillo). El análisis de varianza mostró diferencias no significativas ($P \leq 0.05$) en las variables densidad aparente ($0.4321 \text{ gr cm}^{-3}$), porosidad (83.7%) y materia orgánica (33.2%). Por el contrario, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en el contenido de humedad, pH, área cubierta por raíces; ($P \leq 0.01$) número de raíces y la velocidad de infiltración por etapa de desarrollo del bosque. El bosque que se encuentra en etapa de desarrollo Fustal tuvo el promedio mayor de contenido de humedad (48.25 %) mientras que el Brinzal el menor (42.20 %). Respecto a la infiltración se estimó en promedio $3,569.8 \text{ mm h}^{-1}$, en contraste con el bosque en plena regeneración (etapa de Brinzal) con $1,126.0 \text{ mm h}^{-1}$, habiendo una diferencia calculada de $2,443.8 \text{ mm h}^{-1}$. Se encontró que la concentración de pH fue menos ácido en Vardascal (5.23) comparado con el área de Conservación (4.65). En la etapa de Latizal fue mayor el número de raíces presentes en el suelo (61.1) y menor en la etapa de Brinzal (15.3) lo que representa que hay 75 % más raíces en el suelo en la etapa de Brinzal. El área cubierta por raíces fue superior en el Fustal con 7.8 cm^2 al contrario del Vardascal con el valor más bajo de 1.7 cm^2 . La textura del suelo fue similar, media, en los sitios de muestreo. Se concluye que el bosque de pino en etapa Fustal posee mayor velocidad de infiltración del agua de lluvia.

Palabras clave: Bosque templado, etapa de desarrollo, Huayacocotla, capacidad de infiltración, infiltrómetro de doble anillo, manejo silvícola.

ABSTRACT

The objective of this research was to determinate the recharge potential of aquifers in forests under silvicultural management at different stages of development, through infiltration tests, to adjust management strategies that enhance the rainwater absorption capacity in Huayacocotla, Veracruz. For development of this research it was determined the rainwater infiltration capacity of temperate forests under silvicultural management in Huayacocotla, three sites were sampled by stage of forest development: Brinzal (0.1 a 1.5 m in height), Vardascal (> 3 m), Latizal (\pm 10 m), Fustal (> a 20 m) and a Conservation area as control. Moisture, texture, bulk density, porosity, organic matter, pH, number of roots, root covered area and soil water infiltration rate (using the double-ring infiltration) were evaluated. Analysis of variance showed non-significant differences ($P \leq 0.05$) in the bulk density ($0.4321 \text{ gr cm}^{-3}$), porosity (83.7%) and organic matter (33.2%). Significant statistical differences ($P \leq 0.05$) were found in moisture content, pH, root covered area; ($P \leq 0.01$) number of roots and soil water infiltration rate by forest development stage. The forest that is in the Fustal stage had higher average moisture content (48.25 %) compared to Brinzal (42.20 %) as well as average infiltration $3,569.8 \text{ mm h}^{-1}$, in contrast to the forest in full regeneration (Brinzal stage) with $1,126.0 \text{ mm h}^{-1}$, with a difference of $2,443.8 \text{ mm h}^{-1}$. The pH was higher (5.23) in the Vardascal with a difference of a 0.58 with the Conservation area (4.65). The maximum number of roots was found in the Latizal (61.1), the minimum in the Brinzal (15.3), which means that in Latizal stage there are 75 % more roots in the soil. The covered area by roots was higher in the Fustal with 7.8 cm^2 in contrast to the Vardascal with lowest value of 1.7 cm^2 . Soil texture was similar, loam, at the sampling sites. In conclusion, the forest in the Fustal stage has a higher soil water infiltration rate.

Key words: Temperate forest, development stage, Huayacocotla, infiltration capacity, double-ring infiltrometer, silvicultural management.

1.- INTRODUCCIÓN

Los bosques templados de México son el segundo bioma más extenso del país, ocupando el 21 % del territorio, siendo uno de los más diversos debido a que gran parte de las especies que conforman el estrato arbóreo tienen su origen en las montañas del territorio nacional (Guzmán-Mendoza et al., 2014). Estos ecosistemas son fundamentales en el ciclo del agua, pues su vegetación y suelo ayudan a mantener calidad, cantidad y contribuyen a la reducción de riesgos relacionados con el agua, como desprendimientos de tierra, inundaciones y sequías; además, que permite que el agua que cae sea retenida y pueda infiltrarse (CONAFOR, 2020).

El agua que cae en determinada zona puede presentarse de distintas maneras (lluvia, neblina, nieve, rocío, entre otras). El volumen que logra atravesar la superficie del terreno, ocupando total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo, se denomina infiltración, que llega a recargar los acuíferos; parte del agua es absorbida por la vegetación, que más tarde se devuelve a la atmósfera a través de la transpiración (PLADEYRA, 2002).

Se puede asegurar que todo ser que puebla la tierra depende del agua. El hombre la necesita para cubrir sus necesidades básicas, para actividades recreativas, energéticas, manufactura y producción agrícola. Como resultado del incremento poblacional a nivel mundial y del mejoramiento de sus condiciones de vida, se ha originado un aumento exorbitante sobre la demanda de agua, infortunadamente no siempre es posible satisfacer las necesidades humanas y por su escasez es imposible disponer de este líquido vital. Una de las funciones ecológicas de los bosques es el mantenimiento del equilibrio ambiental de las cuencas, garantizando el abasto de agua (Zavaleta-Huerta et al., 2012).

Se estima que los bosques templados infiltran alrededor de 1.2 billones de metros cúbicos de agua, que representan un 2.5 % del total nacional (Monárrez-González et al., 2018). No todos los escurrimientos alcanzan al cuerpo hidrológico, pues estos sufrirán pérdidas, de modo que, se requiere evaluar los recursos hídricos de una cuenca, que comprenda la correcta estimación del balance hidrológico y sus distintas fases: evapotranspiración, escorrentía e infiltración (PLADEYRA, 2002).

Huayacocotla, Veracruz, es una región que sustenta su economía en la silvicultura; permitiendo preservar sus bosques a lo largo de su trayectoria silvícola. Esto ha sido posible mediante el manejo forestal sustentable, favoreciendo la calidad de vida de las comunidades forestales y propiciando las condiciones para conservar la biodiversidad. Estos ecosistemas brindan servicios ambientales a las comunidades rurales y urbanas como agua y aire limpio, igualmente proveen productos tangibles como madera, papel, resinas, plantas medicinales, combustible, entre otros (CONAFOR, 2018). El municipio de Huayacocotla, contribuye en el abasto del recurso hídrico a los acuíferos 3014 Álamo-Tuxpan, 3017 Tampico-Misantla y 1314 Metztitlán, sin embargo, existe fuerte presión sobre los bosques de Huayacocotla por parte de otros sectores productivos como la ganadería, la agricultura y asentamientos humanos, principalmente, mismos que no están del todo regulados.

La silvicultura, al ser la actividad económica preponderante en la región a la par de ser sobre-regulada, existe el riesgo de que ocurran cambios de uso de suelo irregulares, poniendo en riesgo la permanencia de estas zonas; y con ello, la capacidad de infiltración de agua, promoviendo la escorrentía y pérdida de suelo (Dueñez-Alanís et al., 2006); es por ello, que a pesar de conocer los beneficios de los bosques, existe poca información sobre el balance hídrico, por lo tanto, es imperante saber el potencial de recarga a los acuíferos a través de los bosques bajo manejo silvícola en Huayacocotla, por lo que el presente trabajo de investigación planteo:

2.- OBJETIVOS

2.1.- Objetivo general

Determinar el potencial de recarga de los acuíferos en bosques bajo manejo silvícola en diferentes etapas de desarrollo, mediante pruebas de infiltración, para adecuar estrategias de manejo que favorezcan la capacidad de absorción de agua de lluvia en Huayacocotla, Veracruz.

2.2.- Objetivos específicos

- Determinar la capacidad de infiltración de los bosques con diferentes etapas de desarrollo.
- Comprobar y evaluar las características fisicoquímicas de los suelos relacionadas con la infiltración.
- Estimar la evapotranspiración potencial en el área del objeto de estudio.
- Calcular el volumen de lluvia interceptada por el follaje.
- Proponer el balance hídrico en el área del objeto de estudio.

3.- HIPÓTESIS

¿Es posible modificar el potencial de infiltración de agua de lluvia cuando se altera la estructura vegetal, al aplicar los tratamientos silvícolas que contempla el aprovechamiento forestal maderable?

4.- ANTECEDENTES

4.1.- Vegetación de México y los bosques templados

México se ubica entre los diez países más diversos del mundo, concentrando el 10 % de la biodiversidad terrestre y un alto índice de endemismo (Mittermeier y Goettsch, 1992). Es evidente que la razón principal de la riqueza florística de México, se debe a su variedad de condiciones fisiográficas y climáticas, pero también su distribución geográfica; en el país prosperan diez tipos de vegetación donde se representan todos los biomas del planeta (Rzedowski, 2006).

El estado de Veracruz ocupa el tercer lugar en diversidad biológica, detrás de Oaxaca y Chiapas. En su territorio es posible encontrar cerca de 8,500 especies de plantas vasculares, que representa el 36.5 % de la flora del país. En la entidad se encuentran todos los tipos de vegetación reportados para México (Castillo-Campos et al., 2011; Villaseñor, 2016). Márquez-Ramírez y Márquez-Ramírez (2009), aseguran que Huayacocotla ostenta una superficie de 14,131.7 hectáreas que de ellas 10,337.8, están conformadas por tres tipos de vegetación primaria, tales como: bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña.

Específicamente, los bosques templados, son comunidades dominadas por árboles altos mayormente pinos y encinos acompañados por otras especies. Se ubican en zonas montañosas en altitudes entre los 2,000 y 3,400 msnm; en clima templado a frío con temperaturas promedio entre los 12 y 23 °C. Con precipitaciones anuales de 600 a 1,000 mm. Crecen en suelos de textura variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos. México sustenta el 50 % de las especies de pino a nivel mundial y alrededor del 33 % de encinos. Se calcula que los bosques templados poseen aproximadamente 7,000 especies de plantas. Se distribuyen en mayormente en el norte y el sur de Baja California, a lo largo de las Sierras Madre Occidental y Oriental, en el Eje Neovolcánico, la Sierra Norte de Oaxaca y en el sur de Chiapas; ocupando el 16 % del territorio mexicano. Brindan diversos servicios ambientales entre los que destacan la captura de carbono, producción de oxígeno y recarga de los mantos acuíferos (CONABIO, 2021).

4.2.- Etapas de desarrollo del bosque

El bosque pasa por diferentes etapas de desarrollo, desde que surgen las plántulas hasta que llegan a su madurez. En general, en una masa arbórea se establecen cinco etapas que se denominan: brinzal, monte bravo, vardascal, latizal y fustal (Figura 1). Para comprender mejor el concepto a continuación se describe cada etapa de desarrollo del bosque.

Brinzal

Se trata de la etapa inicial cuando se establecen las plántulas, en bosques cultivados, tras una corta de regeneración o corta total. Se caracteriza por que aún no se obtienen productos forestales derivados de las limpiezas vegetales.

Monte bravo

Es la segunda etapa de desarrollo, se identifica por la fuerte competencia entre individuos por la radiación solar, espacio, nutrientes. Aquí las ramas inferiores se secan, tejiendo una red impenetrable hacia dentro del bosque.

Vardascal

Esta etapa presenta alta densidad con individuos delgados y flexibles, los cuales ya han perdido ramas, acumulándose gran cantidad de materia muerta sobre el suelo. Cuando se interviene con pre-aclareos, los productos (no comerciales) que se obtienen son leña, puntales y postes.

Latizal

En esta etapa los árboles presentan mayor crecimiento en altura y la poda natural se hace más evidente. También, las copas se diferencian y tras el aprovechamiento se consiguen productos como: puntales, polines, madera en rollo (cortas dimensiones) y material celulósico.

Fustal

Es la etapa final de desarrollo del bosque, es cuando los árboles alcanzan la madurez fisiológica, se termina la poda natural y se producen grandes cantidades de semillas. Es ahora cuando se realiza la cosecha final del bosque,

pues el arbolado alcanza su máximo crecimiento, y mayor cantidad de productos de aserrío, se trata de su turno comercial (Ronquillo-Gorgúa et al., 2022).



Figura 1. Etapas de crecimiento del arbolado de un bosque de *Pinus patula*, en la Sierra Alta Hidalguense. **Fuente:** Imagen tomada de Ronquillo-Gorgúa et al. (2022).

4.3.- Servicios ambientales

Existe un reciente interés por los servicios ambientales que proporcionan los bosques, entre ellos: la estabilización climatológica, el almacenaje de carbono, la protección de las funciones hídricas y la conservación de la biodiversidad. Hasta hace poco no se hablaba de la relación entre el cambio climático y la deforestación (Jenkins, 2002). Según datos de la FAO en 2001, durante los años noventa se perdieron alrededor de 15 millones de hectáreas de bosque por año y con ellas, los servicios hidrológicos (Myers, 1997). Los bosques, además de contribuir en la regulación de los flujos hídricos, reducen la sedimentación. Los cambios en la cobertura forestal, reducen la cantidad y calidad de dichos flujos en la parte baja de la cuenca (Pagiola et al., 2003).

Muñoz-Piña et al. (2008), propone que la causa principal de la deforestación en México es el cambio de uso del suelo intencionado por usos alternativos más rentables como la agricultura, ganadería y en menor proporción el uso urbano, y que factores como la pobreza y la marginación ponen en riesgo la sustentabilidad, pues los usos agropecuarios con plazos de recuperación más cortos son los más atractivos en contraparte con la silvicultura como sector a

largo plazo. Sumado a ello, los subsidios a la agricultura y las políticas de comercialización de la madera, fomentan el cambio de uso de suelo forestal y el manejo no sustentable de los bosques (Pagiola et al., 2003).

La sobreexplotación de los acuíferos, la degradación de la calidad del agua y las altas tasas de deforestación ponen en riesgo la posibilidad de que las generaciones futuras cubran sus necesidades; los usuarios de las partes bajas de las cuencas proponen reducir esta situación mediante el financiamiento de la conservación forestal. Al mismo tiempo propietarios y productores buscan la compensación por el mantenimiento de sus bosques (Jenkins, 2002; Muñoz-Piña et al., 2008).

En 2003, el gobierno federal mexicano implementó el programa de Pago de Servicios Hidrológicos que contempla un incentivo para aminorar los problemas de agua y deforestación (Muñoz-Piña et al., 2008). El mercado de los servicios ecosistémicos resulta atractivo para conservar los bosques ofreciendo una fuente de ingreso a los habitantes de las zonas rurales (Jenkins, 2002; Landell-Mills y Porras, 2002). Sin embargo, recolectar los pagos de los beneficiarios de los servicios ambientales no será relevante sobre el manejo silvícola, hasta que los pagos lleguen a los dueños y poseedores de los bosques (Pagiola et al., 2003).

Aunque en México, existe poca información, algunos estudios como el de García-Coll (2002), señala que el bosque mesófilo de montaña del estado de Veracruz es importante en la regulación de flujos de agua superficial. Por su parte, Carrillo-Rivera (2002), asegura que los bosques de la Sierra Gorda son fundamentales en la recarga de los acuíferos que abastecen a las ciudades de Querétaro y San Juan de Río (Muñoz-Piña et al., 2008).

4.4.- Ciclo hidrológico y balance hídrico

El ciclo hidrológico, comprende el movimiento del agua; ascendente por medio de la evaporación, descendente mediante la precipitación, para posteriormente pasar a la fase de escorrentía superficial y subterránea (Sánchez-San Román, 2001). Se suele decir que comienza en los océanos; el calor del sol rompe los enlaces que mantienen unidas las moléculas del agua, promoviendo así la evaporación. Cuando la humedad relativa del aire alcanza el

100 %, comienza la condensación, es el momento justo en que el vapor de agua se convierte en agua líquida, generando las nubes (Figura 2). Estas al estar sometidas a condiciones de presión y temperatura, originan las precipitaciones. Una parte del agua de las precipitaciones da lugar al agua superficial que fluye hasta el mar. Otra se evapora y el sobrante se infiltra en el suelo. Esta agua de infiltración, atraviesa una zona no saturada que llega a evapotranspirarse por efecto de las plantas o bien, llegar a los acuíferos (De Miguel et al., 2009).

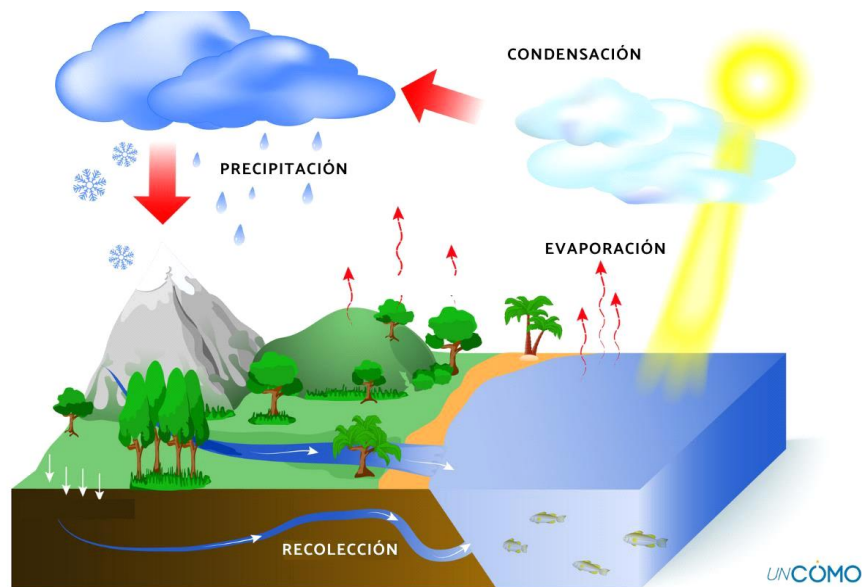


Figura 2. Ciclo hidrológico. **Fuente:** Imagen tomada de Calvo-Sánchez, (2022).

El balance hídrico se basa en el principio de conservación de masa que involucra los volúmenes de agua por unidad de tiempo, que ingresan y egresan de la cuenca; constituye una herramienta básica para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas y sus componentes permiten evaluar los elementos relevantes que rigen el sistema hídrico. El cálculo del balance hídrico consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida, así como aquellos de consumo y retorno que ocurren al interior de la cuenca, para obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el que se cuantifican los flujos (Gómez-Reyes, 2013).

La evaluación de los recursos hídricos de la cuenca requiere de la estimación correcta del balance hidrológico, comprendiendo las diferentes fases. La precipitación representa el total de agua que cae en una zona determinada y

puede presentarse en distintas maneras: lluvia, neblina, nieve, rocío, entre otras. Una vez que el agua se recibe por precipitación, se distribuye entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración (PLADEYRA, 2002).

4.5.- Infiltración

La infiltración es un proceso complejo que consiste en la entrada del agua en el suelo, procedente de las precipitaciones y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo, que se debe a fuerzas capilares y gravitacionales (PLADEYRA, 2002; Martínez de Azagra-Paredes y Navarro-Hevia, 2007). En principio las primeras, dominan las tasas de infiltración debido al fuerte gradiente mátrico generado por el bajo contenido en humedad del suelo; con el paso del tiempo y la distribución del agua en el perfil, serán las fuerzas gravitacionales las que ejercerán influencia (Cerdà-Bolinches, 1993). Smith (1972) propone, por un lado, que el encharcamiento depende de la intensidad de la lluvia, si esta aumenta también lo hará la infiltración. Además, asegura que la intensidad de la precipitación interactúa con las características físicas del suelo, que serán las que controlen la saturación hídrica y la capacidad de infiltración. Para llegar a la infiltración final estable, que estará determinada por la conductividad hidráulica saturada en el suelo.

Algunos factores que pueden alterar la velocidad media de la infiltración son la presencia de mantillo (aumenta), cercanía de los cuerpos de agua, textura edáfica, estructura, material inorgánico, espacio poroso y edad del ecosistema, (García-Hernández et al., 2008; Pérez-Hernández et al., 2023), además del contenido de humedad, materia orgánica, temperatura del suelo, calidad de agua (Tomasella et al., 2003; Saxton y Rawls, 2006). Carlos-Gómez et al. (2014), señalan que debido a lo anterior y a la compactación, son las tierras forestales quienes tienen mayor capacidad de infiltración en comparación con las tierras de cultivo y pastoreo, siendo las últimas las que tienen la capacidad de infiltración más baja. Es importante destacar que la conductividad hidráulica aumenta por el crecimiento de las raíces, contribuyendo al incremento de la velocidad de infiltración de agua subsuperficial (Morikawa-Sakura y Yoshitaka, 2014). Con estos antecedentes se puede visualizar porqué las áreas forestales destacan en la capacidad de infiltración y se ha encontrado que el bosque mesófilo de

montaña es el tipo de vegetación que tiene la capacidad más alta, debido a la cantidad de materia orgánica que se encuentra contenida en el suelo, pero más aún al origen de esta, es decir, que favorece más la infiltración de agua la materia orgánica producida por ramas y ramillas, que la generada a partir de gramíneas (Lozano-Trejo et al., 2020).

4.6.- Infiltrómetros

Para realizar la medición directa de la infiltración, se han desarrollado herramientas que permiten hacer parcelas en diferentes suelos, son llamados infiltrómetros, se dividen entre aquellos que utilizan el agua de lluvia, simulada o no, y aquellos que se basan en el encharcamiento de la superficie del suelo (infiltrómetro de cilindro). De éstos últimos existen simples o de doble anillo. El problema con esta técnica es el flujo lateral, para ello, la mejor solución es la utilización de un anillo exterior (infiltrómetro de doble anillo), este mantiene una columna de agua que envuelve al anillo central durante el proceso de infiltración (Cerdà-Bolinches, 1993).

4.7.- Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor tasa de evapotranspiración ocurre cuando el suelo está a capacidad de campo, es por ello que cuando la humedad del suelo disminuye, las hojas de las plantas cierran sus estomas para economizar agua, reduciendo así la transpiración. Cuando la humedad del suelo alcanza el punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere (Schosinsky, 2006).

Cuando se presenta un evento de precipitación, el agua fluye a través del suelo llevándolo a capacidad de campo, es aquí cuando ocurre la máxima acumulación de agua sin llegar a saturarlo. Una vez concluido el evento de precipitación, comienza el de evapotranspiración, aprovechando las raíces el agua que necesitan; si la infiltración es suficiente para alcanzar la capacidad de campo y cubrir la evapotranspiración, el resto del agua infiltrada realizará el proceso de percolación, elemento clave del ciclo del agua en la recarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

Debido a que generalmente la disponibilidad de agua depende de la capacidad de captación, es imprescindible emplear métodos como los balances hídricos para estimar el comportamiento hidrológico. Estos balances comparten el principio de conservación de la materia; existen distintas formas de estimarse, entre ellos los estadísticos, funciones determinísticas, métodos numéricos y teóricos, además de las aproximaciones semi-empíricas (Santillán-Gutiérrez et al., 2013).

4.8.- Lluvia interceptada por el follaje

El estrato arbóreo tiene gran influencia en la hidrología de los ecosistemas forestales. La parte de la precipitación que atraviesa el dosel quedando temporalmente almacenada y que más tarde regresa a la atmósfera por efecto de la evaporación, se denomina como pérdida por intercepción. La pérdida por intercepción puede variar del 10 al 25 % en bosques caducifolios y hasta 40 % en bosques perennes. Por ende, los cambios en la estructura del dosel tendrán un impacto en la intercepción pudiendo alterar la humedad del suelo y la escorrentía superficial (Sadeghi et al., 2015). Aussenac (1981), establece el porcentaje de intercepción para cinco especies del género *Pinus* spp., resultando un promedio de 32.5 %; y para *Quercus* spp., 25.3 %. En este mismo tenor, Flores-Ayala et al. (2016), reportó 19.2 % de intercepción para *Pinus hartwegii*. Por su parte, Butler (1957), manifiesta que la retención de la lluvia en follajes es del 12 % y Linsley et al. (1958) considera un 20 % (Schosinsky, 2006).

4.9.- Suelos forestales

Entre las diversas capas que conforman el planeta, se encuentra la pedosfera (el suelo), constituida por una fase sólida, compuesta por minerales y partículas orgánicas; una líquida, la parte soluble; y una gaseosa, por el aire en el suelo y su intercambio con la atmósfera. El suelo brinda el sustento para la vida, ofreciendo amplia gama de servicios, como su función productiva en la silvicultura, siendo el medio que provee de nutrientes, agua, aire y sostén para la vegetación. Además, actúa como filtro purificando el agua y como almacenamiento de agua, regulando los flujos hídricos contribuyendo al ciclo hidrológico (Thiers et al., 2014).

Las propiedades del suelo son propias de sus constituyentes, haciéndolo un sistema complejo donde ocurren procesos físicos, químicos y biológicos, imposibles de estudiar aisladamente (Donoso, 1992). Los suelos forestales, son entes naturales donde mantienen sus características originales o cercanas a ellas (Schlatter-Vollmann, 1993).

Perfil del suelo

Un perfil de suelo está dividido en horizontes, el horizonte O (mantillo) está conformado por material orgánico, siendo la fuente de nutrimentos y es la cubierta que protege al suelo mineral de la erosión y temperaturas extremas (Donoso, 1992). El horizonte A, ubicado debajo del O, se trata de una mezcla de material orgánico humificado con material mineral. El horizonte E, es la capa con menor concentración de arcillas, hierro, aluminio y materia orgánica. El horizonte B, contiene gran cantidad de arcillas silicatadas, hierro, aluminio y humus, lixiviados de los horizontes superiores. El horizonte más profundo se identifica con la letra C, con un grado de meteorización y muy baja actividad biológica; cuando se encuentra roca consolidada, se representa con la letra R, roca madre (Thiers et al., 2014).

Textura

La composición granulométrica, se refiere a la distribución del tamaño de partículas con diámetros de ≤ 2 mm que componen el suelo (fracción fina): arena, limo y arcilla. La textura es un factor importante, ya que influye en la porosidad, estructura, retención de agua, drenaje, disponibilidad de nutrientes e incluso, la vegetación que puede establecerse (Schlatter-Vollmann, 2003). La clase textural se clasifica dependiendo de la proporción cuantitativa de partículas de arena, limo y arcilla que componen el suelo. La fracción de arena se ubica entre los 0.05 a 2 mm, provenientes de la desintegración del material que le dio origen y que no han sido alterados químicamente, como el cuarzo, mica, feldespatos y raramente zircón y hornablendas. El limo posee diámetros entre 0.002 a 0.05 mm, son partículas más similares a las arcillas. La fracción más pequeña ostenta un tamaño menor a 0.002 mm, pertenecen a minerales conocidos como silicatos de aluminio; las arcillas son las responsables del intercambio de agua y elementos químicos (Thiers et al., 2014).

Porosidad

El volumen que no ocupa la parte sólida, se denomina porosidad, clasificándose de acuerdo a su tamaño como micro, meso y macroporosidad. Los poros gruesos (macroporosidad), pueden ser ocupados por agua gravitacional y la mesoporosidad, son los poros que retienen el agua capilar disponible para las raíces. Los suelos de textura arcillosa limitan el movimiento del agua, ocasionando pérdidas por escurrimiento o evaporación; por otro lado, los suelos de textura intermedia permiten un equilibrio entre la infiltración, percolación y retención del agua. Para determinar la cantidad total de agua retenida en el suelo se calcula por medio de la diferencia entre el peso fresco de una muestra y su peso secado a 105 °C (Thiers et al., 2014).

Potencial de hidrógeno

Para medir la acidez o alcalinidad del suelo, se emplea el pH, que significa potencial de hidrógeno, es decir, el logaritmo negativo de la actividad de hidrógenos en una solución y establece la escala que va de 0 a 14. En los suelos forestales el pH varía de acuerdo con el material que le dio origen y el tipo de vegetación dominante. El pH de los suelos en climas húmedos son ácidos, derivado de la alta producción de ácidos orgánicos consecuencia de la descomposición parcial de la materia orgánica; además que, debido a la disolución del CO₂ atmosférico que forma ácido carbónico débil en el agua de lluvia, la precipitación puede causar acidificación natural en la mayoría de los suelos (Thiers et al., 2014).

4.10.- Densidad aparente

La densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, incluyendo el espacio poroso (Rubio-Gutiérrez, 2010). La estimación de este valor es fundamental para entender el crecimiento y penetración de las raíces, el desarrollo de las plántulas y el movimiento del agua en el suelo (USDA, 1999).

Existen diversos métodos para determinar la densidad aparente del suelo, entre los que destacan: método del cilindro metálico; método de excavación y

determinación del volumen extraído y método del terrón, siendo los dos primeros los más prácticos (Rubio-Gutiérrez, 2010).

4.11.- Hidrómetro de Bouyoucos

El método del hidrómetro se fundamenta en la sedimentación de partículas del suelo de acuerdo a su peso y tamaño; diferencialmente en un tiempo 1 y un tiempo 2. El hidrómetro mide los gramos de sólidos en suspensión por litro de agua (Ticona-Delgado, 2019). Este método se apoya en la Ley de Stokes, que se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos, moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds (Medina-González et al., 2007).

4.12.- Materia Orgánica

La materia orgánica se refiere a los residuos vegetales, restos de organismos y microorganismos que viven en y sobre el suelo, en diversas etapas de descomposición. El contenido y la calidad de esta, depende del tipo de suelo, manejo, tipo de vegetación e interacción ambiental (Riquelme-Urra, 2010). Son los suelos de hierba en climas húmedos donde se encontrará la mayor cantidad de materia orgánica; aunque es importante precisar que existe disminución en función de la profundidad (Méndez-Valdiviezo, 2016).

La importancia de la materia orgánica radica en la influencia que ejerce sobre el suelo, pues le confiere estructura; favorece la infiltración y retención del agua; disminuye la erosión; favorece el intercambio gaseoso; provee de nutrientes a la vida vegetal; favorece la mineralización; sirve de alimento a microorganismos y estimula el crecimiento de las plantas (Riquelme-Urra, 2010).

Los restos forestales, en específico la hojarasca, se divide en dos tipos: de características alcalinas y ácidas. La primera, consiste en materia de fácil descomposición proveniente de árboles caducifolios, rica en nitrógeno y celulosa, pobre en lignina; este tipo de hojarasca favorece la actividad de los microorganismos incorporándose rápidamente en el suelo (humus mull). Por otra parte, el humus mor (hojarasca ácida), es pobre en celulosa y nitrógeno, pero rica en lignina, es el caso de las acículas de los bosques de coníferas, éstas se acumulan en la superficie del suelo creando mantillos con espesores de 10 a 20

cm aproximadamente, debido a su lenta descomposición; no obstante, cuando se descomponen, los ácidos orgánicos liberados inhiben la actividad bacteriana, incrementando la acidez del suelo (Thiers et al., 2014).

Para caracterizar un suelo, es conveniente determinar el contenido de materia orgánica a partir de su contenido de carbono, un suelo rico en materia orgánica alcanza valores por encima del 10 %, contrario a los suelos pobres con porcentajes inferiores a 3 %. Para que un suelo pueda ser considerado como orgánico, se requiere proporciones de arcillas, saturación de agua y profundidad; por lo tanto, puede contener de 20 a 100 % de materia orgánica (Schlatter-Vollmann et al., 2003). Algunos métodos para conocer el contenido de materia orgánica en el suelo, son el propuesto por Walkley y Black (1934), que se fundamenta en la oxidación con ácido sulfúrico, del carbono contenido en el humus (Arévalo, 2022); y un método alternativo, basado en la pérdida por ignición, que consiste en la calcinación de una muestra de suelo a 455 °C, para determinar la cantidad de compuestos sólidos volátiles, asociados al contenido de orgánico del suelo (AASHTO, 2022).

4.13.- Estudios relacionados

Béjar-Pulido et al. (2021), en su estudio de evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo en el ejido de Toreo, El Alto en Uruapan, Michoacán, México, donde evaluaron la velocidad de infiltración en un bosque de coníferas de pino-encino, una parcela de aguacate orgánico, otra de aguacate convencional y un huerto de nuez de macadamia; sobre un suelo Andosol de textura media con valores bajos de densidad aparente (0.56-0.82 g cm³). En cada una de las áreas, se efectuaron tres repeticiones empleando el infiltrómetro de doble anillo. Los resultados encontrados fueron de 885.9 mm·h en forestal, 519.4 mm·h en macadamia, 413.6 mm·h en aguacate orgánico y 254.8 mm·h en aguacate convencional de infiltración acumulada. Sus conclusiones fueron que el cambio de uso de suelo forestal a uso agrícola genera impactos negativos en la infiltración, pero que un manejo con actividades de conservación representa una alternativa para mitigar el impacto.

José Dueñez-Alanís et al. (2006), en su trabajo manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión en la Hacienda

Santa Bárbara, Durango, México, donde determinaron durante los años 1998 y 1999 la infiltración, escurrimiento y erosión en un bosque con uso pecuario de apacentamiento en toda el área e intervención silvícola con aplicaciones de un segundo aclareo, un tercer aclareo y una corta de regeneración (1997) utilizando un simulador de lluvia. Los resultados obtenidos demostraron que en el primer año el pastizal produjo los valores más altos de escorrentía y de erosión, con bajos niveles de infiltración. El segundo aclareo la tasa de infiltración fue mayor y con bajos valores tanto en erosión como en escorrentía. En el segundo año la tendencia se mantuvo, con menor la escorrentía, un incremento de 150 % de la infiltración y reducción de la erosión en un 53 %, esto debido a la recuperación de la vegetación que cubre el suelo. Concluyendo que, el cambio de uso de suelo forestal a pecuario, incrementa el escurrimiento y erosión impactando en el descenso de la infiltración. Además, que los tratamientos silvícolas con aclareos o cortas de regeneración modifican temporalmente la capacidad de infiltración restableciéndose en el segundo año.

Pérez-Hernández et al. (2023), en su investigación sobre el efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, determinaron el contenido de materia orgánica, densidad aparente, porosidad, textura e infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo en tres áreas: área de conservación, en etapa de latizal (intervenida en 2005) y un área de reciente intervención (2016). Los resultados mostraron que el contenido de materia orgánica fue menor en el área intervenida en 2005 con 6.9 % comparado con el área de conservación que tuvo 16.5 %. La clase textural para los tres tratamientos fue franco-arenoso. La densidad aparente presentó 0.62 g cm⁻³ en el área 2016, 0.32 g cm⁻³ el área de conservación. La porosidad, 88 % en el área de conservación, pero menor en el área de 2005 con 77 %. Finalmente, la capacidad de infiltración en el área de conservación obtuvo un promedio de 1602.0 mm h⁻¹, mientras que el área de 2016 registró el valor más bajo con 24.0 mm h⁻¹. Concluyeron que, las características físico-hidrológicas en el suelo forestal se modifican de manera temporal por las actividades de aprovechamiento, aumentando la densidad aparente y disminuyendo la

porosidad e infiltración; recuperándose durante el establecimiento de las nuevas masas forestales.

5.- METODOLOGÍA

5.1.- Área de estudio

El estudio se realizó en el ejido Viborillas Ojo de Agua, que se ubica en la parte sureste del municipio de Huayacocotla, Veracruz, entre los paralelos 20° 25" y 20° 29" N y los meridianos 98° 26" y 98° 30" O; en un rango altitudinal de 2200 hasta 2674 m. Posee clima templado con lluvias en verano (Cw), con temperatura promedio anual de 12 a 18 °C (SEMARNAT-CONAFOR, 2013). Los valores de precipitación oscilan entre los 801 a 2,000 mm. Se localiza en la Región Hidrológica RH27 en la cuenca del Río Tuxpan y subcuenca del Río Vinazco; sobre el acuífero Álamo-Tuxpan (CONAGUA, 2023) (Figura 3).

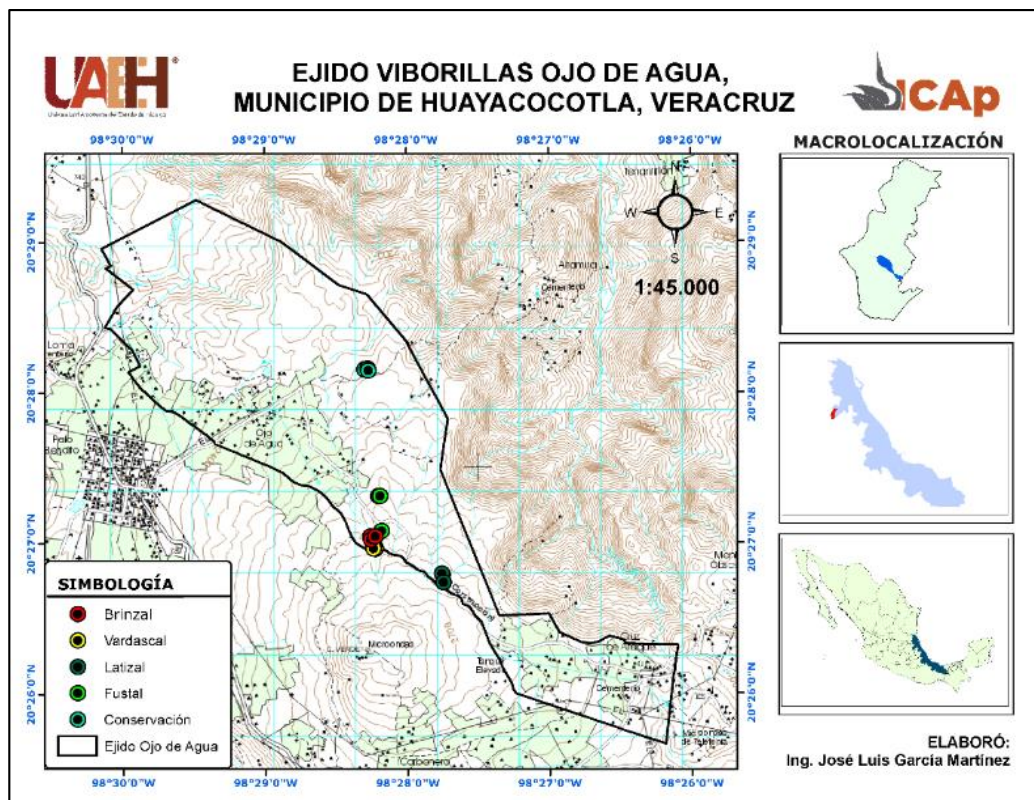


Figura 3. Ubicación del ejido Viborillas Ojo de Agua (pruebas de infiltración) Huayacocotla, Veracruz.

El área de estudio se sustenta en tres unidades de suelo: Luvisol háplico de textura fina, Regosol dístico y Cambisol crómico de textura media; de acuerdo con la carta edafológica serie II Pachuca de Soto F14-11 INEGI (2013). Presenta vegetación dominante de bosque de pino-encino de acuerdo con la cartografía del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de 2013, destacando

especies como *Pinus patula* Schltl. & Cham., *Pinus teocote* Schltl. & Cham., *Abies religiosa* Kunth Schltl. Et Cham, y *Quercus* spp (SEMARNAT-CONAFOR, 2013).

5.2.- Etapas de desarrollo del bosque

En el ejido Viborillas Ojo de Agua, se ha desarrollado un aprovechamiento forestal sustentable maderable que se basa en la aplicación del Método de Desarrollo Silvícola (MDS), un método intensivo que tiene como objetivo establecer masas regulares y coetáneas (de la misma edad), pues se trata de bosques donde la especie dominante es *Pinus patula*. El MDS, contempla distintos tratamientos silvícolas, la corta de regeneración que es el tratamiento principal y para el cual se dejan árboles padres o semilleros distribuidos en el total del área intervenida, este tratamiento promueve el establecimiento de un nuevo bosque, generando una condición conocida como Brinzal. Una vez establecida la nueva masa forestal, se procede con la corta de liberación y corta de preaclareo, que consisten en eliminar la competencia que representan los árboles semilleros y plántulas malconformadas hacia el renuevo, es aquí cuando surge la etapa de crecimiento definida como Vardascal. Más adelante, vendrán las cortas de aclareo (primero, segundo y/o tercero), en las que se retiran árboles dominados, mal conformados, dañados o en competencia, estos tratamientos darán lugar primero a Latizales y posteriormente a masas forestales denominadas como Fustales (Hernández-Salas, 2014).

Es por esta razón, que en el ejido Viborillas Ojo de Agua, se han generado bosques con diferentes etapas de desarrollo, proponiendo evaluar cinco áreas con diferentes etapas de desarrollo: *Brinzal*, *Vardascal*, *Latizal*, *Fustal* (Ronquillo-Gorgúa et al., 2022) y *Conservación*. En cada una de ellas se realizó un muestreo dirigido completamente al azar donde se establecieron tres sitios para medir la infiltración y se tomaron seis muestras de suelo (dos por cada sitio) para evaluar los parámetros físicos y químicos.

Para definir los escenarios, se eligieron áreas que presentaban condiciones similares de vegetación (pino-encino), con pendiente media (1-5 %) y suelo (Luvisol háplico de textura fina), pero que se encontraban en distintas etapas de desarrollo del bosque, a continuación, se describe cada una de ellas.

Brinzal

Esta condición se ubica en la parte centro-oeste del ejido Viborillas Ojo de Agua. Se sustenta sobre una unidad de suelo Luvisol háplico de textura fina y alto contenido de arcilla, de acuerdo a la carta edafológica serie II Pachuca de Soto F14-11 INEGI (2013). Presenta topografía semiplana con porcentaje de pendiente del 4 % y exposición noreste. El clima según la clasificación de Köppen (1884), es Cw, templado con lluvias en verano, con temperatura media anual de entre 12 °C y 18 °C. La precipitación media anual ronda entre los 801 y 2,000 mm. Posee vegetación de pino-encino, destacándose cuatro especies principalmente (*Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus ayacahuite* y *Quercus spp*). Presenta en promedio el grosor de mantillo de 4 cm. Se refiere al área de reciente intervención con corta de regeneración (2022) y árboles padres individuales (16 ha⁻¹), con reforestación de pino a distancia en promedio de 3X3 m en marco real generando la densidad de 1,100 plántulas distribuidas en la hectárea (Figura 4).



Figura 4. Condición actual del Brinzal en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Vardascal

Esta etapa se localiza contigua al Brinzal, presenta las mismas condiciones edafoclimáticas y de vegetación dominante que el resto de las etapas de desarrollo evaluadas. Posee topografía semiplana con porcentaje de pendiente del 1 %, exposición cenital, 5 cm de mantillo, regeneración establecida con individuos de 6 m de altura y 5 cm de diámetro, a la cual se le han aplicado podas de formación (Figura 5).



Figura 5. Condición actual del Vardascal en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Latizal

Esta fase se sitúa al suroeste del ejido, con topografía semiplana y pendiente del 5 %, exposición sureste y en promedio con 8 cm de mantillo. Consiste en una masa arbolada con ejemplares de 15 m de altura y 15 cm de diámetro; intervenida con cortas de aclareo y tratamientos complementarios como podas (Figura 6).



Figura 6. Condición actual del Latizal en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Fustal

Se encuentra al norte del Brinzal, tiene topografía semiplana y pendiente del 4 %, exposición norte y en promedio tuvo 7 cm de mantillo. Área con especímenes de 23 m de altura y 25 cm de diámetro, en ella se han realizado cortas de aclareo y podas (Figura 7).



Figura 7. Condición actual del Fustal en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Conservación

Se trata de una zona que ha estado en receso por más de 30 años, sin intervención, con arbolado mayor a 20 m de altura y 50 cm de diámetro, que converge al noreste del ejido. Las condiciones de suelo, clima, vegetación y precipitación son similares al encontrarse relativamente cercanas a las condiciones antes descritas. Cuenta con topografía semiplana y porcentaje de pendiente del 1 %, exposición oeste y en promedio tuvo 9 cm de mantillo (Figura 8).



Figura 8. Condición actual del área de Conservación en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

5.3.- Infiltración

Para determinar la capacidad de infiltración se empleó la metodología utilizada por Pérez-Hernández et al. (2023), el infiltrómetro de doble anillo, que consiste en dos cilindros metálicos, uno exterior de 35 cm de diámetro y otro interior de 25 cm de diámetro. Esta técnica se basa en mantener la lámina de agua a nivel constante, ya sea en función del tiempo o del descenso. En primer lugar, se retiró el material vegetal del suelo (ramas y ramillas), posteriormente se enterraron los anillos a la profundidad de 15 cm el exterior y 10 cm el interior, de tal manera que ambos estuvieran al mismo nivel. Para evitar que el agua se comenzara a infiltrar antes de iniciar la medición, se colocó una película plástica dentro del anillo interior. Acto seguido, se llenaron con agua ambos cilindros, se retiró la película del anillo e inició el registro de datos; con la finalidad de mantener la lámina de agua a nivel constante, una vez que descendía a los 14 cm, se rellenaba hasta el nivel superior nuevamente. Esto se repitió hasta que la velocidad de infiltración se estabilizó (Zapata-Sierra y Manzano-Agugliaro, 2008;

Pérez-Hernández et al., 2023). Para asegurarse de que las pruebas se realizaron a capacidad de campo, la prueba de infiltración se realizó un día después de ocurrencia de lluvia (Figuras 9 y 10).

Para el análisis de datos se aplicó la fórmula de Kostiakov, empleada por Chagoya-Fuentes et al. (2018):

$$I = a * t * b \quad (1)$$

Donde:

I=infiltración acumulada

t=tiempo acumulado

a y b= parámetros del suelo.



Figura 9. Infiltrómetro de doble anillo para evaluar la capacidad de infiltración de agua en el bosque.



Figura 10. Funcionamiento del infiltrómetro de doble anillo. Aforamiento del anillo interno **(A)**, Relleno de ambos anillos e inicio de la prueba **(B)**

5.4.- Contenido de humedad

Para determinar las características físicas y químicas del suelo, se extrajeron las muestras con barrena de 20 cm de profundidad (Figura 11). Para determinar el contenido de humedad al momento de las pruebas de infiltración, se pesaron las muestras en campo, después se introdujeron en la estufa de secado marca Grieve LW-201C® a 105° C (Figura 12) hasta obtener el peso seco constante y por diferencia se obtuvo el contenido de humedad aplicando la siguiente ecuación:

$$Humedad (\%) = \left(\frac{\text{peso de suelo húmedo} - \text{peso de suelo seco}}{\text{peso de suelo húmedo}} \right) * 100 \quad (2)$$



Figura 11. Barrena para extracción de muestras de suelo en bosque de *Pinus patula* en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.



Figura 12. Muestras de suelo en estufa para obtener el peso seco constante.

5.5.- Densidad aparente y porosidad

Una vez conociendo el peso del suelo seco y el volumen del cilindro de la barrena se desarrollaron las ecuaciones 3 y 4, correspondientes a cada una de las variables a valorar (USDA, 1999).

$$\text{Densidad aparente } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{peso de suelo seco}}{\text{volumen del suelo}} \quad (3)$$

$$\text{Porosidad (\%)} = 100 - \left(\frac{\text{densidad aparente}}{2.65} * 100 \right) \quad (4)$$

5.6.- Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo, utilizó la técnica del hidrómetro de Bouyoucos, como lo sugiere Medina-González et al. (2007). Para ello, se tomaron 50 g de suelo tamizado en malla de 2 mm, a los cuales se les añadieron 35 ml de solución defloculante de hexametafosfato de sodio (como dispersante) y carbonato de sodio (como solución amortiguadora), además de agua destilada. Se colocó la mezcla en un agitador eléctrico durante 8 minutos, con la finalidad

de que las partículas de la mezcla se dispersaran. Transcurrido el tiempo, se transfirió en una probeta para aforar con agua destilada hasta 1,130 ml, con el hidrómetro dentro. Se retiró el hidrómetro y agitó repetidas veces con ayuda de un agitador metálico, comenzando a cronometrar el tiempo. A los 15 segundos, se introdujo nuevamente el hidrómetro con lentitud para tomar la lectura a los 40 segundos exactamente. Como presentaba espuma debido a la materia orgánica contenida, se adicionaron unas gotas de alcohol amílico, antes de hacer la primera lectura. Del mismo modo, de inmediato se midió la temperatura con la ayuda de un termómetro de alta precisión (Figura 13).

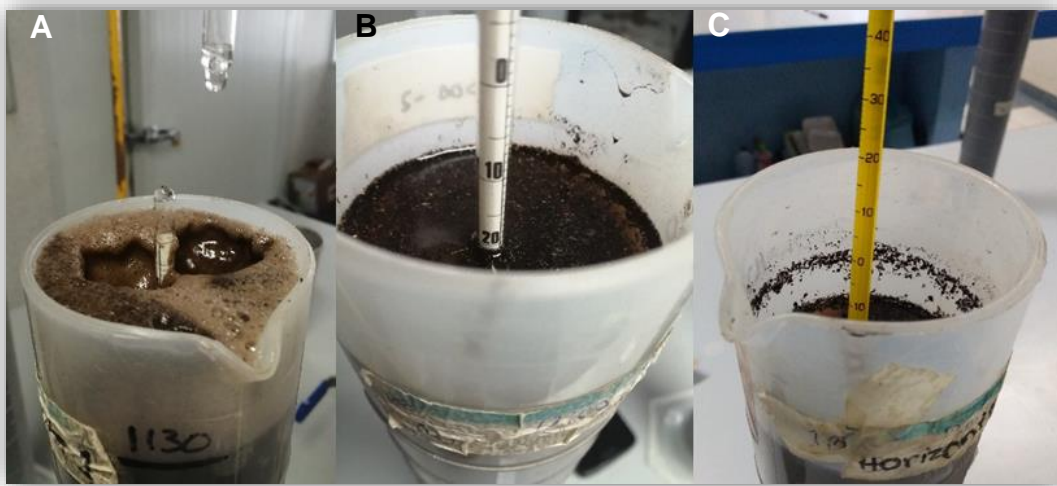


Figura 13. Determinación de la textura mediante el hidrómetro de Bouyoucos. Aplicación de $C_5H_{11}OH$ (A), Lectura del hidrómetro (B), Toma de temperatura en grados centígrados (C)

Al transcurso de dos horas, sin agitar la mezcla se registró por segunda vez la lectura del hidrómetro y la temperatura. Con esto, fue posible determinar los porcentajes de arcilla, limo y arena con base en la ley de *Stokes*; al mismo tiempo, se determinó la Clase textural con referencia en el triángulo de las texturas de suelo (Figura 14).

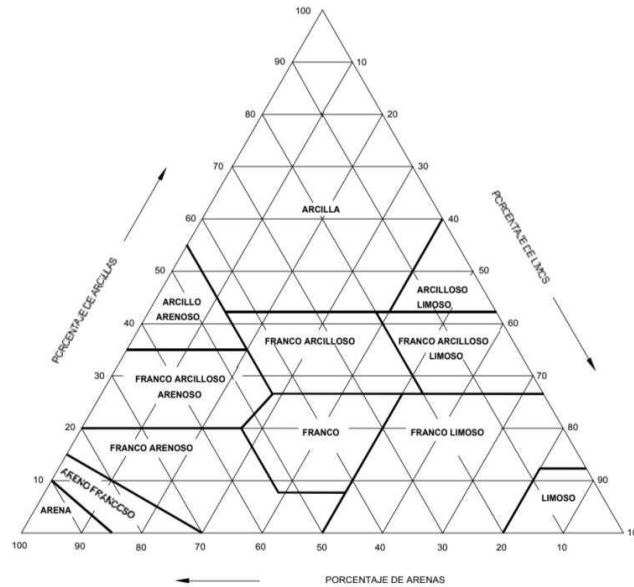


Figura 14. Triángulo de las texturas del suelo. **Fuente:** United States Department of Agriculture (USDA, 1999).

5.7.- Materia orgánica

Para calcular la cantidad de materia orgánica en el suelo (MOS), se desarrolló la metodología de Walkley y Black (1934), que se fundamenta en la oxidación húmeda de la MOS. Consistió en tomar muestras de suelo en los primeros 20 cm de profundidad. Se secaron hasta obtener el peso seco constante, para tamizarse en mallas de 0.5 mm; tomando una submuestra de 0.0500 g aproximadamente, debido a que la cantidad de materia orgánica se consideraba muy alta. Una vez pesado, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml donde se agregaron 10 ml de solución de dicromato de potasio 1 N ($K_2Cr_2O_7$), se agitó continuamente para adicionar 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), bajo una campana extractora de gases. El suelo y los reactivos se agitaron cuidadosamente durante 30 segundos, para dejarlos reposar 25 minutos y permitir que la mezcla se enfriara con lentitud (Figura 15).

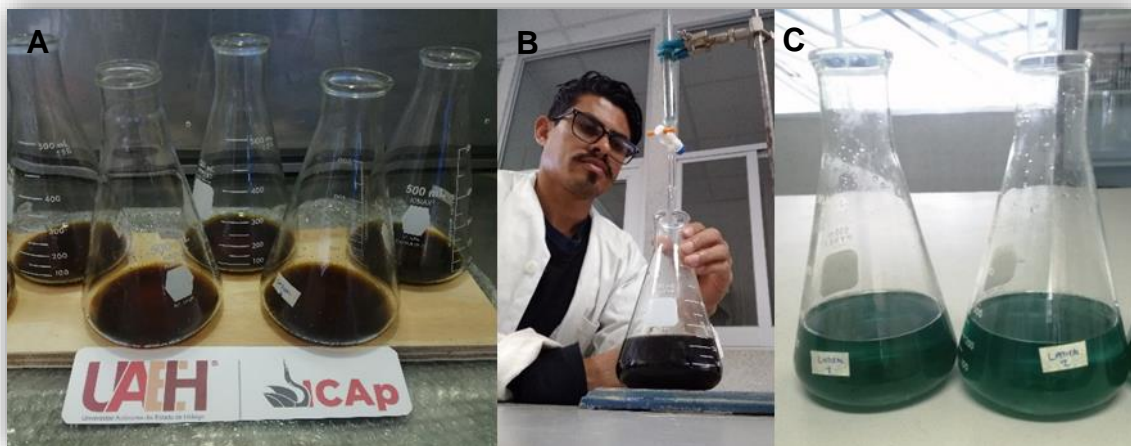


Figura 15. Procedimiento para calcular la cantidad de MOS. Suelo, $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 **(A)**, Solución para titular **(B)**, Titulación con $FeSO_4$ **(C)**

Concluido el reposo, se añadieron 200 ml de agua destilada, 10 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) e incorporaron 20 gotas de indicador de difenilamina y se procedió con la titulación. Con la bureta de 100 ml con sulfato ferroso ($FeSO_4$) a 0.5 N, se midió el volumen gastado hasta alcanzar la coloración verde claro. Para poder hacer los cálculos se realizó una muestra control (reactivos sin suelo).

Para conocer el porcentaje de carbono orgánico total, se desarrolla las siguientes ecuaciones:

$$\%M.O. = 10 \left(1 - \frac{M}{B} \right) * F \quad (5)$$

Donde:

$\% M.O.$ = porcentaje de materia orgánica

B = volumen de solución titulante en control, en ml

M = volumen de solución titulante empleada en la muestra de interés, en ml

F = factor para calcular el porcentaje de materia orgánica

$$F = (1.0 N) * \frac{12}{4000} * \frac{1.72}{0.77} * \frac{100}{P} \quad (6)$$

Donde:

1.0 N = normalidad del $K_2Cr_2O_7$

12/4000= peso miliequivalente del carbono
1.72= factor de transformación del carbono en materia orgánica
0.77= factor de recuperación del 77% hallado por Walkley
 P = peso de la muestra de suelo
 F = factor para calcular el porcentaje de materia orgánica

5.8.- Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno o pH, indica la medida de acidez o alcalinidad de un suelo en escala de 0 a 14. Para establecer este parámetro se consideró el método AS-02 incluido en la NOM-021-RECNAT-2000; se trata de un método que mide el pH potenciométricamente en suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo-agua 1:2. Para ello, se pesó una muestra de 10 g de suelo y se introdujo en un vaso de precipitado, para añadirle 20 ml de agua destilada; se agitó con varilla de vidrio por intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos, dejando reposar la mezcla por 15 minutos. Antes de tomar la medida del pH con el apoyo de un medidor portátil *Bante 901P*[®], se agitó nuevamente y se registró la lectura una vez que se estabilizó (Figura 16).

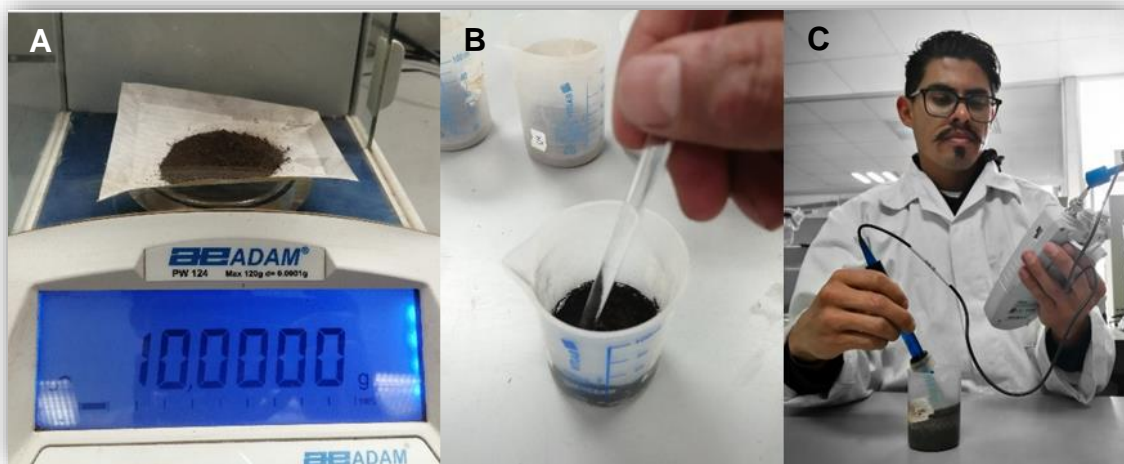


Figura 16. Categorización del pH de los tratamientos evaluados. Muestra de 10 g de suelo (A), Solución 1:2 (B), Lectura con el potenciómetro (C)

5.9.- Perfil de suelo

Se realizaron perfiles de suelo con la finalidad de confirmar o descartar la presencia de alguna capa dura de roca que impidiera la infiltración equiparable con el mejor tratamiento, sin encontrar una relación lógica entre la profundidad y

el flujo del agua, pero sí la evidencia en la cantidad de raíces. Por lo que se procedió a realizar perfiles (tres por cada tratamiento) de 50 cm de largo, 50 cm de ancho y 50 cm de profundidad en donde se contabilizó el número de raíces y se midió su diámetro (> a 0.5 mm), en sus cuatro caras, empleando un vernier digital solar Mitutoyo® (Figura 17).



Figura 17. Perfil de suelo. Raíces en el perfil (A), Medición del diámetro de raíz (B), Lectura del diámetro con el vernier (C)

5.10.- Evapotranspiración potencial

Para calcular la evapotranspiración potencial en el área de estudio, se siguió la metodología desarrollada por Santillán-Gutiérrez et al. (2013), que se fundamenta en el método de Thornthwaite y Mather (1957), este a su vez contempla el cálculo en función de la temperatura, la latitud de la zona de estudio y del mes (Aparicio-Mijares, 1992). Los datos de temperatura se extrajeron de la estación meteorológica en operación reportada por el servicio meteorológico nacional cercana al área de estudio, para obtener las normales de temperatura del 1961-2018 para la estación 30067 *Huayacocotla* (actualmente en operación). La estación meteorológica se seleccionó con base a lo propuesto por la Organización Meteorológica Mundial, que indica que los datos deben ser de 30 años para el cálculo del balance hídrico climático y que la distribución de las estaciones será uniforme sobre el área estudiada.

Los valores de temperatura mensual se emplearon para estimar la evapotranspiración potencial (*ETP*) mediante las ecuaciones 7, 8, 9 y 10:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (7)$$

$$I = \sum i \quad (8)$$

$$EPT \text{ sin corrección} = 16 \left(10 * \frac{t}{I}\right)^a \quad (9)$$

$$a=6.75*10^{-7}*I^3-7.71*10^{-5}*I^2+1.792*10^{-2}*I+0.49239$$

$$ETP = ETP \text{ sin corrección} \left(\frac{N}{12} * \frac{d}{30}\right) \quad (10)$$

donde:

i = índice de calor mensual

t = temperatura media mensual

I = índice de calor anual

a = factor en función del índice de calor anual

$EPT \text{ sin corrección}$ = evapotranspiración potencial sin ajuste

N = número máximo de horas de sol dependiendo de la latitud y del mes

d = número de días del mes

ETP = evapotranspiración potencial final

5.11.- Lluvia interceptada por el follaje

Según Schosinsky y Losilla (2000) mencionan que las lluvias menores a 5 mm mensuales no generan infiltración, pues consideran que al menos 5 mm de la precipitación son retenidos por el follaje sin llegar al suelo. Butler (1957) sostiene que la retención de la lluvia por el follaje es del 12 %; y Linsley *et al.* (1958), sugieren que para bosques con alta densidad la retención de lluvia asciende a 20 %. Para este estudio se empleó la fórmula propuesta por Schosinsky (2006), que considera lo siguiente:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret=P$.

Si el producto $P \times CFo$ es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret=P \times CFo$.

Si P es mayor a 5 mm/mes y el producto de $P \times CFo$ menor de 5, $Ret= 5$ mm/mes.

Donde:

P= precipitación mensual

Ret= retención de lluvia en el follaje

CFo= coeficiente de retención del follaje; 0.20 para bosques densos, 0.12 para otros

5.12.- Balance hídrico

Para determinar el balance hídrico se consideraron como entradas la precipitación y como salidas del sistema la retención o intercepción de la lluvia por el follaje, la evapotranspiración y la escorrentía, para finalmente obtener el agua de recarga a los acuíferos. Para ello se formuló el siguiente modelo:

$$Ar = P - Int - Evpt - Esc \quad (11)$$

Donde:

Ar= agua de recarga

P= precipitación

Int= intercepción por follaje

Evpt= evapotranspiración

Esc= escorrentía

5.13.- Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue un diseño completamente al azar con cinco tratamientos, los cuales se refieren a las etapas de desarrollo del bosque (Brinzal, Vardascal, Latizal, Fustal y Conservación). La unidad experimental es el suelo.

Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij} \quad (12)$$

Donde:

Y_{ij} = Es la j -ésima repetición correspondiente al i -ésimo tratamiento

μ = Efecto de la media general

α_i =Efecto del i -ésimo tratamiento

ϵ_{ij} = Efecto del error experimental asociado a la i -ésimo tratamiento

5.14.- Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables analizadas: infiltración, contenido de humedad, densidad aparente, porosidad, contenido de materia orgánica, pH, número de raíces y área cubierta por raíces de las muestras de los cinco tratamientos, se examinaron mediante el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de rango estudentizado de Tukey considerando la $P \leq 0.05$. Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 2002).

6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1.- Velocidad de infiltración

Derivado del procesamiento de los datos para la variable infiltración se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.0106$) entre las diferentes etapas de desarrollo del bosque (Cuadro 1). En la etapa Fustal se tuvo el promedio mayor de velocidad de infiltración de $3,569.8 \text{ mm h}^{-1}$, mientras que la etapa de Brinzal el valor fue de $1,126.0 \text{ mm h}^{-1}$, existiendo la diferencia calculada de $2,443.8 \text{ mm h}^{-1}$ entre los valores extremos. Lo anterior representa que las condiciones ecológicas y de suelo que se generan al final de la etapa de desarrollo del bosque, propicia un aumento del 68.5 % de capacidad de infiltración del agua de lluvia beneficiando el proceso hidrológico en la zona. Al tratarse de tasas de infiltración, es conveniente visualizar la tendencia de infiltración en cada condición del bosque generada por etapa de desarrollo.

Cuadro 1. Velocidad de infiltración y contenido de humedad del suelo por etapa de desarrollo del bosque en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Etapas de desarrollo del bosque	Infiltración (mm h^{-1})	Desviación estándar \pm	Humedad (%)	Desviación estándar \pm
Brinzal	1126.0 b†	340.0	42.2 b	2.3
Vardascal	1828.6 ab	572.4	47.7 ab	2.7
Latizal	1446.0 b	1199.9	45.9 ab	3.4
Fustal	3569.8 a	268.9	48.3 a	2.9
Conservación	1475.7 b	246.1	46.6 ab	4.5
Pr>F	0.0106	-	0.0461	-

Nota: †= letras iguales en la misma columna indican que no existe diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

En el Gráfico 1 se aprecia el comportamiento de la velocidad de infiltración en la etapa Brinzal, en el área que se intervino con corta de regeneración en 2023. Cabe hacer mención que como labores de aprovechamiento se realizaron el derribo, troceo y arrime de las materias primas forestales, actividades que suelen modificar las condiciones originales del sitio antes del aprovechamiento.

Es notable que la velocidad de infiltración de agua en el suelo forestal, aproximadamente al minuto uno se estabiliza y se mantiene constante durante la prueba, manteniendo valores por encima de los 1,000 mm h⁻¹. Algunos autores en investigaciones similares han conseguido que la tasa de infiltración alcance la estabilización entre los 20 a 90 minutos manteniéndose estable durante 2 a 2.5 horas (Béjar-Pulido et al., 2021; Pérez-Hernández et al., 2023), aunque esto dependerá del tiempo en que la infiltración sea constante; en esta investigación se consiguió casi de inmediato, por lo que la prueba duró solo una hora.

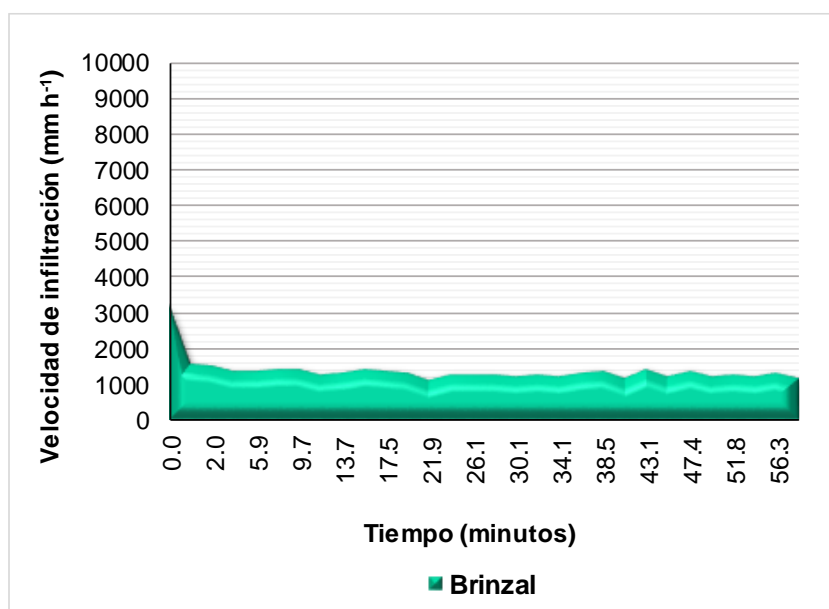


Gráfico 1. Tasa de infiltración en la etapa de Brinzal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

En la etapa de Vardascal la tasa de infiltración cayó abruptamente alrededor del minuto uno para mantenerse estable el resto del experimento, con ligeras oscilaciones entre los 1,000 y los 3,000 mm h⁻¹, registrando una media 1,828.6 mm h⁻¹ (Gráfico 2). Comparando esta tendencia con el comportamiento del Brinzal, se observa que existe un incremento considerable, esto se puede atribuir al incremento, por una parte, en el contenido de materia orgánica que se aporta de manera natural, al igual que por medio del residuo de las podas del arbolado establecido, y, por otra parte, al incremento en el número de individuos en el sitio. Esto se traduce en un incremento del espacio poroso y, por consiguiente, un aumento en el volumen infiltrado. La prueba se detuvo casi a la hora ya que se había normalizado la velocidad de infiltración.

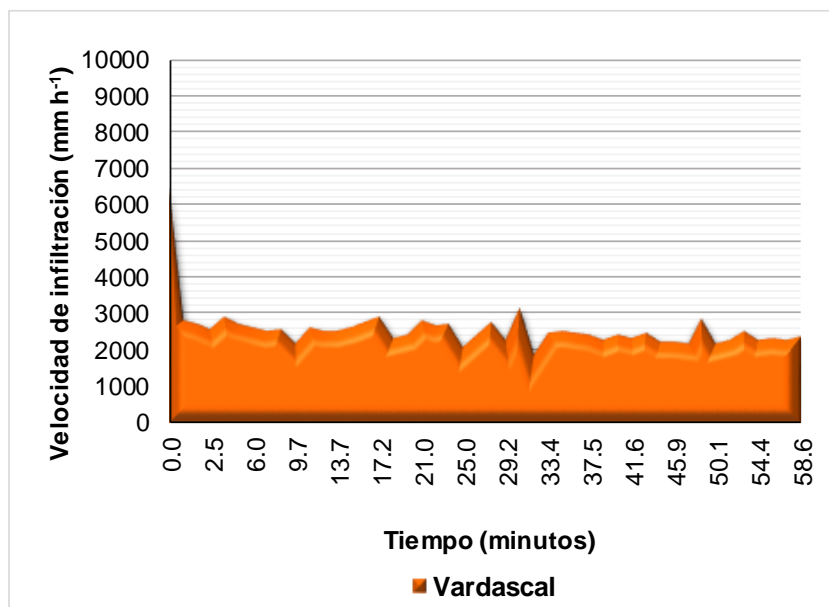


Gráfico 2. Tasa de infiltración en la etapa de Vardascal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Los resultados del Latizal muestran que la tendencia fue más estable desde el inicio, en comparación con los otros tratamientos, aunque siendo estadísticamente igual al Brinzal (Gráfico 3). Es importante señalar que a pesar que son estadísticamente iguales, numéricamente es ligeramente superior al área con reciente intervención con corta de regeneración, es decir, que existe un aumento en la velocidad de infiltración posiblemente al incremento en el número de raíces y al área que estas ocupan dentro del suelo, contribuyendo al incremento de la conductividad hidráulica del agua.

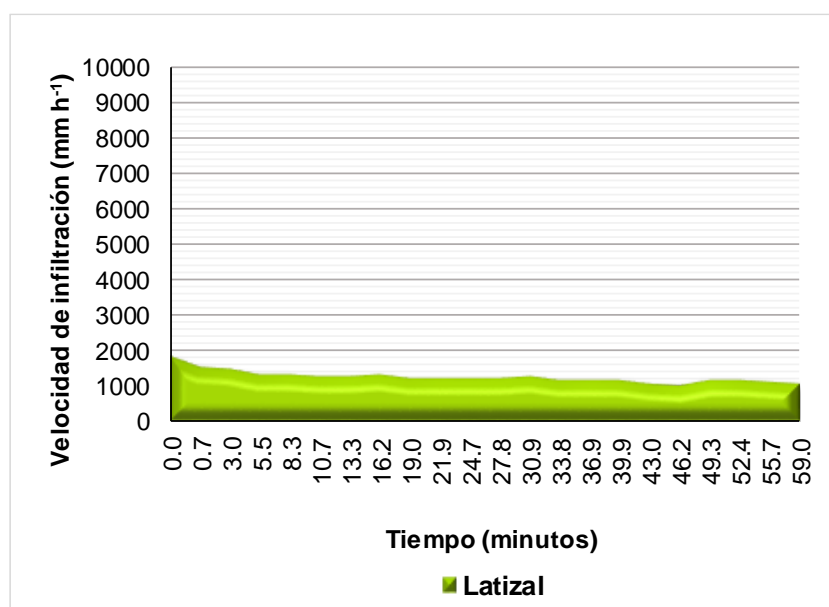


Gráfico 3. Tasa de infiltración en la etapa de Latizal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

En la etapa de desarrollo del bosque denominada Fustal, se registraron los valores máximos de velocidad de infiltración de agua en el suelo, con más oscilaciones, pero en general el promedio mantuvo una velocidad constante por encima de los 3,000 mm h⁻¹, alcanzando una velocidad media de 3,569.8 mm h⁻¹ (Gráfico 4). El sitio posee una edad mayor de 20 años, con un historial de manejo forestal, donde se han practicado aclareos y podas, que incorporan materia orgánica al suelo por los residuos generados, además de que, al ser un bosque coetáneo denso, es decir, árboles con el mismo estado de desarrollo (Marjorie et al., 2018), tanto la cantidad de raíces, el área cubierta por raíces y por obriedad, la longitud de estas, son mayores en comparación con el resto de los tratamientos. Por esta razón, se incrementa ligeramente la porosidad que, en conjunto con los canales creados por el crecimiento radicular, fomentan mayor conductividad hidráulica, incrementando por mucho la velocidad de infiltración de agua de lluvia (Webb et al., 2022).

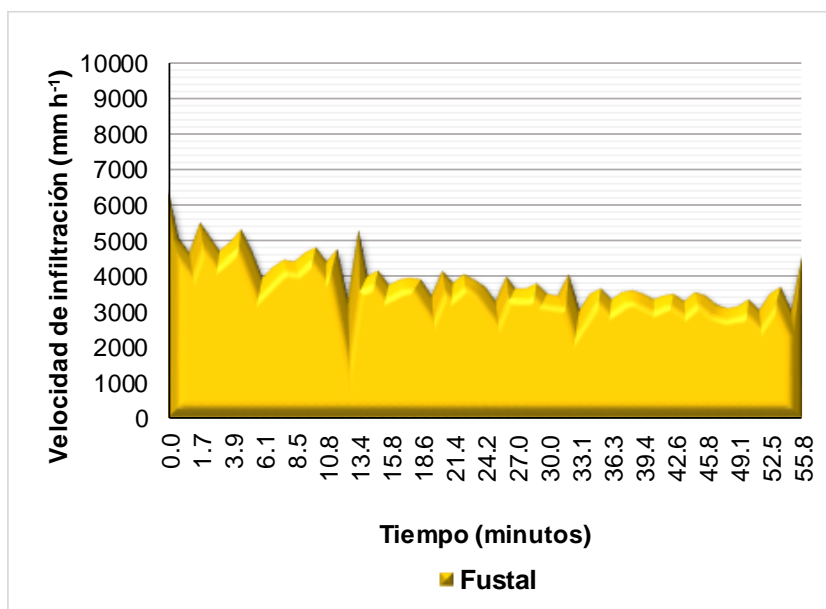


Gráfico 4. Tasa de infiltración en la etapa de Fustal del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

El área de Conservación se trata de una superficie en la que no se han realizado actividades silvícolas al menos por 30 años, dando como resultado un bosque heterogéneo, es decir, con individuos de diferentes edades y tallas, con

una cobertura de copa irregular. Aquí contrario a lo que se pensaría, después del minuto se mantuvieron valores bajos con respecto al área de Fustal (Gráfico 5), mostrando una tendencia de saturación más pronta. Aunque el número de raíces es mayor que en el Fustal, el área cubierta por las raíces es ligeramente menor, lo que impacta en un descenso del 58.6 % de la tasa de infiltración; sin encontrar diferencias significativas con el Brinzal, Vardascal y Latizal. La lógica esperada era que, en esta superficie, la capacidad de infiltración fuese mayor que el bosque manejado, sin embargo, los valores de infiltración siguen siendo altos; aunque convendría considerar que un bosque con intervenciones silvícolas, la capacidad de infiltración se potencia al doble, prolongando la permanencia del recurso hídrico.

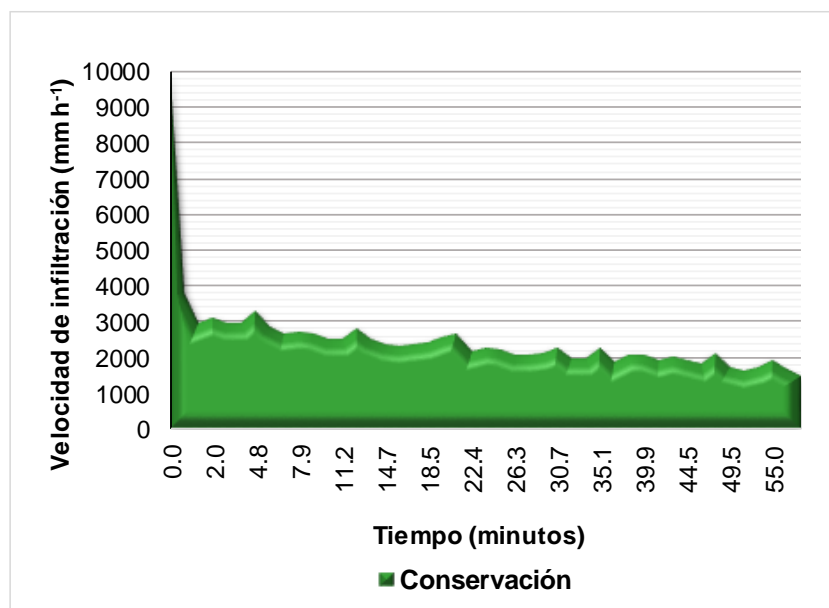


Gráfico 5. Tasa de infiltración en el área de Conservación del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

En el Gráfico 6, se muestran los cinco tratamientos evaluados, es notorio cómo es el Fustal el que se destaca por encima del resto de los escenarios, representando una diferencia con el Brinzal, el tratamiento con menor infiltración, del 68.5 % y del 48.7 % con el Vardascal, la condición que obtuvo el segundo valor más alto. Esto sugiere que un bosque intervenido mediante métodos de ordenación intensivos, en este caso el método de desarrollo silvícola, siempre que existan buenas prácticas silvícolas, es decir, que exista un manejo forestal sustentable procurando la cobertura y la menor remoción posible del suelo, se

fomenta no solo el mantener las tasas de infiltración, sino, que se incrementan más del 50 %.

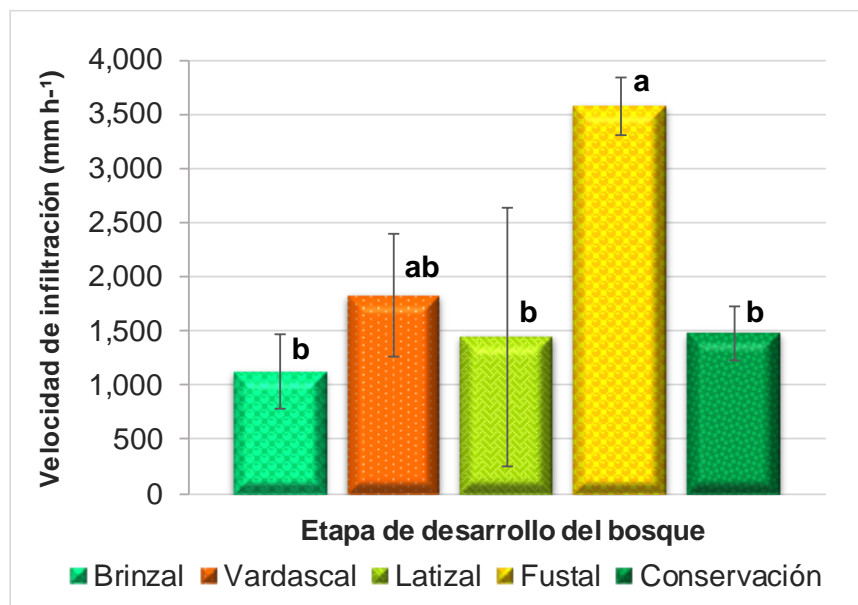


Gráfico 6. Comparación de la velocidad de infiltración por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Para comprender el movimiento del agua en el suelo (infiltración) entre las áreas intervenidas con tratamientos silvícolas y una de conservación, se realizaron perfiles de suelo donde se contabilizó el número de raíces (mayores a 0.5 mm de diámetro) y se calculó el área cubierta por raíces en cada cara del perfil; los resultados mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) siendo el Latizal, la etapa con el promedio mayor de número de raíces con 61.1 por cara en comparación con el Brinzal con 15.3, lo anterior significa que hay 75% más raíces de diferentes diámetros en bosques en etapa de Latizal que cuando inicia su establecimiento. Referente al área cubierta por raíces también se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.0558$) siendo el Fustal el valor más alto con 7.8 cm² en contraste con el Vardascal con 1.7 cm², con una diferencia de 6.1 cm² (Gráficos 7 y 8). Aunque el Brinzal tuvo mayor área cubierta por las raíces que el Vardascal, estas corresponden a los árboles semilleros y a las raíces de los tocones de los árboles aprovechados, por ello, hay un descenso en la segunda etapa, que más tarde se recupera en el Latizal por el crecimiento radicular.

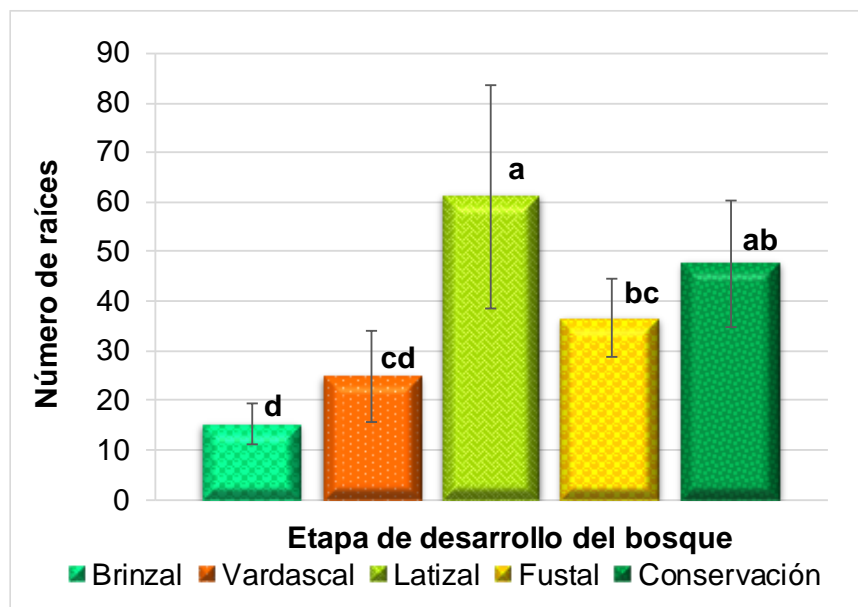


Gráfico 7. Número de raíces por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

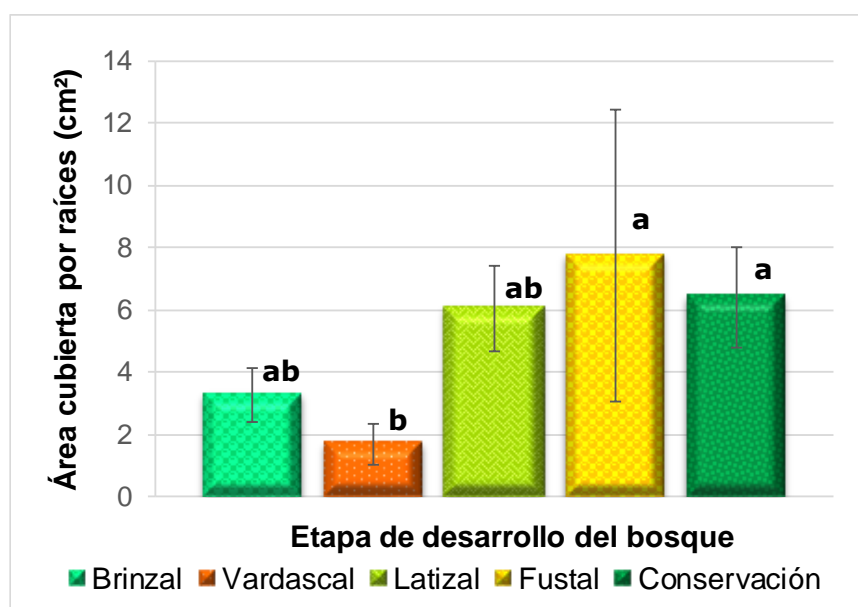


Gráfico 8. Área cubierta por raíces por etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

La velocidad de infiltración muestra este comportamiento por efecto de la conductividad hidráulica que se ve especialmente favorecida por el crecimiento y cobertura del sistema radicular de la vegetación, promoviendo que la infiltración sea mayor como lo refieren Morikawa-Sakura y Yoshitaka (2014) y Liu et al. (2019), al encontrar en sus investigaciones, que las raíces son uno de los factores principales que promueven una mayor infiltración subsuperficial de agua

en el suelo. Dueñez-Alanís et al. (2006), aseguran que tratamientos forestales intensivos disminuyen las tasas de infiltración en el año inmediato al realizar la intervención (1,443.3 mm h⁻¹ a 2,136.9 mm h⁻¹), pero para el segundo año se restablece siendo similar en tratamientos de alta y baja intensidad (aclareos 2,676.4 mm h⁻¹ y cortas de regeneración 2,436.9 mm h⁻¹). Lozano-Trejo et al. (2020), mencionan que una combinación entre las características del suelo (clase textural y crecimiento de raíces) como doseles arbóreos y materia orgánica favorecen la capacidad de absorción de agua en el suelo. Los datos de este estudio son similares a los que reportan Béjar-Pulido et al. (2021), al evaluar un bosque de pino-encino sin manejo, donde reporta valores de 885.9 mm h⁻¹ para este; contrario a lo que encuentran Chagoya-Fuentes et al. (2018), al analizar un bosque de vegetación secundaria y un bosque de encino, al hallar valores de 111.5 mm h⁻¹ y 78.2 mm h⁻¹, respectivamente. Por otro lado, Pérez-Hernández et al. (2023), reportan una tasa de infiltración de 1,602 mm h⁻¹ para un área de conservación y de 390 mm h⁻¹ para un área de latizal con 24 años de edad. Los resultados contrastantes entre autores y de la presente investigación se puede deber a los tipos de suelo que existe para cada sitio en específico del estudio, dado que algunos no reportan el tipo de suelo, pero fueron realizados en diferentes ecosistemas del país.

6.2.- Contenido de humedad

Conocer la proporción de agua en el suelo al momento de efectuar las pruebas de infiltración es importante, por tal motivo, se determinó el contenido de humedad en los tratamientos resultando diferencias significativas ($P \leq 0.0461$) mostrando superior al Fustal con un contenido de 48.3 %, contrario al Brinzal con un 42.2 %, difiriendo en 6.1 % (Cuadro 1).

Estos valores son comprensibles si se considera que después de realizar una corta de regeneración, el sotobosque queda más expuesto a la radiación solar y por consiguiente, la evaporación tiende a ser mayor, generando que el contenido de humedad se reduzca drásticamente, caso contrario a un rodal que se encuentra con una mayor cobertura de copa, impidiendo que el sol impacte directamente en el suelo, manteniendo la humedad por un lapso más prolongado; esta situación ocurre con el Brinzal y el Fustal, de la misma manera

Bejar-Pulido et al. (2024), atribuyen la retención de humedad a la cobertura aérea del uso de suelo forestal por una disminución en la radiación solar, descubriendo valores de humedad que oscilan de 30 % a 80 % cuantificados por la mañana (8:00 h) y de 28 a 72 % por la tarde (14:00 h). Aunque esto difiere con lo que reportan Quintero-Gradilla et al. (2022), un 23.4 % al evaluar un bosque de Pino, superándose al doble el contenido hallado en esta investigación.

6.3.- Textura

A pesar de que la literatura ya reportaba una clase textural, se propuso verificar este parámetro, pues se considera como uno de los más influyentes en la infiltración de agua de lluvia; además de verificar que esta fuese la misma para los cinco tratamientos y no representara un sesgo en la información. Una vez desarrollada la metodología, se encontraron suelos de textura media; en específico franco, franco-limoso y franco-arenoso, siendo los últimos los predominantes. En el Cuadro 2, se observa la textura correspondiente a cada una de las muestras (dos por cada sitio de infiltración).

Cuadro 2. Clase textural del suelo de las etapas de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Muestra	Etapas de desarrollo del bosque				
	Brinzal	Vardascal	Latizal	Fustal	Conservación
S1M1	F	F-L	F-A	F-A	F-A
S1M2	F	F	F-A	F	F
S2M1	F-A	F	F-A	F-A	F-A
S2M2	F-A	F-L	F-A	F	F-A
S3M1	F-A	F	F-A	F-A	F
S3M2	F	F-A	F-A	F-A	F

Nota: S= hace referencia al sitio de infiltración (tres por etapa). M= se refiere al número de muestra por sitio (dos por sitio). F= franco. F-L= franco limoso. F-A= franco arenoso.

Los datos encontrados son diferentes con los que refiere INEGI (2013) (textura fina); esto cobra relevancia ya que como lo demuestran algunos autores, la textura modifica las tasas de infiltración (García-Hernández et al., 2008; Lozano-Trejo et al., 2020).

6.4.- Densidad aparente y porosidad

Para tener un panorama sobre la compactación del suelo, es factible conocer la densidad aparente (DAP) y la porosidad del mismo, en esta investigación no se hallaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre las etapas de desarrollo del bosque. En lo concerniente a la densidad aparente se encontró una media de 0.432 g cm^{-3} y en lo que respecta a la porosidad media 83.7% (Cuadro 3).

Cuadro 3. Densidad aparente, porosidad y materia orgánica del suelo en el bosque templado del ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Variable	Etapas de desarrollo del bosque					Pr>F
	Brinzal	Vardascal	Latizal	Fustal	Conservación	
DAP (g cm^{-3})	0.468a	0.442a	0.414a	0.425a	0.412	0.1770
Porosidad (%)	82.3a	83.3a	84.4a	84.0a	84.4	0.1757
MOS (%)	29.4a	35.6a	33.8a	32.8a	34.5	0.3190

Nota: DAP= densidad aparente. MOS= materia orgánica del suelo.

Aunque estos parámetros son estadísticamente iguales, es posible observar una correlación inversamente proporcional (coeficiente de correlación de Pearson de -0.1668), en donde los valores son bajos para la densidad aparente se muestran valores altos en la porosidad. Esto ocurre porque a pesar de que los trabajos de extracción en las áreas de aprovechamiento silvícola (derribo, troceo, arrime, carga y transporte) podrían generar compactación, acciones como mantener las especies herbáceas y arbustivas en el sotobosque, considerar que las brechas de saca sean temporales, regeneración inmediata (reforestación) y el esparcimiento del material vegetal residual de la cosecha forestal en los rodales, evita que la densidad aparente incremente favoreciendo así la porosidad en el suelo.

Estos datos son similares a lo que reporta Rubio-Gutiérrez (2010) al evaluar un bosque con aprovechamiento de alcornoque (*Quercus suber*), donde encuentra valores para densidad aparente de 0.43 a 1.10 g cm^{-3} ; pero diferente a lo que identifican Domínguez-Calleros et al., (2017) una densidad de 0.88 a 0.98 g cm^{-3} al analizar una plantación de Pino. Pérez-Hernández et al. (2023) al examinar un bosque de pino-encino muestra porcentajes de porosidad del 77%

a 88 % similares a lo que se encuentra en este trabajo, caso contrario a los datos reportados de Carlos-Gómez et al. (2014) ubicando una porosidad de 38.3 % para un área forestal en Perú.

6.5.- Contenido de materia orgánica

Otra variable considerada fue la materia orgánica contenida en el suelo (MOS), siendo homogénea entre los tratamientos evaluados con una media del 33.2 % que al igual que las dos variables anteriores, no es diferente estadísticamente (Cuadro 3). Esto resulta ya que existe un aporte constante de materia orgánica en las áreas estudiadas, por la incorporación mediante residuos de las cosechas (corta de regeneración, preaclareos y aclareos) así como de las podas de formación realizadas en los rodales intervenidos; en el caso de la Conservación, por la acumulación por más de 30 años sin menoscabo de la misma. Valores altos si se les compara con los que señalan Capulín-Grande et al. (2018) al indagar bosques templados con manejo forestal sustentable en Zacualtipán y en Singuilucan (estado de Hidalgo), 11.6 % y 17.4 % respectivamente, representando menos de la mitad para este estudio; también como refieren Geissert-Kientz y Meza-Pérez (2016), un contenido de materia orgánica de 20 a 25 % en un bosque templado del Cofre de Perote, Veracruz.

6.6.- Análisis de correlación de Pearson

El análisis de correlación de Pearson presentó coeficientes altos entre la infiltración con el número de raíces, porosidad, materia orgánica, área cubierta por raíces y densidad aparente; es importante destacar que existe una fuerte **correlación positiva entre la velocidad de infiltración con el número de raíces (0.8031 $pf \leq 0.0001$)**, lo que sugiere que a medida que aumenta el número de raíces, también lo hace la infiltración de agua en el suelo. Por lo anterior, se corrobora que al tener sitios cubiertos con vegetación se favorece la infiltración del agua. Del mismo modo ocurre entre la densidad aparente con el área cubierta por raíces y porosidad; en el caso de la porosidad con materia orgánica, número de raíces y área cubierta por raíces; y finalmente la materia orgánica con número de raíces y área cubierta por raíces (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficiente de variables evaluadas en diferente etapa de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Variable	Infl	Dap	Porosidad	MOS	N raíces	AC raíces
Infl	1.0000	-0.1183	0.6988	0.6548	0.8031	0.5579
		0.0198	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Dap		1.00000	-0.1668	0.0052	-0.0775	0.3603
			0.0010	0.9196	0.1276	0.0110
Porosidad			1.0000	0.9025	0.7764	0.5329
				<0.0001	<0.0001	<0.0001
MOS				1.0000	0.7099	0.4600
					<0.0001	0.0009

Nota: Infl= velocidad de infiltración. Dap= densidad aparente. Porosidad= porosidad. MOS= materia orgánica. N raíces= número de raíces. AC raíces= área cubierta por raíces.

6.7.- Potencial de hidrógeno

Para conocer el grado de acidez o alcalinidad de los suelos objeto de estudio, se analizaron submuestras para determinar el potencial de hidrógeno contenidas en ellas, encontrando que en el área intervenida presentan diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.0001$) ubicando al Vardascal con 5.2, el valor máximo; y al de Conservación con 4.7, el valor mínimo, pH considerados como altamente ácidos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. Para tener una perspectiva más amplia se adjunta el Gráfico 9.

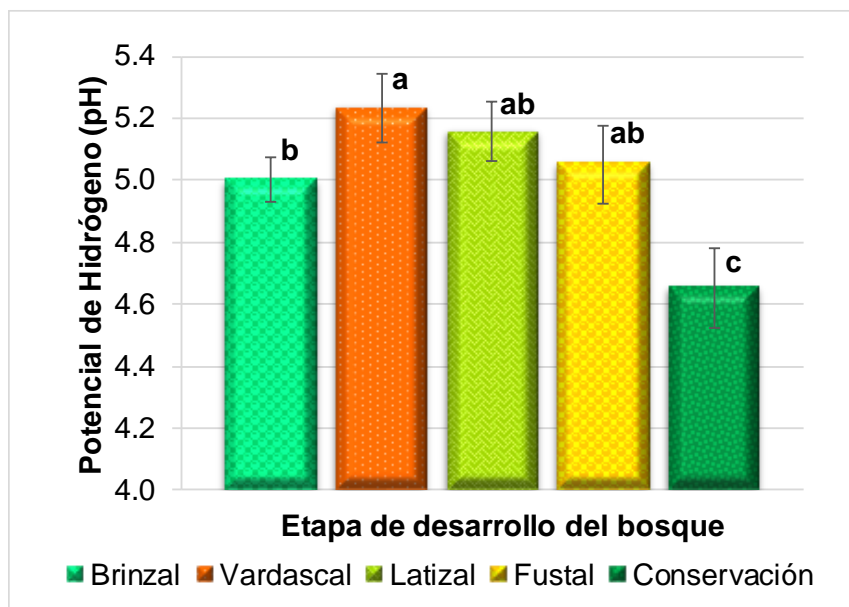


Gráfico 9. Potencial de hidrógeno en las etapas de desarrollo del bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz

El pH ácido deriva de una acumulación de materia orgánica y la alta producción de ácidos orgánicos en su descomposición, aunado a que en esta zona la precipitación es abundante, contribuyendo a la acidificación natural del suelo (Thiers et al., 2014); en el caso de los rodales con manejo silvícola al estar el suelo en cierto movimiento a diferencia con el área de Conservación que se mantiene sin remoción, la actividad de los microorganismos en esta última es mayor, trayendo consigo un descenso del pH, caso opuesto a los anteriores, donde se ve interrumpida por la actividad forestal. Peralta-Valencia et al. (2023), al analizar un bosque templado de *Abies religiosa* documentan valores que van de 5.7 a 5.9, mayores a los de este trabajo; al igual que informan Romero-Barrios et al. (2015), valores de 5.5 a 6.2 al examinar suelos de La Malinche en Tlaxcala, México. Por su parte, Acevedo-Sandoval et al. (2010), revelan valores de 4.9 a 6.7 en bosques de Acaxochitlán, Hidalgo. Aunque esto no representa problema alguno, pues la vegetación está adaptada a estas condiciones.

6.8.- Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración es un componente fundamental dentro del balance hídrico, pues este representa una salida de agua del suelo y la planta, por ende, se calculó la evapotranspiración potencial mensual en milímetros, resultando una tendencia similar al patrón de la temperatura, pero también coincide con la época

de mayor precipitación que es justo después de la lluvia cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo que se produce la evapotranspiración (Schosinsky, 2006), encontrándose que los picos más altos se ubican entre los meses de abril y mayo alcanzando los 56.76 mm; los menores en la estación invernal descendiendo hasta los 25.53 mm (Gráfico 10).

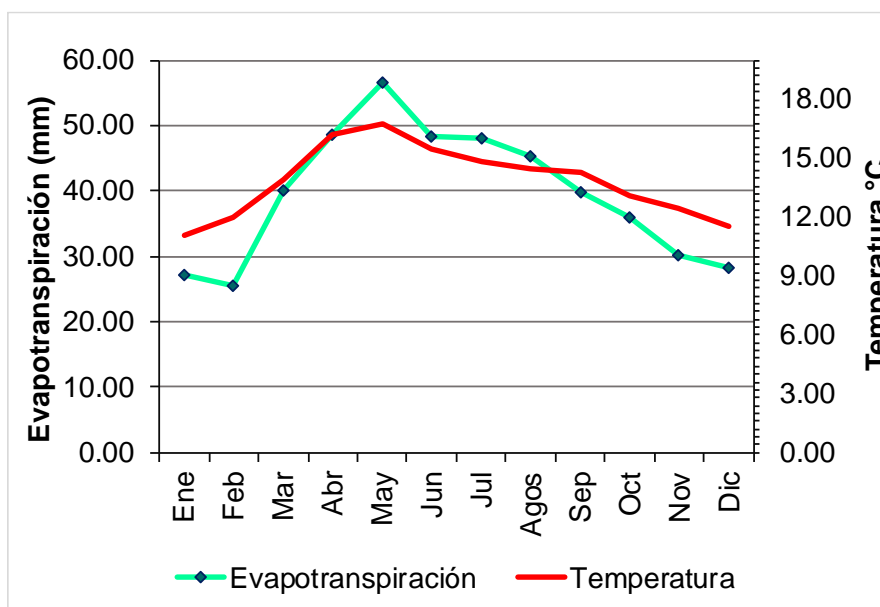


Gráfico 10. Evapotranspiración potencial mensual

En el Cuadro 5, se expresan los valores mensuales, para poder apreciar la cantidad de agua en milímetros que se pierden en el proceso de evapotranspiración, sumando 474.4 mm anuales que no logran atravesar las capas más profundas del suelo. Esto ocurre porque tras un evento de lluvia, comienza la evapotranspiración, el volumen restante que entro en el suelo ya puede considerarse como agua infiltrada o de recarga (Schosinsky, 2006).

Cuadro 5. Evapotranspiración potencial mensual en Huayacocotla, Veracruz

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Evapotranspiración (mm)	27.1	25.5	40.2	48.6	56.8	48.3	48.2
							Continúa...
...continuación							
Mes	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	
Evapotranspiración (mm)	45.4	39.9	36.0	30.3	28.2	474.4	

Como se percibe, el valor más bajo fue en febrero y el más alto en mayo, este comportamiento se refleja debido que este método basa sus cálculos en la temperatura media mensual. Además, estos datos difieren a los que indican Martín-Clemente et al. (2015), al determinar la evapotranspiración potencial mediante métodos empíricos (Thornthwaite, Hargreaves-Samani y Blaney-Criddle) en una cuenca forestal de Aguascalientes, donde encuentra un valores que van de 752.3 hasta 783.3 mm, siendo superiores a los encontrados en este trabajo de 474.4 mm, sin embargo, estas diferencias se deben a que en la zona que estudiaron Martín-Clemente et al. (2015), la temperatura media mensual es aproximadamente 2.5 grados mayor que la temperatura media mensual de Huayacocotla, Veracruz.

6.9.- Lluvia interceptada por follaje

Es relevante contemplar la retención de agua de lluvia por el follaje de la vegetación dentro de un balance hídrico, ya que representa un porcentaje de la precipitación que no logra llegar al suelo; cuantificarlo resulta importante para evitar sobreestimar la cantidad de agua que se infiltra. En este tenor, se calculó la retención de agua de lluvia en los cinco tratamientos estudiados mediante la fórmula de Schosinsky (2006). La fórmula indica que, si la precipitación es mayor a 5 milímetros mensuales, pero la multiplicación del valor de la precipitación por el coeficiente de retención por follaje es menor de 5 mm, la retención será por defecto 5 mm mensuales; que es lo que sucedió con algunos registros que se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Retención de agua de lluvia por el follaje en el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz

Etapas de desarrollo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Brinzal	5.0	5.0	5.0	5.7	6.7	26.9
Vardascal	5.2	5.0	5.8	9.4	11.2	44.9
Latizal	5.2	5.0	5.8	9.4	11.2	44.9
Fustal	5.2	5.0	5.8	9.4	11.2	44.9
Conservación	5.2	5.0	5.8	9.4	11.2	44.9

Continúa...

...continuación

Etapa de desarrollo	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
Brinzal	28.1	24.2	31.7	16.5	7.1	5.0
Vardascal	46.8	40.3	52.8	27.4	11.8	5.9
Latizal	46.8	40.3	52.8	27.4	11.8	5.9
Fustal	46.8	40.3	52.8	27.4	11.8	5.9
Conservación	46.8	40.3	52.8	27.4	11.8	5.9

Para la etapa de Brinzal al ser un área con poca cobertura de copa, se estableció un coeficiente del 12 %, y para el resto, áreas densas, se consideró del 20 %, como lo sugiere Schosinsky (2006). Lo que se traduce en 166.9 mm anuales para Brinzal y de 266.6 mm anuales para Vardascal, Latizal, Fustal y Conservación, de un total de 1,328.9 mm anuales de precipitación.

Para tener un panorama más amplio sobre el comportamiento de la retención por follaje de los tratamientos a lo largo del año, en comparación con la precipitación, se presenta el Gráfico 11, donde se percibe que las tres líneas dibujan la misma tendencia, lo cual es razonable pues los cálculos se desarrollaron en función a los datos de la lluvia registrados en la estación climática 30067, ubicada en Huayacocotla, Veracruz, la más cercana al área que se estudió.

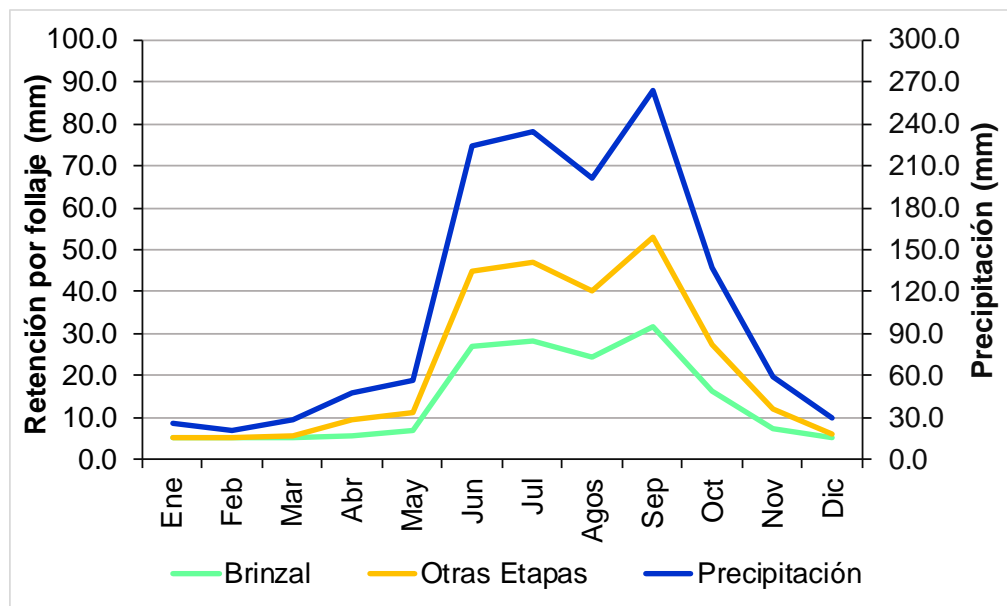


Gráfico 11. Comparación de la retención mensual por follaje con respecto a la precipitación media mensual en el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Al observar el Gráfico 11 se identifica que la época donde existe mayor retención de agua de lluvia por el follaje, se ubica entre los meses de junio a septiembre que es cuando se instala la temporada de lluvias en la región de Huayacocotla; los valores mínimos en enero, febrero y diciembre. Los volúmenes corresponden al 12 % para Brinzal y del 20 % para los otros tratamientos (bosques densos), esto cobra validez al compararlos con lo que reportan Flores-Ayala et al. (2016), al evaluar la lluvia interceptada por el follaje en bosques de la cuenca del Río Texcoco, donde resultan porcentajes de intercepción de 19.2 % para pino y de 21.7 % para encino, que se traduce en un 20.45% promedio; esto indica que emplear un 20 % de retención es confiable.

6.10.- Balance hídrico

Para definir el balance hídrico, se consideró el primer componente correspondiente a la precipitación media anual que asciende a 1,328.9 mm según los datos de la estación 30067 de Huayacocotla, y que es la misma para todas las condiciones del bosque; de acuerdo con la metodología empleada, la intercepción media anual por follaje alcanzó 166.9 mm para el Brinzal y 266.6 mm para el resto de los tratamientos, incluyendo el área de conservación; la evapotranspiración potencial media anual asciende a 474.4 mm y en el caso de la escorrentía, dado que los datos de infiltración fueron altos, únicamente se consideró un volumen de 202.9 mm para el Brinzal.

Sustituyendo los valores encontrados como se muestra en el Cuadro 7, tenemos que, para el Brinzal, el agua de recarga es de 484.7 mm y para el Vardascal, Latizal, Fustal y el área de Conservación es de 587.9 mm.

Cuadro 7. Balance hídrico para el bosque templado en el ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz

Etapas de desarrollo	P	Int	Evpt	Esc	Ar
Brinzal	1328.9	166.9	474.4	202.9	484.7

Vardascal	1328.9	266.6	474.4	0.0	587.9
Latizal	1328.9	266.6	474.4	0.0	587.9
Fustal	1328.9	266.6	474.4	0.0	587.9
Conservación	1328.9	266.6	474.4	0.0	587.9

Nota: P= precipitación media anual. Int= intercepción por follaje. Evpt= evapotranspiración potencial. Esc= escorrentía. Ar= agua de recarga. Todos los datos se encuentran en milímetros.

Esto se traduce en que el agua de recarga es de 484.7 y 587.9 litros acumulados en un año por metro cuadrado de superficie, que equivale a 4,847 y 5,879 metros cúbicos por hectárea por año. Este volumen es alto, considerando que el acuífero Álamo-Tuxpan, logra una recarga de 697.9 hectómetros cúbicos anuales según datos de la Subdirección General Técnica-Gerencia de Aguas Subterráneas de CONAGUA (2024), es decir, que por hectárea al año se recargan 1,092 metros cúbicos. Siendo los volúmenes por hectárea de esta investigación entre cuatro y cinco veces más altos que el promedio para el acuífero Álamo-Tuxpan, al cual pertenece el ejido Viborillas Ojo de Agua.

7.- CONCLUSIONES

Las características físicas del suelo como la densidad aparente, porosidad y contenido de materia orgánica, no se modifican significativamente con las actividades del manejo forestal en las diferentes etapas de desarrollo del bosque templado; en contraste con el contenido de humedad, que debido a la cobertura del dosel se ve modificado.

Las actividades silvícolas reducen de modo temporal la infiltración de agua de lluvia en las etapas tempranas de desarrollo de bosques templados, restableciéndose la capacidad de infiltración en la etapa de Latizal, permitiendo mayores beneficios comparado con áreas de conservación, ya que promueve un aporte constante y alto contenido de materia orgánica al suelo, manteniendo niveles bajos de densidad aparente, altos porcentajes de porosidad, y un aumento en la conductividad hidráulica por efecto del crecimiento radicular, es decir, a mayor número y área cubierta por las raíces, mayor capacidad de infiltración.

Finalmente, la capacidad de infiltración está influenciada por la sinergia de características físicas del suelo como la textura, densidad aparente, porosidad, contenido de materia orgánica, cantidad y área cubierta por raíces; se puede señalar que el manejo forestal sustentable no solo genera beneficios económicos, sino también asegura la permanencia de los bosques contribuyendo a la recarga de los mantos acuíferos en promedio 5,672.6 metros cúbicos por hectárea por año en los bosques templados de Huayacocotla, Veracruz.

8.- REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., Varela-Pérez, M. A. y Prieto-García, F. (2010). Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlán, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencias Trópico Húmedo*, 26(2), 137-150. <https://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v26n2/v26n2a2.pdf>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2022). *Determination of organic content in soils by loss on ignition*. AASHTO Designation: T 267-22. 4 p. <https://storethinghiem.vn/uploads/files/T267-22.pdf>
- Aparicio-Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. (pp 56-57). Limusa.
- Arévalo, G. E., Sánchez-Amaya, J. M. y Guillen-Marquina, I. (2022). Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.11>
- Aussenac, G. (1981). L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. *La Houille Blanche*, 67(7), 531-536. <https://www.shf-lhb.org/fr/articles/lhb/pdf/1981/05/lhb1981049.pdf>
- Bejar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I. y Luna-Robles, E. O. (2024). Respiración de un Andosol bajo diferentes usos de suelo. *eCUCBA*, 11(22), 46-53. DOI: 10.32870/e-cucba.vi22
- Bejar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., Yáñez-Díaz, M. I. y Luna-Robles, E. O. (2021). Evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1171–1183. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2327>
- Butler, S. (1957). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall Inc. 356 pp.
- Calvo-Sánchez, B. (2022, Marzo 23). *Qué es el ciclo del agua y sus etapas*. <https://www.mundodeportivo.com/uncomo/educacion/articulo/que-es-el-ciclo-del-agua-y-sus-etapas-52053.html>
- Capulín-Grande, J., Suárez-Islas, A., Rodríguez-Laguna, R., Mateo-Sánchez, J. J., Razo-Zárate, R. y Islas-Santillán, M. (2018). Influencia del fuego en el suelo y las propiedades de la vegetación en dos sitios forestales contrastantes en el centro de México. *Ciencia e Investigación Agraria*, 45(2), 128–137. DOI: <https://doi.org/10.7764/rcia.v45i2.1798>
- Carrillo-Rivera, J. (2002). Consideraciones Geohidrológicas de la Relación Bosques-agua en la Región Sierra Gorda. Reporte de Investigación. México: INE-DGIPEA.
- Carlos-Gómez, G., Munive-Cerrón, R., Mallma-Capcha, T. y Orihuela-Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras

agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 4(1), 32-43. DOI: 10.18259/acs.2014004

Castillo-Campos, G., Avendaño-Reyes, S. y Medina-Abreo, M. E. (2011). *Flora y Vegetación*. En: Cruz-Angón, A. (Coord). *La biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado* (pp. 163-179). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana e Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México. <https://gonzalocastillo.com.mx/capitulo/flora-y-vegetacion-2/>

Cerdà-Bolinches, A. (1993). *La infiltración en los suelos del país valenciano. Factores y variaciones espacio-temporales*. [Tesis de doctorado, Universidad de Valencia]. <https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/38508/AAIU607277.pdf?sequence=1>

Chagoya-Fuentes, J. L., Mallén-Rivera, C., McDonald, M. A., Jiménez-Otarola, F., Akbar-Ibrahim, M., Velázquez-Fragoso, L. y Becerra-Luna, F. (2018). Información hidrológica, primer paso para diseñar una política local de pago por servicios ambientales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 24-43. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.214>

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2023). Gerencia de Planificación Hídrica. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=base>

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero, Álamo-Tuxpán (3014), estado de Veracruz. Subdirección General Técnica-Gerencia de Aguas Subterráneas. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3014.pdf

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2021). Bosques templados. *Biodiversidad mexicana*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosquetemplado>

Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2018). Aprovechar el bosque con equilibrio. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/aprovechar-el-bosque-con-equilibrio#:~:text=El%20manejo%20forestal%20sustentable%20consiste,y%20restauraci%C3%B3n%20de%20los%20ecosistemas>

Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2020). Los bosques y el ciclo del agua. *Comisión Nacional Forestal*. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/los-bosques-y-el-ciclo-del-agua?idiom=es#:~:text=Los%20bosques%20son%20fundamentales%20en,de%20tierra%20inundaciones%20y%20sequ%C3%ADas.&text=Los%20bosques%20juegan%20un%20papel%20crucial%20en%20el%20ciclo%20del%20agua>

- De Miguel, A., Lado, J. J., Martínez, V., Leal, M. y García, R. (2009). El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 17(1), 78-85. https://www.researchgate.net/publication/47559354_El_ciclo_hidrologico_experiencias_practicas_para_su_comprension#fullTextFileContent
- Domínguez-Calleros, P. A., Díaz-Vásquez, M. A., Rodríguez-Laguna, R., Capulín-Grande, J. y Razo-Zárate, R. (2017). Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 23(2), 145-154. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321522>
- Donoso Z., C. (1992). *Ecología forestal. El bosque y su medio ambiente*. (3rd ed.) Ed. Universitaria, Santiago, Chile.
- Dueñez-Alanís, J., Gutiérrez, J., Pérez, L., y Návar, J. 2006. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 233-240. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108010.pdf>.
- Flores-Ayala, E., Guerra de la C., V., Terrazas-González, G. H., Carrillo-Anzures, F., Islas-Gutiérrez, F., Acosta-Mireles, M. y Buendía-Rodríguez, E. (2016). Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 65-76. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.52>
- García-Coll, I. (2002). Potencial de Recarga de Acuíferos y Estabilización de Ciclos Hídricos de Áreas Forestadas. Reporte de Investigación. México: INE-DGIPEA.
- García-Hernández, M. A., García-Hernández, M. A., Castellanos-Vargas, I., Cano-Santana, Z. y Peláez-Rocha, C. M. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 21-27. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v26n1/v26n1a3.pdf>.
- Geissert-Kientz, D. y Meza-Pérez, E. (2016). *Los suelos del Cofre de Perote: calidad y servicios ecosistémicos*. En: Narave-Flores, H. V., Garibay-Pardo, L., Chamorro-Zárate, M. A., Álvarez-Oseguera, L. A. y De la Cruz-Elizondo, Y. (Coords.). *El Cofre de Perote: Situación, perspectivas e importancia*. (pp. 198-205) INECOL, A. C.
- Gómez-Reyes, E. (2013). Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México. *Revista internacional de estadística y geografía*. <https://agua.org.mx/biblioteca/valoracion-de-las-componentes-del-balance-hidrico-usando-informacion-estadistica-y-geografica-la-cuenca-del-valle-de-mexico-2/>
- Guzmán-Mendoza, R., Zavala-Hurtado, J. A., Castaño-Meneses, G. y León-Cortés, J. L. (2014). Comparación de la mirmecofauna en un gradiente de

reforestación en bosques templados del centro occidente de México. *Madera y Bosques*, 20(1), 71-83. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201177>

Hernández-Salas., J. 2014. *Curso regional: regulación, manejo y salud forestal*. [Diapositivas de PowerPoint]. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma de Chihuahua. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2014/C001804.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2013). Carta edafológica serie II 1:250 000 Pachuca de Soto F14-11 [mapa]. México: INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_250_000/702825235635.pdf

Jenkins, M. (2002). *Prólogo*. En: Pagiola, S., Bishop, J. y Landell-Mills, N. (eds.). *La venta de servicios ambientales forestales*. (pp. 17-19) Ine-Semarnat. http://140.84.163.2:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/159/503_2003_Venta_servicios_ambientales_forestales.pdf?sequence=1

Landell M., N. & I. Porras. 2002. Silver Bullet or Fools' Gold? A Global Review of Markets for Forest Environmental Services and Their Impact on the Poor. Ed. IIED. London. 254 p. <https://www.iied.org/9066iied>.

Linsley, R., Kohler, M. & Paulus, L. (1958). *Hydrology for engineers*. Ed. McGraw Hill. 340 pp.

Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M. & Gao-Lin, W. (2019). Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *CATENA*, 182, 104147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104147>

Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G. O. y Santiago-Martínez, G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>

Marjorie, M., Pilquinao, B., Müller-Using, S., Bahamóndez, C., Guiñez, R., Acuña, B., Bava, J. y Loguercio, G. (2018). *Diagramas de manejo de densidad para bosques de Lengua de Aysén y Magallanes con fines de producción de Madera*. Instituto Forestal. Chile. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/27295/IT219-bosques-lengua-baja.pdf?sequence=1>

Márquez-Ramírez, W. y Márquez-Ramírez, J. (2009). Municipios con mayor biodiversidad en Veracruz. *Foresta Veracruzana*, 11(2), 43-50. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49712336007.pdf>

- Martín Clemente, C. R., Sosa-Ramírez, J., Maass-Moreno, M., Luna-Ruíz, J. J., Meráz-Jiménez, A. J. y Flores-Ancira, E. (2015). Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 17-26. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000100017
- Martínez de Azagra-Paredes, A. y Navarro-Hevia, J. (2007). *Hidrología forestal: El ciclo hidrológico*. Ed. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valladolid. 286 p.
- Medina-González, H., García-Coronado, J. y Núñez-Acosta, D. (2007). El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 19-24. <https://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>
- Méndez-Valdiviezo, E. G. (2016). *Validación del método analítico Walkley y Black de materia orgánica en suelos arcillosos, francos y arenosos del ecuador*. [Tesis de ingeniería, Universidad central del Ecuador].
- Mittermeier, R. y C. Goettsch. (1992). *La importancia de la diversidad biológica de México*. En: Sarukhán, J. y Dirzo, R. (eds.). *México ante los retos de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. (pp.43-55). México, D.F., México.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A. y González-Elizondo, M. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y bosques*, 24(2), 2421569. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- Morikawa-Sakura, M. S. y Yoshitaka, K. (2014). El vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la velocidad de infiltración subsuperficial del suelo del bosque. *Revista de Investigación de la Universidad Norbert Wiener*, 3(1), 41-52. <https://pdfs.semanticscholar.org/de75/16b1d2ec2376d89a81b90abf6a5cffc2d42b.pdf>
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M. y Braña, J. (2008). Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 65(4), 725-736. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.07.031
- Myers, N. (1997). *The World's Forests and Their Ecosystem Services*. En: Daily, G. C. (ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press.
- Pagiola, S., Landell-Mills, N. y Bishop, J. (2003). *Cómo lograr que los mecanismos basados en el mercado funcionen para los bosques y los*

pueblos. *La venta de servicios ambientales forestales*. (pp. 407-455) INE-Semarnat.

- Peralta-Valencia, A. L., Castillo-Argüero, S., Hernández-Cuevas, L. V. y Vázquez-Santos, Y. (2023). Variación temporal en la composición de hongos micorrizógenos arbusculares en un bosque templado. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 32(3), 2572. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2572>
- Pérez-Hernández, J. F., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Capulín-Grande, J., Árcega-Santillán, I. y Manzur-Chávez, N. (2023). Efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(80), 54–79. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1388>
- Planeación Desarrollo y Recuperación Ambiental (Pladeyra). (2002). *Potencial de recarga de acuíferos y estabilización de ciclos hidrológicos en áreas forestadas*. Ine-Semarnat.
- Quintero-Gradilla, S. D., Muñoz, A. y Castillo-Parra, V. M. (2022). Estimación de carbono en las raíces en bosques de la sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822431. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822431>
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E. y Hernández-Acosta, E. 2015. Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(5), 63-70. <http://www.reibci.org/publicados/2015/septiembre/1200108.pdf>
- Riquelme-Urra, C. E. (2010). *Efecto de la incorporación secuencial de diferentes cantidades de residuos de cosecha de avena en la producción de trigo (Triticum aestivum L.) y algunas variables químicas, físicas y biológicas de un suelo Andisol de la región de la Araucanía*. [Tesis de Ingeniería, Universidad de La Frontera].
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J. & Manzur-Chávez, N. (2022). Carbon storage during the development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 483–497. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009>
- Rubio-Gutiérrez, A. M. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. [Tesis de ingeniería, Universidad de Sevilla].
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. (1ra digital ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxPort.pdf>

- Sadeghi, S. M. M., Attarod, P. & Pypker, T. G. (2015). Differences in rainfall interception during the growing and non-growing seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. plantation located in a semiarid climate. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 145-156. https://www.researchgate.net/publication/269694808_Differences_in_Rainfall_Interception_during_the_Growing_and_Non-growing_Seasons_in_a_Fraxinus_rotundifolia_Mill_Plantation_Located_in_a_Semiarid_Climate#fullTextFileContent
- Sánchez-San Román, F. J. (2001). *El ciclo hidrológico*. Departamento de geología. Universidad de Salamanca. España. <https://hidrologia.usal.es/>
- Santillán-Gutiérrez, E., Dávila-Vázquez, G., de Anda-Sánchez, J. y de Jesús-Díaz-Torres, J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(3), 104-117. https://www.redalyc.org/pdf/928/Resumenes/Abstract_92829234009_2.pdf
- SAS Institute. (2002). SAS®/STAT 9.0. SAS Institute. Cary, North Carolina. USA.
- Saxton, K. E. & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schlatter-Vollmann, J. E. (1993). *Fertilidad del suelo, conceptos y su aplicación en la actividad forestal*. (p 76-86). Charlas y conferencias 8, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Schlatter-Vollmann, J. E., Grez-Zanelli, R. y Gerding, V. (2003). *Manual para el reconocimiento de suelos*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34, 34-35. DOI: <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Schosinsky, G. y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55. <https://studylib.es/doc/5367322/modelo-anal%C3%ADtico-para-determinar-la-infiltraci%C3%B3n-con-base>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2000). *NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario oficial de la federación. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/D02280.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal (Semarnat-Conafor). (2013). Inventario estatal forestal y de suelos-

Veracruz de Ignacio de la Llave 2013. SEMARNAT-CONAFOR. 219 p.
<https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/IEFYS>

- Smith, R. E. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *Journal of Hydrology*, 17(1-2), 1-22. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90063-7)
- Thiers, O., Reyes, J., Gerding, V. y Schlatter-Vollmann, J. E. (2014). *Suelos en ecosistemas forestales*. En: Donoso, C., González, M. E. y Lara, A. (eds.). *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. (pp. 133-178) Ediciones UACH. <https://www.researchgate.net/publication/277131964>
- Tomasella, J., Papechepsky, Y., Crestana, S. & Rawls, W. J. (2003). Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4), 1085-1092. DOI: 10.2136/sssaj2003.1085
- Ticona-Delgado, E. R. (2019). *Estandarización analítica de la metodología de Bouyoucos para la determinación textural de suelos del altiplano boliviano*. [Tesis de ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés].
- United States Department of Agriculture (USDA). (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. USDA. 88 p.
- Villaseñor, J. L. (2016). Catálogo de las plantas vasculares nativas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>
- Walkley, A. & I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. Doi: 10.1097/00010694-19340100000003.
- Webb, B., Robinson, D. A, Marshall, M. R, Ford, H., Pagella, T., Healey, J. R. & Smith, A. R. (2022). Variation in root morphology amongst tree species influences soil hydraulic conductivity and macroporosity. *Geoderma*, 425, 116057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116057>
- Zapata-Sierra, A. y Manzano-Agugliaro, F. (2008). Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo. *Agrociencia*, 42(7), 835-845. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000700010&lng=es&tlng=es
- Zavaleta-Huerta, E., Cruz-Jiménez, H. y Márquez-Ramírez, J. (2012). Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. *Foresta Veracruzana*, 14(1), 23-28. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49724122004.pdf>