



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS DE
BOSQUE DE PINO Y PASTOS SUBALPINOS EN LA
SUB-CUENCA TULMIAC-TLÁLOC, SIERRA DEL
CHICHINAUTZIN, MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A:

GABRIELA GAMA GRANADOS

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. BEATRIZ EUGENIA MARÍN CASTRO



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Gama
Granados
Gabriela
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencia
Ciencias de la Tierra
310340865

2. Datos del tutor

Dra.
Beatriz Eugenia
Marín
Castro

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Christina Désirée
Siebe
Grabach

4. Datos del sinodal 2

Dr.
José Alejandro
Velázquez
Montes

5. Datos del sinodal 3

Dra.
María Leonor
Jiménez
Valdés

6. Datos del sinodal 4

Dra.
Lucy Natividad
Mora
Palomino

7. Datos de trabajo escrito

Conductividad hidráulica en suelos se bosque de pino y pastos subalpinos en la
Sub-Cuenca Tulmiac-Tlálloc, Sierra del Chichinautzin, México.
108 pp
2022

Agradecimientos

A la UNAM, a la que orgullosamente pertenezco desde el CCH-Azcapotzalco y posteriormente en la carrera de Ciencias de la Tierra en la Facultad de Ciencias, gracias por todos los conocimientos que adquirí en la máxima casa de estudios y por la satisfacción de ser universitaria.

Al Proyecto Megalópolis (con ref. CI170253), por la oportunidad de participar con este trabajo de investigación y por el financiamiento para el desarrollo del trabajo de campo dentro de la alcaldía de Milpa Alta. Agradezco a Jürgen Hoth por la información proporcionada sobre el la conservación del bosque de agua, a las comunidades de San Pablo Oztotepec y San Salvador por los permisos otorgados para realizar el trabajo de campo en los sitios de bosque y pastizales dentro de la zona de conservación; al grupo “Monitoreo Biológico Milpa Alta” y a Gabriel Martínez, Josué D. Martínez, Ulises Martínez, Delfino García y Agustín Martínez por el apoyo en campo y el acompañarnos como guías en todo momento.

A mi asesora, la Dra. Beatriz E. Marín Castro; siempre dispuesta a transmitirme su conocimiento y método de trabajo, por asesorarme en la presente investigación y en el trabajo de campo, por la gran paciencia y dedicación; quién aún con la distancia siempre estuvo al tanto de la evolución del trabajo. Y a la Dra. Leonor J., que gracias a sus artículos y presentaciones pude formular mejor mis preguntas de investigación, gracias infinitas por el apoyo y la contribución a los resultados de este estudio.

A los Doctores Christina Siebe, Alejandro Velázquez, Leonor Jiménez y Lucy Mora por formar parte de mi jurado, por sus comentarios, correcciones y sugerencias para la mejora de este trabajo.

Al Instituto de Geología, por los permisos otorgados para llevar a cabo esta investigación. A la Dra. Lucy N. Mora y a la Dra. Maricarmen Salazar Ledesma del

Laboratorio de Edafología Ambiental del LANGEM por la oportunidad de darme un espacio en el laboratorio y ayudarme con parte del trabajo de campo. A Lucero V. López, Gustavo A. Gutiérrez y el Sr. Roberto Cabrera, quienes hicieron que mi estancia en el laboratorio fuera cómoda, entretenida y gratificante. Gracias por orientarme y por ayudarme a realizar los análisis de laboratorio.

Al Programa de Divulgación de Ciencias de la Tierra (TERRAMÓVIL) del Instituto de Geología, UNAM por la beca “Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME (2018))”, y por el apoyo económico otorgado para la realización de esta tesis. A la M. en C. Ana Cecilia Lopera, por enriquecer esta tesis con sus sugerencias y comentarios, por su paciencia y su gran criterio.

A José Chaparro, José L. Lezama y a Ilce T. Lara quienes estuvieron en el arduo trabajo de campo. A José C. gracias por las charlas y el interés que ayudó en mucho durante la fase de diseño y prueba de los infiltrómetros construidos y por la mano de obra para abrir los perfiles para su evaluación en campo.

A mis amigos, en especial a Jania Newton, Fernando Monterde, Diana Galindo y Fernanda Colín, por el tiempo compartido, las charlas, los momentos divertidos y los aprendizajes durante la licenciatura y las salidas a campo.

Dedicatoria

A Dios por la fuerza y la alegría de terminar este proyecto con perfecta salud.

A mis padres Mary y Antonio por creer en mí y alentarme a seguir siempre en positivo, que con amor y paciencia estuvieron firmes en cada paso desde el inicio.

A mi esposo Juan, por su apoyo y confianza que siempre me ha brindado. Por ayudarme a tomar decisiones sin tener miedo, agradezco infinitamente su compañía y amor.

ÍNDICE

1. Introducción.....	11
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos particulares	15
1.3 Hipótesis.....	16
2. Marco Teórico.....	18
2.1 Los suelos de origen volcánico y los factores formadores.....	18
2.2 Propiedades físico-químicas del suelo	22
2.3 Propiedades hidrofísicas del suelo: capacidad de infiltración y conductividad hidráulica saturada de campo.....	24
2.4 Características fisiológicas de bosque templado y pastizales subalpinos.....	25
2.5 Importancia de los servicios ecosistémicos hídricos de bosque y pastizales en las zonas de recarga de la Sierra del Chichinautzin	26
3. Materiales y métodos	27
3.1 Área de estudio	27
3.2 Clima	28
3.3 Geología y suelos	28
3.4 Hidrología.....	30
3.5 Descripción de los sitios de muestreo	32
3.5.1. Bosque.....	33
3.5.2. Pastizal subalpino.....	33
3.6 Diseño de muestreo y ensayos de infiltración.....	34
3.7 Evaluación edafoecológica	36
3.8 Análisis del suelo	36
3.8.1 Densidad aparente.....	36
3.8.2 Humedad volumétrica	37
3.8.3 Espesor del mantillo.....	37
3.9 Ensayos de infiltración	38
3.10 Determinación de la conductividad hidráulica saturada de campo.....	41
3.11 Análisis estadístico	42

4. Resultados	43
4.1 Características de las unidades edáficas del suelo.	43
4.1.1 Características de las unidades edáficas del suelo en los sitios de Bosque.	45
4.1.2 Características de las unidades edáficas del suelo en los sitios de Pastizal subalpino.	48
4.2 Evaluación edafoecológica de los perfiles de suelo.....	51
4.2.1 Evaluación edafoecológica de los perfiles de suelo en los sitios de Bosque	52
4.2.2 Evaluación edafoecológica de los perfiles de suelo en los sitios de Pastizal subalpino	53
4.3 Infiltración y conductividad hidráulica saturada.....	56
4.4 Variación y diferencias entre la Kfs para cada cobertura vegetal y sitio estudiado.	59
4.5 Propiedades físicas del suelo	61
4.6 Relación de las propiedades físicas del suelo y la Kfs para cada cobertura vegetal estudiada.....	63
5. Discusión	67
5.1 Caracterización y evaluación edafoecológica	67
5.2 Valores promedio de la I y Kfs para bosque y pastizal de los sitios estudiados.....	69
5.3 Relación de las propiedades físicas del suelo para cada cobertura vegetal y sitio.	74
5.4 Relación de las propiedades físicas del suelo y la Kfs.....	76
6. Conclusiones	79
7. Recomendaciones y sugerencias	82
8. Referencias	83
Apéndice 1. Caracterización edafoecológica de campo de los perfiles del suelo, de los sitios de muestreo.	95
Apéndice 2. Evaluación edafoecológica de los perfiles del suelo.	101
.....	104
Apéndice 3. Cuadros (Valores de Kfs para cada ensayo de I, prueba de contrastes post hoc de Tukey, valores promedio de p_b, %Hi y EM, valores de %Hi y EM para cada ensayo de I).	106

Lista de Cuadros

- Cuadro 1.** Características edáficas de los perfiles de suelo correspondientes a los tipos de cobertura vegetal, en los tres sitios de estudio. Por cada tipo de horizonte encontrado por perfil, se describe la profundidad en cm, la textura y la densidad aparente (ρ_b) en g/cm³.
- Cuadro 2.** Valores de Infiltración (*I*) correspondientes a los tipos de cobertura vegetal, en los tres sitios de estudio. Por sitio, se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.
- Cuadro 3.** Valores de conductividad hidráulica saturada (Kfs) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal. Se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.
- Cuadro 4.** Valores de Kfs en mm/h para cada ensayo de infiltración (valores atípicos en rojo) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal. Se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.
- Cuadro 5.** Anova para evaluar la diferencia de medianas de la Kfs entre sitios estudiados.
- Cuadro 6.** Prueba de contrastes post hoc de Tukey para determinar entre qué sitios hay diferencias de Kfs; en donde se muestra el valor P-ajustado.
- Cuadro 7.** Se resaltan en negritas los valores promedio de densidad aparente (ρ_b) en g/cm³, porcentaje del contenido de humedad inicial (%Hi), porcentaje del contenido de humedad final (%Hf) y espesor de mantillo en cm, de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal.
- Cuadro 8.** Se describen los valores del porcentaje de humedad inicial y espesor del mantillo (EM) en cm para cada ensayo de infiltración (valores atípicos en rojo) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal.
- Cuadro 9.** Comparación de la evaluación de la *I* y la Kfs de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal; de acuerdo a diferentes autores y determinaciones.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Modelo empírico de la Kfs en los diferentes tipos de cobertura vegetal (bosque de pino y pastizal)
- Figura 2.** Modelo empírico de las propiedades físicas (EM: espesor de mantillo, DA: densidad aparente y %Hi: porcentaje de humedad inicial) en los diferentes tipos de cobertura vegetal (bosque de pino y pastizal). La línea negra indica la dirección que tendría la Kfs para cada caso.
- Figura 3.** Localización y delimitación del área de estudio (línea roja), así como los distintos volcanes de referencia.
- Figura 4.** Climograma de la Temperatura Media Mensual Promedio y Precipitación Total Mensual Promedio con registros de 1965 a 2017 (Fuente: SMN-CONAGUA, 2020).
- Figura 5.** Regiones Hidrológicas a la que pertenece CDMX. ○ Localización del área de estudio (Fuente: INEGI-CONAGUA, 2007).
- Figura 6.** Polígono donde se encuentran ubicados los sitios de estudio y los volcanes de referencia.
- Figura 7.** Cobertura de bosque de pino para los tres sitios seleccionados, para la determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo.
- Figura 8.** Cobertura de pastizal subalpino para los tres sitios seleccionados, para la determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo.
- Figura 9.** Diseño del muestreo de las 11 mediciones de infiltración por sitio en bosque de Tláloc (TB), Tulmiac (TulB) y Tuxtepec (TuxB).
- Figura 10.** Diseño del muestreo de las 11 mediciones de infiltración por sitio en pastizales de Tláloc (TP), Tulmiac (TulP) y Tuxtepec (TuxP).
- Figura 11.** Componentes del Infiltrómetro de anillo sencillo utilizado, modificado según Gómez-Tagle, 2008. IPCCAS armado en campo.
- Figura 12.** Gráfica de infiltración acumulada para un ensayo de infiltración. Se distinguen la fase transitoria (a), la fase estacionaria (b) y el umbral de tiempo en que alcanza la condición de flujo estacionario.
- Figura 13.** Vista del sitio de bosque de Tláloc (TB).
- Figura 14.** Vista del sitio de bosque de Tulmiac (TulB).
- Figura 15.** Vista del sitio de bosque de Tuxtepec (TuxB).
- Figura 16.** Vista del sitio de pastizal de Tláloc (TP).

- Figura 17.** Vista del sitio de pastizal de Tulmiac (TuIP); se observa el infiltrómetro utilizado para los ensayos de infiltración.
- Figura 18.** Vista del sitio de pastizal de Tuxtepec (TuxP).
- Figura 19.** Triángulo de texturas (USDA), donde se ubican de forma representativa los horizontes evaluados en campo de cada perfil.
- Figura 20.** Variación de las diferentes propiedades del suelo consideradas en la evaluación edafocológica para cada uno de los tres sitios de bosque y pastizal.
- Figura 21.** Ejemplos de las gráficas de infiltración acumulada de los sitios de bosque y pastizal. En el eje “x” se representa el tiempo y en el eje “y” la columna de agua infiltrada.
- Figura 22.** Gráfica de los valores promedio de Kfs (mm/h) por sitio y cobertura vegetal (azul: bosque y rojo: pastizal); las barras indican su error estándar.
- Figura 23.** Diagramas boxplots de la mediana y desviación estándar de la Kfs obtenida por cobertura vegetal y por sitio de muestreo.
- Figura 24.** Diagramas boxplots de la variación de densidad aparente, contenido de humedad inicial y espesor de mantillo respectiva a su cobertura vegetal y sitio de muestreo.
- Figura 25.** Crítica del modelo de la Ancova entre el espesor de mantillo y la Kfs.
- Figura 26.** Modelo del comportamiento de las líneas de regresión entre el espesor de mantillo y Kfs en los tres sitios de estudio.

1. Introducción

La Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, en el año 2010 declaró que, de la superficie total de la CDMX, el 59% está asignado como suelo de conservación y más de la mitad de este (43%) es zona cubierta de bosques con un mayor valor ambiental ubicado en las serranías que la limitan formando un continuo ecológico con la Sierra de las Cruces, al poniente; el Corredor Biológico Chichinautzin, al sur; y la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, al oriente. Este complejo de serranías se ubica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Ferrari, 2000) que clasifica dentro del suelo de conservación y que representa un espacio estratégico para la Ciudad de México debido a los servicios ambientales que presta a las poblaciones aledañas y a la propia ciudad, pues es una de las principales fuentes que alimenta los acuíferos abasteciendo a más de 22 millones de habitantes (Carrera-Hernández y Gaskin, 2008).

El suelo de conservación considera los siguientes servicios ambientales: es un medio físico que soporta a las plantas, da suministro de nutrientes a las plantas, permite el secuestro de carbono, capta, infiltra y almacena agua para su posterior recarga a los mantos freáticos; mantiene un microclima por la regulación de la temperatura y la humedad, así como la reducción de los niveles de erosión hídrica y eólica (Brady y Weil, 1999, Peña, *et al.*, 2013). Dada la importancia del suelo de conservación para la recarga del acuífero (Cotler, *et al.*, 2007), resulta indispensable conocer las cualidades del suelo que permiten mantener el funcionamiento del ciclo hidrológico en la cuenca del Valle de México.

Las propiedades hidrofísicas del suelo, son fundamentales para conocer el grado de conservación que tiene y su capacidad para conducir el agua a nivel superficial y subterránea, además de comprender la importancia que tienen para la recarga de los mantos freáticos en el equilibrio de la vida y de cómo estos elementos permiten generar balances hídricos a escala de perfil, ladera y cuenca en donde se reflejen los cambios en el almacenamiento del agua dentro del área (ECOBA, 2012).

El presente estudio analiza la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) bajo dos coberturas distintas (bosque y pastizal), así como algunas propiedades físicas del suelo como la humedad antecedente, el espesor de mantillo y la densidad aparente, que la literatura reporta como variables que se relacionan con ésta (Marín-Castro, 2017) en la Sierra del Chichinautzin. Esta sierra es una zona de recarga de agua catalogada como área prioritaria para conservación de la biodiversidad y la preservación de los servicios ambientales.

Cuando existen cambios drásticos en la cobertura vegetal, así como en el uso del suelo la mayoría de las propiedades del suelo se modifican. Por ejemplo, un cambio de cobertura de bosque a pastizal, conlleva eventualmente a una disminución en la porosidad del suelo o sellamiento de poros, puede disminuir su humedad antecedente y aumentar su densidad aparente; además se puede generar una reducción del contenido de la materia orgánica (Campos, *et al.*, 2007) provocando menor capacidad para infiltrar y conducir agua (Zimmermann y Elsenbeer, 2008) en zonas cubiertas por pastizal en comparación con el bosque.

Se sabe que la infiltración y la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}), son dos de las propiedades hidrofísicas del suelo con mayor sensibilidad al cambio de uso de suelo (Wit, 2001; Perkins, *et al.*, 2007; Zimmermann y Elsenbeer, 2008; Gómez-Tagle, 2008). La K_{fs} puede disminuir debido a varios factores como la cantidad e intensidad de la lluvia, el sellamiento de poros, la compactación del suelo, pérdida de su estructura, cambios en los aportes de materia orgánica, disminución en la densidad de raíces, incendios, baja actividad de la biota edáfica y el microclima generado especialmente en zonas abiertas donde la radiación solar es directa (Elsenbeer, *et al.*, 1992; Perkins, *et al.*, 2007). Pero también es influida por las propiedades físicas como la humedad que tiene el suelo y la capacidad de campo que permite mantener activos los poros, el aumento en la cantidad de materia orgánica, el espesor del mantillo y las densidades aparentes bajas (Brady y Weil, 1999; Marín-Castro, 2017; Shoji, *et al.*, 1993).

En México, los bosques templados son el segundo bioma más extenso del país (Rzedowski, 1992) ocupando actualmente el 16% del territorio nacional, aproximadamente 323,300 km² (CONABIO, 2020) y uno de los más biodiversos en el mundo, debido, a que albergan 50 especies de pinos y 140 especies de encinos que conforman su estrato arbóreo; representando el 50% y 30% respectivamente del total a escala mundial para cada género (Fregoso, *et al.*, 2001; Valencia, 2004). En la FVTM el ecosistema de bosque templado alberga una alta diversidad biológica debido a la variedad de vegetación: bosque de pino, bosque de encino, bosque mixto de pino-encino y bosque de oyamel; en el límite de distribución del bosque de pino, constituye la zona de separación entre el zacatonal alpino y subalpino establecidos en suelos de tipo andosol ricos en arenas volcánicas (Rzedowski, *et al.*, 2001; Escamilla, 2007).

Los bosques templados enfrentan un problema grave de deforestación (Medina y Tejero-Diez, 2006), lo cual afecta los flujos de materia y energía (Naeem, *et al.*, 1999; Guzmán-Mendoza, 2004) y los ciclos biogeoquímicos. Lo anterior junto con las condiciones climáticas en alta montaña como la presión atmosférica, el clima, la temperatura, el viento, la precipitación y las estaciones (Körner, 2007), ha favorecido el dominio de las diferentes comunidades herbáceas amacolladas y gramíneas como el zacatonal (Challenger, 1998; Rzedowski, *et al.*, 2001) que contribuyen con sus raíces, a una mayor entrada de materia orgánica, lo cual explica tener mayor actividad microbiana y un aumento de almacenes de carbono derivados de esa intensa actividad (Galicia, *et al.*, 2016).

Ante el panorama de deforestación y el cambio de uso de suelo se han realizado diversas acciones para la conservación y restauración de bosque y pastizales en el suelo de conservación de la Sierra del Chichinautzin; entre ellas destacan el programa de Reforestación Rural de CONAFOR (2006) y la participación de voluntarios del grupo AEROMEXICO (Ethos, 2017), bajo el esquema de reforestar áreas con poca o nula vegetación y la conservación del suelo y de las coberturas vegetales. Estos programas se llevaron a cabo, destacando la importancia que tiene

la recarga del acuífero, en cantidad y calidad; como el eje rector de los servicios ecosistémicos, para mitigar hundimientos en la CDMX, como necesidad vital para los habitantes, y mejorar la calidad del aire.

Dentro de la FVTM, en la Subcuenca Tulmiac-Tlálloc de la Sierra del Chichinautzin, el estudio se verá determinado por los tipos de cobertura vegetal de alta montaña predominantes del área: el bosque de coníferas, que oscila a una cota altitudinal entre los 2,350 y 3,200 msnm, representado por el bosque de pino conformado por varias asociaciones arbóreas (Rodríguez, 2001) con raíces profundas (Silva, *et al.*, 1999) relacionadas con alta diversidad biológica y nutrientes para las plantas (Galicia, *et al.*, 2016); y la vegetación de herbáceas representados por pastizales subalpinos (Rzedowski, 1975; Silva, *et al.*, 1999), que se encuentran por arriba de los 2,800 msnm y que de manera adicional se ubican dentro del intervalo altitudinal del bosque de coníferas (Rzedowski, 1978); éstos son afectados de manera frecuente por los incendios forestales (Naranjo-Arias, *et al.*, 2002).

Ambas coberturas vegetales, tanto bosque como los pastizales están situados sobre suelo de conservación desarrollados a partir de material volcánico y edades jóvenes que van de 1,835 años A.P. en el Chichinautzin a 4,200 años A.P. en el Guesalapa y edades intermedias de 6,200 años A.P. en el Tlálloc a 8,000 años A.P. en el Cuauhtzin; estas edades pueden utilizarse para analizar la velocidad del intemperismo de las cenizas volcánicas, que es relativamente alta en estos sitios, y también para determinar los cambios pedológicos del suelo en condiciones climáticas dadas (Peña-Ramírez, *et al.*, 2009).

En el presente estudio, con el fin de evaluar cuantitativamente la Kfs que tienen los suelos volcánicos dentro de la zona de conservación en la región de la Subcuenca Tulmiac-Tlálloc en la Sierra del Chichinautzin, se plantearon las siguientes preguntas de investigación: ¿cómo varía la capacidad de infiltrar y conducir el agua de los suelos entre las coberturas vegetales de alta montaña bosque de pino y pastizal subalpino? y de las propiedades físicas, contenido de humedad, densidad aparente

y espesor de mantillo, ¿cuáles contribuyen predominantemente a la variación de las propiedades hidráulicas del suelo?

1.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad que tienen los horizontes superficiales de los suelos volcánicos de la Subcuenca Tulmiac-Tláloc en la Sierra del Chichinautzin para infiltrar y conducir el agua y su relación con algunas propiedades físicas, bajo dos tipos de cobertura vegetal: el bosque de pino y el pastizal subalpino.

1.2 Objetivos particulares

Dentro del área de estudio en sitios de muestreo con cobertura de bosque de pino y de pastizal subalpino:

- Caracterizar y evaluar las unidades edáficas en los sitios de muestreo.
- Realizar los ensayos de infiltración y determinar la K_{fs} en el horizonte superficial de cada sitio.
- Determinar la relación entre la K_{fs} y las propiedades físicas de los suelos.

1.3 Hipótesis

1. El bosque de pino y los pastizales subalpinos tienen una diferente capacidad para infiltrar agua. Esto se debe a que ambas coberturas difieren en la producción e incorporación de materia orgánica al suelo. Las diferencias en la composición vegetal del bosque y el pastizal determinan la cantidad y calidad de la biomasa de raíces en los horizontes superficiales del suelo. Por lo tanto, se espera que el volumen de agua infiltrada y la K_{fs} será mayor en el bosque que en los pastizales, debido a que en los bosques se tiene mayor espacio poroso en el horizonte superficial; mientras que en los sitios de pastizal las raíces son delgadas, lignificadas y pequeñas, incrementando la compactación del suelo (Fig. 1).

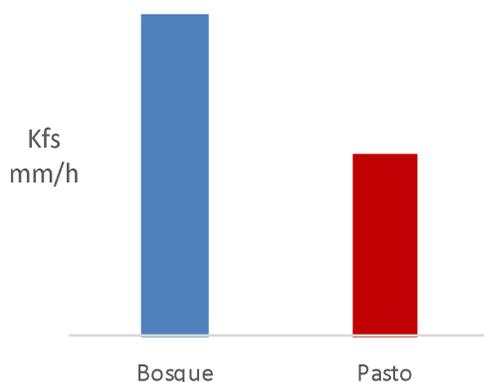


Figura 1. Modelo empírico de la K_{fs} en los diferentes tipos de cobertura vegetal (bosque de pino y pastizal subalpino)

2. El desarrollo del mantillo protege al suelo; lo cual permite que los poros se mantengan activos y así el suelo tenga mejor aireación y una mayor capacidad de infiltrar y conducir agua. Los bosques tienen una mayor diversidad en los aportes de materia orgánica proveniente de la cubierta arbórea y el sotobosque, contrario a los sitios de pastizal donde la diversidad de especies vegetales es menor. Por lo tanto, se espera que la infiltración y la K_{fs} estén relacionadas positivamente con el espesor de

mantillo; manteniendo activos y humectados los poros de la matriz del suelo, a través de flujos preferenciales formados por las raíces y evitando la pérdida de humedad. La densidad aparente es un reflejo del espacio poroso; si la densidad aparente es baja, indica un mayor espacio poroso, por lo tanto, se espera que la velocidad de infiltrar y conducir agua dentro del suelo sea alta; en los sitios de pastizal subalpino tendremos compactación del suelo con densidades aparentes altas y menor capacidad de la Kfs. La humedad inicial es un indicador de la capacidad que tiene el suelo para retener agua y de que los poros se encuentren activos. Los bosques al tener un mayor desarrollo del mantillo tendrán valores de humedad inicial altos que favorecen la Kfs. Los pastizales subalpinos no cuentan con esta protección que proporciona el mantillo, por ello tienen una menor cantidad de poros activos, menor humedad y una menor capacidad de Kfs (Fig. 2).

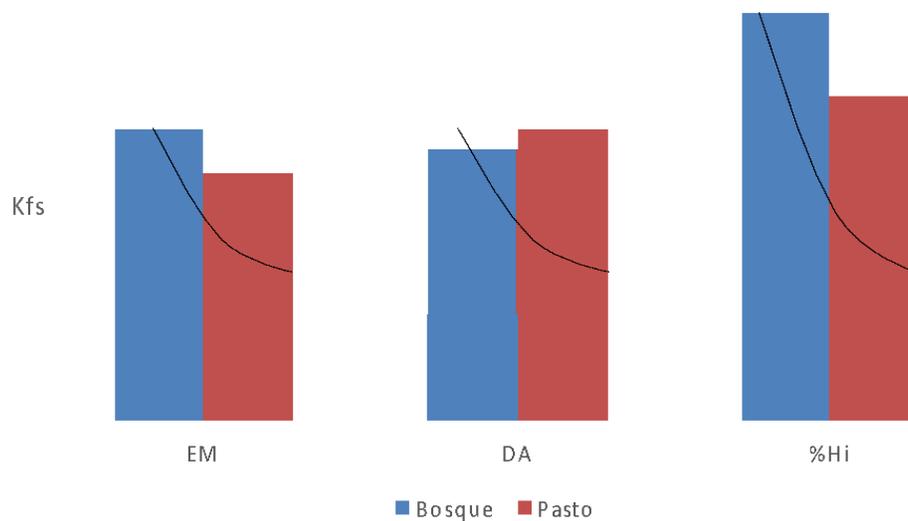


Figura 2. Modelo empírico de las propiedades físicas (EM: espesor de mantillo, DA: densidad aparente y %Hi: porcentaje de humedad inicial) en los diferentes tipos de cobertura vegetal (bosque de pino y pastizal subalpino). La línea negra indica la dirección que tendría la Kfs para cada caso.

2. Marco Teórico

Los suelos de origen volcánico en ecosistemas de alta montaña, son muy permeables debido a su alta capacidad de infiltrar y retener el agua, por lo que el escurrimiento superficial en bosques maduros y en zona de conservación, es poco frecuente (Bruijnzeel, 2004; Tobón, *et al.*, 2010). La infiltración y conductividad hidráulica son procesos sensibles a varios factores, entre los que destacan algunas de sus propiedades físico-químicas del suelo y su formación, manejo e historia de transformación (Elsenbeer, *et al.*, 1992; Perkins, *et al.*, 2007) descritas a continuación.

2.1 Los suelos de origen volcánico y los factores formadores

Los suelos de origen volcánico son los más productivos del mundo (Shoji, *et al.*, 1993b); comúnmente reciben el nombre de Andosoles, se forman y desarrollan a partir de cenizas volcánicas, también llamadas tefras, ricas en vidrio volcánico y a partir de depósitos de pómez, es decir materiales piroclásticos de caída (Geris, 2007; Meza y Geissert, 2007). La mayoría de los Andosoles tienen excelentes propiedades físicas como buen drenaje interno, buena capacidad de aireación, alta capacidad de retención de agua y son muy vulnerables a la erosión hídrica (Shoji, *et al.*, 1993b).

Dentro del territorio mexicano, los Andosoles cubren el 1.3 % (INEGI, 2007) y representan un recurso importante en la productividad agrícola y forestal. La presencia de minerales secundarios de bajo orden estructural como el alofano y la imogolita les da características particulares como: la baja densidad aparente, el alto contenido de materia orgánica (MO), alta porosidad y muy alta capacidad de retención de humedad, todas favorables para el buen desarrollo de raíces y el crecimiento de las plantas (Nanzyo, 2002); son suelos oscuros, profundos y fértiles, caracterizados por tener una alta estabilidad estructural (Shoji, *et al.*, 1993; Birkeland, 1999) y son resilientes a la degradación (Dahlgren, *et al.*, 2004 y Meza y Geissert, 2007).

La formación del suelo depende de (Shoji, *et al.*, 1993a) los factores formadores, entre ellos el material parental, el tiempo, el clima, la biota y la topografía (Jenny, 1941), los cuales determinan los procesos de meteorización, acumulación de materia orgánica y la formación de estructura. A continuación, se describen estos factores con énfasis en el área de estudio.

Material parental

El material parental es un factor fundamental que influye en la formación del nuevo suelo, conforme progresa esa formación, el suelo experimenta gradualmente cambios físicos y químicos (Shoji, *et al.*, 1993). Las cenizas volcánicas como material parental son relevantes debido a que están conformadas en una proporción importante de vidrio que es poco resistente al intemperismo. Las cenizas pueden ser transportadas por el viento de cientos a miles de kilómetros, dependiendo de su tamaño, composición, la velocidad del viento, el volumen de ceniza emitido y la altura de la columna de erupción (Nakagawa y Ohba, 2002). Con base en su contenido total de sílice, éstas se clasifican en riolita, dacita, andesita, basáltico andesítica y basáltica (Shoji, *et al.*, 2002); su composición mineralógica y la cantidad de vidrio volcánico, están relacionadas con el tamaño de partícula (Dahlgren, *et al.*, 2004).

Los suelos formados a partir de este material parental se caracterizan por el tamaño fino de sus partículas (< 2 mm) que promueve el avance rápido de los procesos de intemperismo químico, y la neoformación de minerales de bajo orden estructural como el alofano. Estos minerales a su vez promueven procesos de microagregación que conllevan a una alta porosidad y permeabilidad (Shoji, *et al.*, 1993). En función de su contenido de sílice, estos materiales parentales aportan más o menos cationes básicos a los suelos: materiales riolíticos son pobres en Ca y Mg, mientras los basálticos son ricos en estos elementos. Dentro del área de estudio el material parental que ha dado origen a los suelos es la ceniza volcánica; ésta tiene una composición andesítico-basáltica (Siebe, *et al.*, 2004).

Tiempo

Este es un factor importante para las características de los suelos, ya que la naturaleza del suelo se ve influida por la duración de los procesos que llevan a su desarrollo. En paisajes volcánicos, es frecuente encontrar suelos cubiertos por depósitos de ceniza volcánica reciente, emitida por conos emisores activos (Ugolini, *et al.*, 2002). En el área de estudio, se presentan suelos de edades jóvenes que van de 1,835 años A.P. en el Chichinautzin a 4,200 años A.P. en el Guesalapa y edades intermedias de 6,200 años A.P. en el Tláloc a 8,000 años A.P. en el Cuauhtzin (Peña, 2013). Cuanto más tiempo ha estado formándose el suelo, mayor será su contenido de minerales secundarios, de materia orgánica y tendrá una mayor estructura. Depósitos continuos de nuevos aportes de tefra, aunque sea en pequeñas cantidades, contribuyen a rejuvenecer el suelo, dado que las cenizas aportan nuevos nutrientes disponibles para las plantas. El espesor de los nuevos depósitos varía dependiendo de la intensidad de la erupción, la distancia a la que se encuentre el cono volcánico y el tipo de ceniza volcánica (Shoji, *et al.*, 2002).

Clima

El clima afecta la formación y las propiedades del suelo ya que la temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa y estacionalidad, determinan la intensidad y magnitud de los procesos pedogenéticos (European Commission, 2010). En la formación de los suelos volcánicos, la temperatura y las precipitaciones son los elementos que tienen un efecto primordial, ya que a medida que éstas varían, se verá determinada la velocidad y profundidad de la tasa de meteorización o intemperismo químico; ésta disminuye si la temperatura es baja, y aumenta si la humedad es mayor (Shoji, *et al.*, 1993). Además, la cantidad de precipitaciones influye sobre la disolución del vidrio volcánico y la lixiviación de sílice, fomentando la neoformación de minerales secundarios de bajo orden estructural. En los depósitos de ceniza de sitios como Chichinautzin, Guesalapa, Tláloc, y Cuauhtzin, la formación de suelos tuvo lugar en un clima muy similar a las condiciones actuales (Peña, 2013).

Biota

Los organismos vivos y en particular las plantas, desempeñan un papel vital en la formación de epipedones ricos en humus en el suelo, ya que, dependiendo del sitio y su abundancia en este, generan cantidad de materia orgánica, influyendo así sobre las propiedades físico-químicas del suelo. La European Commission (2010) indica que el aumento del contenido de materia orgánica, al alcanzar un equilibrio, es uno de los procesos fundamentales en la edafogénesis.

En un ambiente volcánico, cuando la ceniza es depositada, al poco tiempo la vegetación cubre dichos depósitos y la materia orgánica incorporada promueve la alteración de los minerales secundarios del suelo. Lo anterior aumenta la capacidad de retención de humedad del suelo permitiendo el suministro de agua disponible para las plantas. La acumulación de materia orgánica se favorece por la formación de complejos de humus con Al y Fe (Dahlgren, *et al.*, 2004), formando epipedones muy oscuros (Nishimura, *et al.*, 2008) y ricos en materia orgánica principalmente bajo coberturas de bosque y pastizal (Shogi, *et al.*, 1988). Las lombrices y otros animales actúan para mezclar la porción mineral y orgánica del suelo, enriqueciendo e influyendo en la estructura y porosidad de éste (Lee, 1985), así como en la construcción de canales y macroporos que favorecen los flujos preferenciales de agua. La materia orgánica es un componente determinante de la calidad del suelo y bajo cobertura forestal cumple funciones como fuente y almacén de nutrientes, da estructura al suelo y promueve el almacenamiento del agua (Karlen y Andrews, 2000), mientras que, bajo cobertura de pastizales, esta resulta ser menor provocando una disminución en la productividad y un descenso de nutrientes (SEMARNAT, 2003).

Topografía

La disposición de un terreno o el relieve como factor de formación puede variar en gran medida en distancias cortas; de forma que induce en el desarrollo del suelo (Lin, *et al.*, 2006^a). Este factor tiene poca incidencia en la pedogénesis de los suelos de origen volcánico; no obstante, cuando la ceniza volcánica se deposita, ya sea en

forma aérea o por arrastre mediante la acción del agua o viento, los suelos se encuentran estratificados, conformados por tefras de diferente edad lo que influye notoriamente en las características morfológicas que presentan estos suelos, porque tiende a suavizar la topografía, es decir, la inclinación de las pendientes disminuye (Lin, *et al.*, 2006^b). Cerca del cono volcánico emisor, se originan formas propias como lahares, coladas y campos de escorias y los suelos se desarrollan en pendientes que varían desde planas hasta fuertemente inclinadas (Pulido, 2006).

El Complejo Volcánico de la Sierra Chichinautzin (CVSCH), tiene una dirección E-W y se encuentra al Sur de la cuenca de México; dentro del área estudiada, existen numerosos conos de escoria a los que se asocian flujos de lavas con pendientes entre 7° y 35° grados; la cumbre del Tláloc es la elevación topográfica más alta (3,690 msnm) de toda la parte central oriental de la Sierra (Siebe, *et al.*, 2005).

2.2 Propiedades físico-químicas del suelo

Las propiedades físico-químicas del suelo como el pH, la salinidad, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica (Karlen y Stott, 1994), la humedad, la densidad aparente, la Infiltración, la conductividad hidráulica, la textura, la retención de agua, profundidad, la fauna edáfica y la actividad microbiana (Peña, 2013), pueden modificarse en función de la historia y del uso de suelo (Meza y Geissert, 2003; Prado, *et al.*, 2007). Dichas propiedades controlan el balance hídrico de la cuenca, la disponibilidad de nutrientes, el control del drenaje y la capacidad de aireación (Brady y Weil, 1999).

La materia orgánica (MO) que almacena el suelo es el resultado del aporte de biomasa vegetal y animal muerta y de su transformación por la actividad microbiana, es decir de los a los procesos de humificación y mineralización, los cuales dependen de la aireación del suelo, la calidad de la materia orgánica muerta, de las condiciones ambientales como la humedad y la temperatura, a la disponibilidad de nutrientes para los organismos descomponedores y al pH del suelo. La textura del

suelo influye en las condiciones de aireación y retención de humedad; además, los suelos arcillosos retienen más MO al formar complejos estables con la misma, y suelen retener más agua y nutrientes. La interacción de todas estas variables lleva a la expresión de un tipo y espesor de mantillo (EM), considerado la principal reserva de nutrimentos del suelo (Bosco, *et al.*, 2004).

La materia orgánica es importante e incide mucho sobre otras propiedades del suelo, como la formación de agregados, le da estabilidad estructural, aumenta la porosidad, mejora la aireación y el movimiento del agua en el suelo, mantiene la humedad, aumenta la capacidad de retención de agua disponible para las plantas y favorece en la infiltración y la conductividad del agua disminuyendo su erosión (Porta, *et al.*, 2003).

La densidad aparente (ρ_b) definida como la masa por unidad de volumen, da información sobre la compactación que puede tener cada horizonte en el perfil, la circulación del aire, del agua y de la penetrabilidad de las raíces en el suelo; está directamente relacionada con la estructura y con el contenido de materia orgánica (Porta, *et al.*, 2003). La densidad aparente es un criterio importante para la evaluación del balance hídrico y de nutrientes en el suelo y es determinante de la permeabilidad y de la profundidad fisiológica (Siebe, *et al.*, 2006).

Un requerimiento para optimizar la productividad forestal es la habilidad del suelo para retener y almacenar agua. La cantidad de agua que puede retener un suelo y su humedad actual es importante para la biota y depende de factores tales como el volumen, la porosidad, la textura, la MO y el EM, la estructura y la ρ_b . La humedad del suelo se puede expresar gravimétricamente, con base en la masa de agua por unidad de masa del suelo (unidades de $\frac{kg}{kg}$), o volumétricamente, relacionando la masa de agua por unidad de volumen ocupado por las tres fases del suelo, determinada a partir de la gravimétrica y de la ρ_b ; y expresada como porcentaje del volumen total del suelo (Porta, *et al.*, 2003).

2.3 Propiedades hidrofísicas del suelo: capacidad de infiltración y conductividad hidráulica saturada de campo.

La infiltración (I) es el término que describe el proceso de entrada de agua, generalmente de forma vertical, a la capa superficial del suelo por unidad de área y de tiempo (Porta, *et al.*, 2003). La velocidad con que ocurre este proceso se define como tasa de infiltración, y durante un ensayo de infiltración el volumen de agua que entra al suelo tiende a decrecer en el tiempo hasta alcanzar un valor constante denominado filtración base (Campos-Aranda, 1987). Un factor muy importante en esta propiedad hidrofísica es la vegetación, que incrementa la capacidad de infiltración de los suelos; ya que las raíces generan macroporos por donde el agua puede circular a mayor velocidad y el aire atrapado en el suelo puede salir favoreciendo el movimiento del agua y el drenaje a horizontes inferiores (Morgan, *et al.*, 1997).

La infiltración está estrechamente relacionada con la conductividad hidráulica saturada medida directamente en campo ($f = \text{field}$, $s = \text{saturated}$ (Kfs)). La Kfs representa la facilidad con la que el suelo conduce el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación. Este flujo saturado ocurre cuando el potencial matricial del suelo es igual a cero, es decir, cuando todos los macro, meso y micro poros se encuentran completamente saturados de agua. En la mayoría de suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio poroso total está lleno con agua; el 5% restante está lleno con aire (Donado, 2004). Este flujo de agua es utilizado por diversos autores como descriptor de la infiltración base (Wit, 2001; Ferrer, *et al.*, 2004; Sobieraj, *et al.*, 2004; Gómez-Tagle, *et al.*, 2008; Zimmermann y Elsenbeer, 2008).

La Kfs está fuertemente ligada con la distribución de tamaños de poros en el suelo y con la capacidad de campo (Childs y Collis-George, 1950). Los suelos volcánicos bajo cubierta forestal en estado de conservación, se asumen como muy permeables con alta capacidad de infiltración y retención de agua (Nanzyo, *et al.*, 1993). Sin

embargo, la infiltración es un proceso muy variable debido a distintos factores que interactúan en mayor o menor grado (Bartoli, 2007), destacando entre ellos: la pendiente, el espesor del mantillo, la textura, la porosidad, la humedad inicial del suelo, la densidad aparente, la bioturbación por organismos, el pH, y la cobertura vegetal (Selby, 1982).

Existen también diversos factores que pueden afectar de manera significativa la Kfs; Imeson, *et al.* (1992) encontraron que los incendios forestales generan sustancias hidrofóbicas en el suelo. En los Andosoles la capacidad de retención de humedad se pierde de manera irreversible cuando estos suelos se secan en la superficie o bien cuando son afectados por incendios forestales (Wada, 1980), presentando cierta repelencia al agua denominada hidrofobicidad. Después de un incendio, la hidrofobicidad puede manifestarse como una capa discreta de espesor y continuidad variable sobre la superficie del suelo; y depende del tipo de cobertura vegetal, la estación del año, el contenido de agua en el suelo, la humedad del sitio y la cantidad y tipo de materia orgánica (Buczko, *et al.*, 2006).

La hidrofobicidad tiene un impacto significativo en los procesos que regulan la hidrología del área, ya que disminuye la cantidad de agua que infiltra a nivel de raíces (Bauters, *et al.*, 1998; Ritsema, *et al.*, 1998), reduce la conductividad hidráulica y la infiltración, y aumenta la susceptibilidad a la erosión (Jaramillo, 2004). En suelos ligeramente húmedos - secos, la infiltración de agua puede llegar a ser rápida al inicio, debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre los sólidos del suelo y el agua, y con esta condición de hidrofobicidad extremadamente lenta o nula después de cierto tiempo (Jaramillo, 2004).

2.4 Características fisiológicas de bosque templado y pastizal subalpino

En la Subcuenca Tulmiac-Tláloc de la Sierra del Chichinautzin, los tipos de cobertura vegetal de alta montaña predominantes son: el bosque templado (bosque abierto y cerrado) y los pastizales naturales subalpinos. El bosque templado en el

área de estudio, caracterizado por las especies de árboles monopódicos con crecimiento de un eje principal y perennifolios; oscila a una cota altitudinal de 2,350 a 3,200 msnm, y está representado por el bosque de pino conformado por varias asociaciones arbóreas (Rodríguez, 2001).

Rzedowski (1975) menciona cuatro tipos de vegetación templados-húmedos: los bosques de encinos, oyameles, pinos y pastizales. En los pastizales generalmente las especies que dominan son *Calamagrostis tolucensis*, *Festuca amplissima*, *F. lívida*, *F. tolucensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Stipa ichu* (Rzedowski, 1975; Silva, *et al.*, 1999; Montero, 2002), siendo estos de tipo subalpino (Rzedowski, 1978; Silva, *et al.*, 1999).

Esta comunidad vegetal se presenta por debajo del límite superior arbóreo y por arriba de los 2,800 msnm; dentro del intervalo altitudinal del bosque de coníferas (Rzedowski, 1978; Naranjo-Arias, *et al.*, 2002).

2.5 Importancia de los servicios ecosistémicos hídricos de bosque y pastizales en las zonas de recarga de la Sierra del Chichinautzin

Los servicios ecosistémicos dentro de la zona de recarga están relacionados principalmente con los procesos de regulación del ciclo del agua independientemente del ecosistema; estos procesos son importantes ya que mantienen la regulación del flujo y depuración del agua, al igual que la infiltración y el almacenamiento de ésta. Se asocian a los servicios ecosistémicos hídricos el drenaje e irrigación natural, el medio de transporte de clastos mediante la fuerza de las corrientes de agua, la disponibilidad para el consumo humano, la regulación de sedimentos y la infiltración del agua para su descontaminación siendo esta última un proceso hidrológico clave para la provisión de servicios hídricos a diferentes escalas (Costanza, *et al.*, 1998b, a; de Groot, *et al.*, 2002; Chiesura y de Groot, 2003).

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

Dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), un sistema montañoso de aproximadamente 8,000 conos volcánicos; se encuentra la Cuenca de México, delimitada al este por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra del Chichinautzin, y al oeste por la Sierra de las Cruces y la Sierra de Monte Alto y Monte Bajo.

El estudio se realizó al sur de la Cuenca de México, en los límites de la Ciudad de México y el Estado de Morelos en una planicie de montaña dentro del Corredor Biológico de la Sierra del Chichinautzin (CBSC). La zona se sitúa rodeada por los volcanes Tulmiac, Cuauhtzin, Tláloc, La Comalera, San Bartolito, Tuxtepec y Chichinautzin (Fig. 3); a una altura aproximada entre los 2,100 y 3,600 msnm.

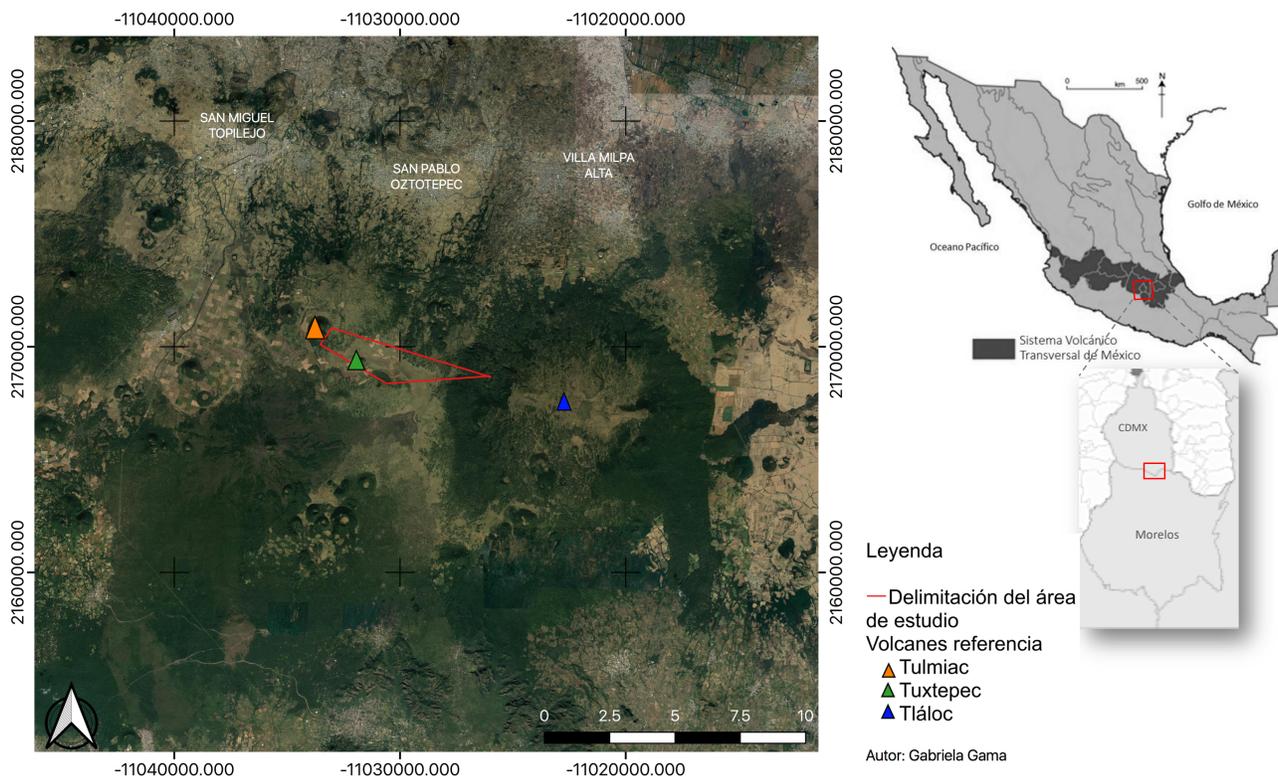


Figura 3. Localización y delimitación del área de estudio (línea roja), así como los distintos volcanes de referencia.

3.2 Clima

En el área de estudio el clima corresponde al tipo Cb (w)(x'), es decir, templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano (García, 1998). Acorde a los datos de la estación meteorológica más cercana "El Guarda" (con clave 9022 y registros de 1965 a 2017), la temperatura media anual es de 9.7°C, la precipitación total anual de 1273.9 mm y la oscilación térmica se sitúa entre los 4.5° y los 15.4° C (Fig. 4) (INEGI-CONAGUA, 2020).

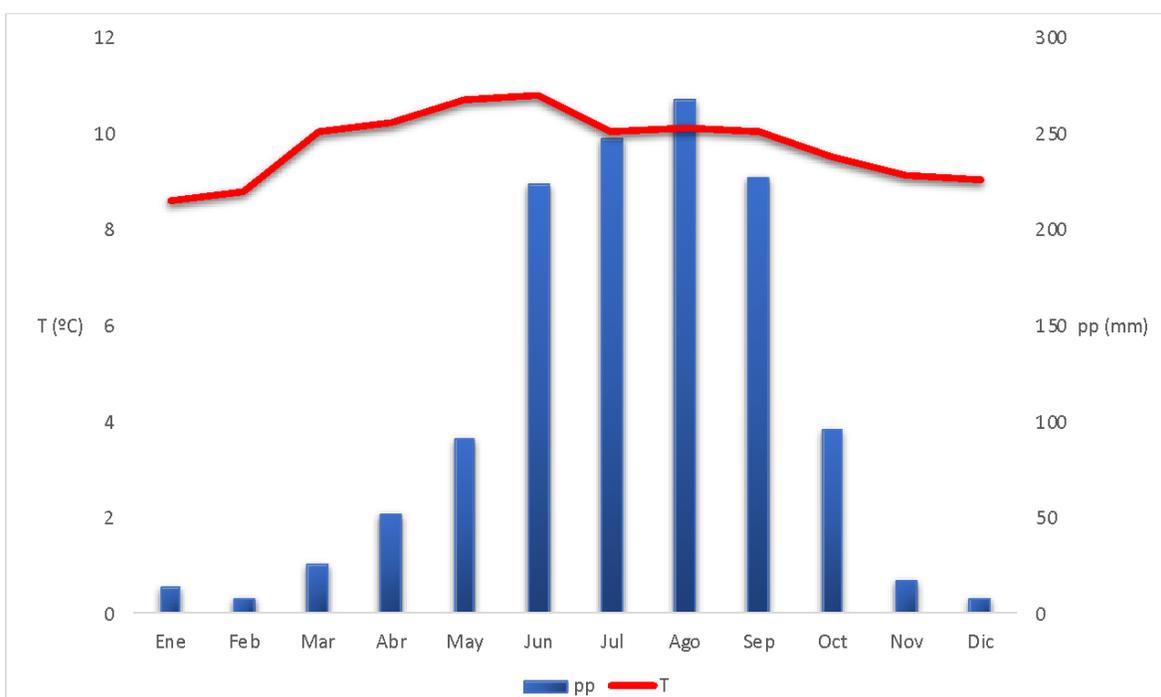


Figura 4. Climograma de la Temperatura Media Mensual Promedio (T) y Precipitación Total Mensual Promedio (pp) con registros de 1965 a 2017 (Fuente: INEGI-CONAGUA, 2020).

3.3 Geología y suelos

Las erupciones volcánicas ocurren principalmente por fracturas; el vulcanismo monogenético y actividad estromboliana (Delgado y Martín del Pozo, 1993) en el Sur de la Cuenca de México, se rige por la línea de fractura Clarión, por lo que los volcanes del grupo Chichinautzin están alineados en dirección de Oeste-Suroeste a Este-Noreste (Mooser, 1975). Estos volcanes que forman el Complejo Volcánico

de la Sierra del Chichinautzin (CVSCH) tienen pequeños volúmenes, pero colectivamente cubren una amplia área y tienen un volumen mayor que los grandes estratovolcanes de la FVTM (Arana, 2004).

El CVSCH comprende todas las corrientes lávicas, brechas y materiales estratificados por agua, de composición andesítica - basáltica, originando diversas formas de relieve, tales como laderas, depósitos piroclásticos, mesetas, conos cineríticos y de escoria y anillos de tefras (Fries, 1960). Dado que la actividad volcánica en la Sierra superó la velocidad de erosión, su morfología depende del vulcanismo de la zona; con flujos de lava de tipo Aa, lavas en bloques y flujos de tipo Pahoe-hoe las cuales desembocan hacia la Cuenca de México y dependiendo también de las edades del suelo (Arana, 2004).

El complejo volcánico tiene un aspecto joven, entre los 38,500 y 2,260 años (Arana y Delgado, 1997), pertenece al periodo Cuaternario de la era Cenozoica según INEGI (1997) y su espesor estimado es de 1,800 m con base en la diferencia de elevaciones entre el Valle de Cuernavaca y el volcán Chichinautzin (Fries, 1956; INEGI, 1975; Martín del Pozzo, 1982). Este último es el que le da el nombre al complejo volcánico y fue fechado por Siebe, *et al.* (2004) con una edad de 1,835 años.

El CBSC se compone principalmente por materiales volcánicos recientes (< 50,000 años) y éstos representan el factor dominante en el desarrollo de cada una de las propiedades de los suelos. En la subcuenca Tulmiac-Tlálloc los suelos son derivados de cenizas volcánicas y comúnmente se clasifican como Andosoles (Hiroshi, 1974). Este tipo de suelos tienen como características contenido alto de humedad y de materia orgánica, asociado a baja densidad aparente ($0.45-0.75 \text{ g/cm}^3$), permeabilidad alta, formación de agregados al secarse y porosidad alta; el pH tiene valores de ligeramente ácidos a neutros y su textura es generalmente franco arenosos-limosos y francos arcillosos-francos (Shimada, 1972; Hiroshi, 1974).

3.4 Hidrología

El sitio de estudio se encuentra dentro de la región IV Balsas la cual está conformada por dos grandes provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y la FVTM, cuya evolución, a través del tiempo geológico, dio lugar a una amplia variedad de características orográficas, climáticas e hidrológicas.

La Sierra del Chichinautzin se localiza en el límite hidrológico sur de la Cuenca de México, siendo antiguamente la descarga del drenaje de la región hacia el río Balsas, denominada actualmente como Región Hidrológica número 18 Balsas (Fig. 5), su ubicación dentro de la red hidrológica está entre la Cuenca del Río Lerma, al occidente; la Cuenca de México, al noreste; y la Cuenca del Río Balsas al sur (CONAGUA, 2010).

En el área se presenta relieve endógeno volcánico acumulativo, sin embargo, las condiciones de precipitación, la orografía, la geología, el uso del suelo y la extracción que se hace de los recursos para uso y aprovechamiento, definen las condiciones de escurrimiento y filtración hacia el subsuelo a lo largo y ancho de esta Región Hidrológica. La zona de estudio se encuentra constituida también por rocas de origen volcánico, sumamente fracturadas y con una estructura porosa, lo que provoca que sea un sitio muy permeable, favoreciendo la recarga de acuíferos mediante la infiltración de agua (Ávila, 1998).

Ortega y Farvolden (1989) y la CONAGUA (2013), mencionan que las principales zonas de recarga de acuíferos se localizan en la Sierra de Chichinautzin, Sierra Zempoala y Sierra Nevada; con afloramientos propios de los manantiales más caudalosos de la Cuenca. Un escurrimiento importante nace en las laderas del volcán Chichinautzin con dirección Noreste, pasando por Topilejo y descargando en el lago de Xochimilco, teniendo como principal manantial el de Tulmiac.

3.5 Descripción de los sitios de muestreo

Para la selección de los sitios de muestreo se realizaron recorridos en campo; se localizaron tres zonas de estudio considerando que su cobertura vegetal natural fuera bosque de pino y pastizal subalpino. El primer sitio de estudio se localizó en las faldas del volcán Tláloc, el segundo, cerca del manantial del volcán Tulmiac y el tercero en el volcán Tuxtepec (Fig. 6). Todos los sitios, ubicados dentro del CBSC, en la Ciudad de México, México.

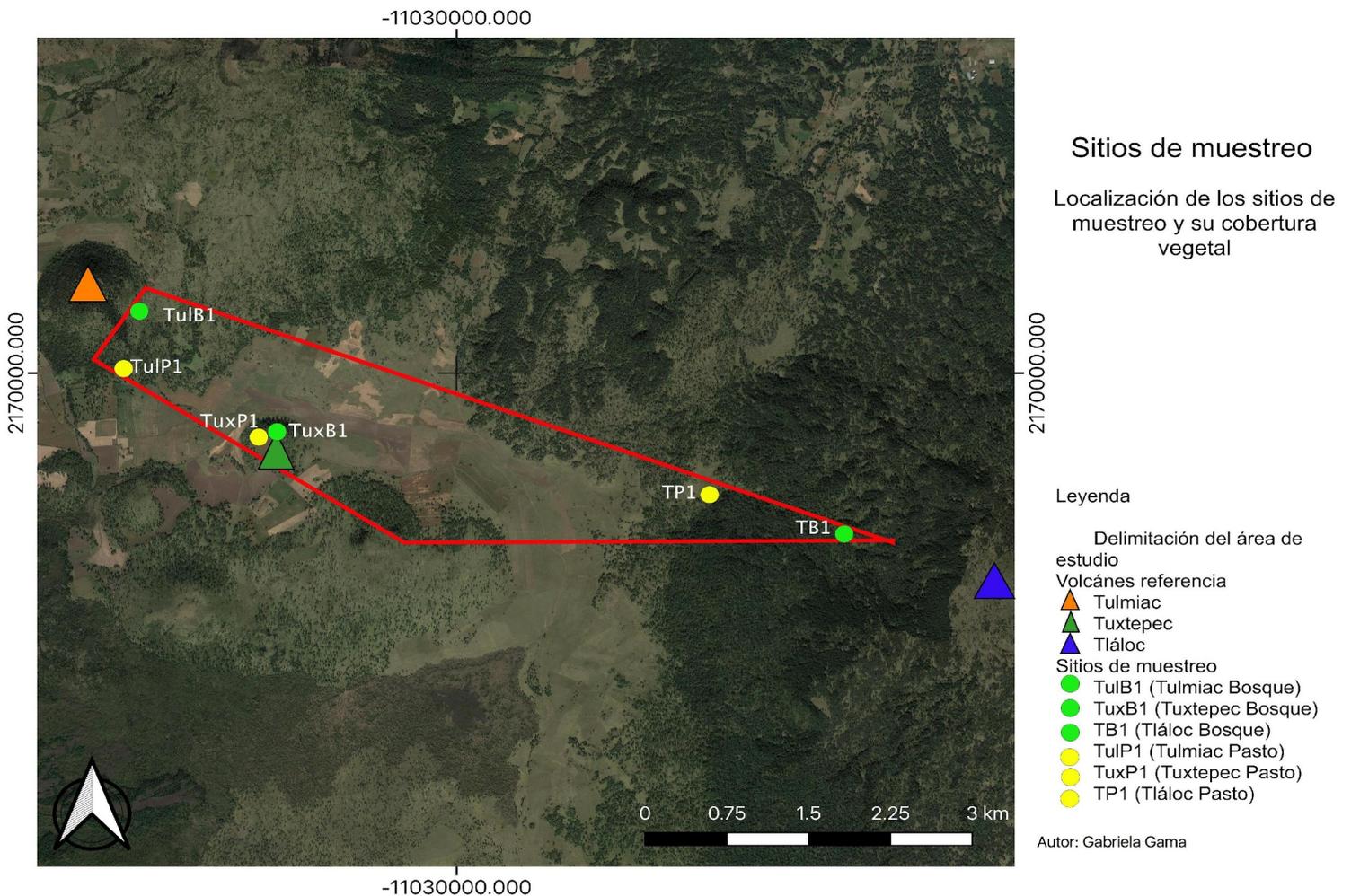


Figura 6. Polígono donde se encuentran ubicados los sitios de estudio y los volcanes de referencia.

3.5.1. *Bosque*

En los tres sitios de bosque, la cobertura vegetal es de alta montaña donde predomina el bosque templado de coníferas, caracterizado por las especies de árboles monopódicos y perennifolios, de entre los 15 y 20 m de altura; oscilando a una cota altitudinal de 2,350 a 3,100 msnm, y representado por el bosque de pino (Rodríguez, 2001). La especie más importante en el estrato arbóreo es *Pinus hartwegii*; conformado por varias asociaciones como *P. montezumae*, *P. rudis*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla* (Fig. 7) (Silva, *et al.*, 1999; Ramos, 2000).



Figura 7. Cobertura de bosque de pino para los tres sitios seleccionados, para la determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo.

3.5.2. *Pastizal subalpino*

La vegetación de los pastizales en los tres sitios de estudio, está caracterizada por presentar dominancia de gramíneas amacolladas y herbáceas, es conocido como pastizal o zacatonal subalpino con raíces lignificadas desarrollados en los horizontes superficiales. Están representados por especies como *Calamagrostis toluensis*, *Festuca amplissima*, *F. lívida*, *F. toluensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Stipa ichu* (Montero, 2002; Rzedowski, 1975; Rzedowski, 1978; Silva, *et al.*, 1999) (Fig. 8) y pertenecen a la zona de mediana montaña según Rzedowski (1975); estos elementos arbustivos se encuentran en parches o individualmente, a unos 2,800 y 3,500 msnm sobre planicies de acumulación, favorecidos por incendios forestales (Naranjo-Arias, *et al.*, 2002; Rzedowski, 1978).



Figura 8. Cobertura de pastizal subalpino para los tres sitios seleccionados, para la determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo.

3.6 Diseño de muestreo y ensayos de infiltración

Para cada uno de los tres sitios de estudio seleccionados se delimitó una parcela con la cobertura vegetal esperada de bosque de pino con una buena representación arbórea y otra de pastizal subalpino con abundancia de estos, dentro de la misma unidad edáfica y con buena estructura del suelo. Cada parcela midió aproximadamente 10 m x 10 m. Dentro de cada parcela se seleccionaron 11 puntos para hacer los ensayos de infiltración de agua, dando un total de 66 mediciones.

Para seleccionar los puntos donde se realizarían los ensayos de infiltración, en el bosque, se consideraron a los pinos más grandes, generalmente que llegarán a tener más ramificaciones de un lado que del otro, lo cual produce un microclima por debajo, tomando en cuenta la cantidad de MO producida. Las infiltraciones se realizaron en el límite de la cobertura del dosel de los pinos (Fig. 9) para evitar la influencia de la copa de los árboles sobre el suelo.

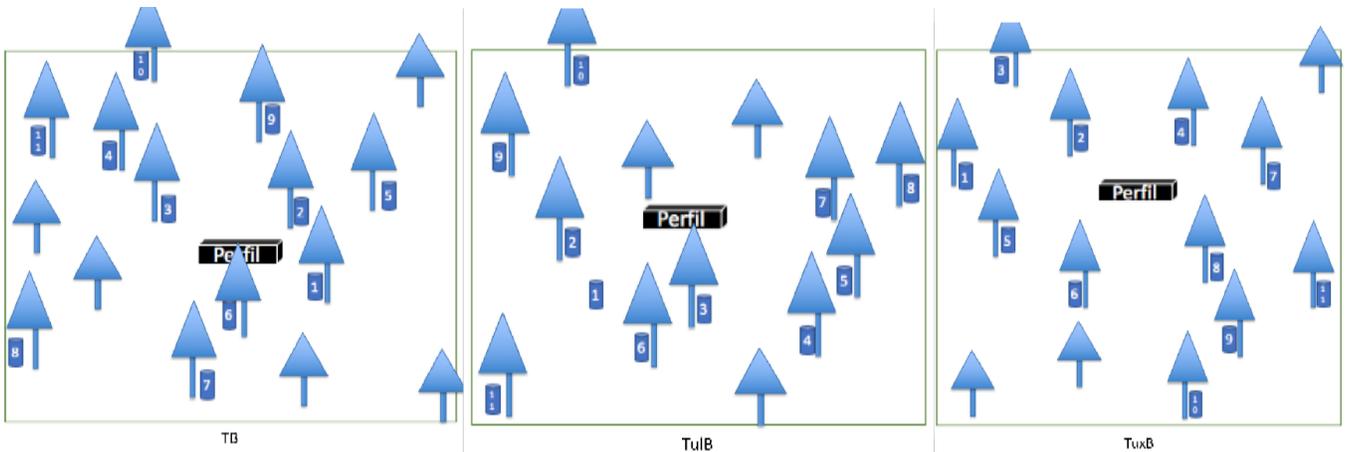


Figura 9. Diseño del muestreo de las 11 mediciones de infiltración por sitio en bosque de Tlálloc (TB), Tulmiac (TuB) y Tuxtepec (TuxB).

En los pastizales subalpinos los ensayos de infiltración se realizaron en la parte externa de los macollos que forman pequeños bordos semicirculares en forma de media luna en conjunto, o en su defecto en los pastos dominantes más altos (Fig. 10); dentro del límite del crecimiento de los pastos.

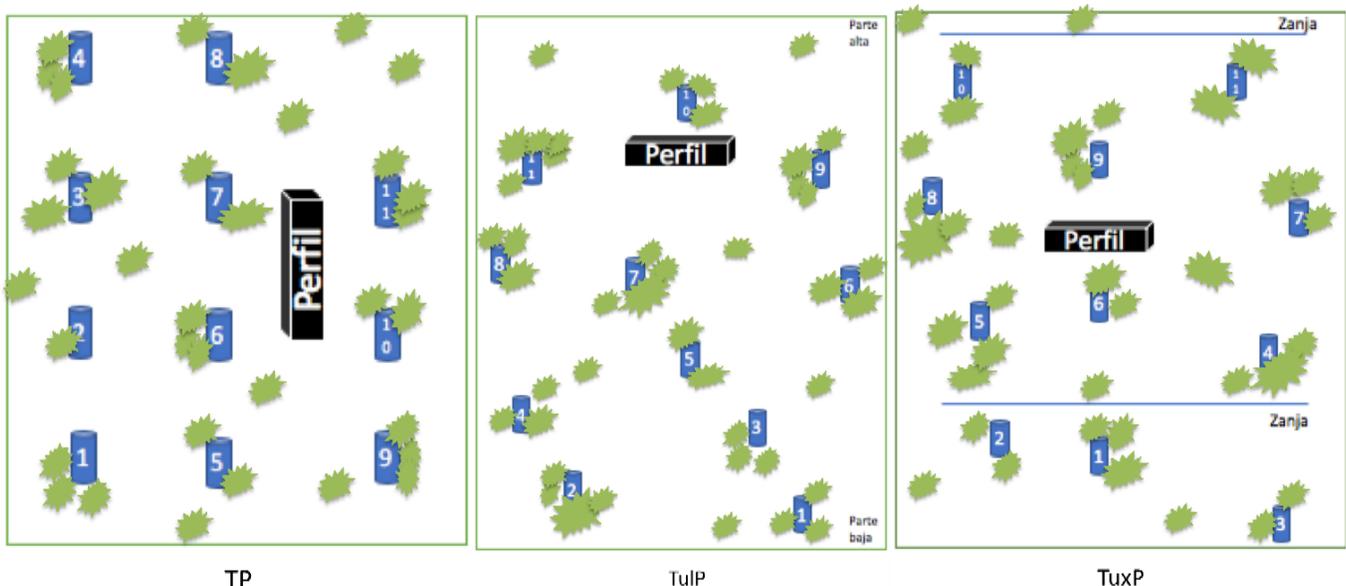


Figura 10. Diseño del muestreo de las 11 mediciones de infiltración por sitio en pastizal de Tlálloc (TP), Tulmiac (TuIP) y Tuxtepec (TuxP).

3.7 Evaluación edafocológica

En cada sitio y tipo de cobertura vegetal se realizó un reconocimiento previo del suelo, mediante barrenaciones de un metro de profundidad, para garantizar que se trabajó en la misma unidad edáfica. Para la caracterización del suelo se realizó un perfil de suelo, procurando que este quedará en el centro de la parcela. Se abrieron los perfiles de aproximadamente 140 cm de profundidad y se procedió a la descripción morfológica de los horizontes de acuerdo con Siebe, *et al.* (2016).

Las propiedades edafocológicas de los horizontes que se evaluaron por perfil fueron: la ubicación y los factores ambientales del sitio (localidad, estado del tiempo, relieve, exposición, pendiente, evidencias de erosión y material parental) y las características y espesor de los horizontes (profundidad, textura, pedregosidad, color, pH, contenido de materia orgánica, estructura, estabilidad de agregados, poros, densidad de raíces y el límite entre horizontes). La descripción del perfil se realizó en hojas de campo con el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo de Siebe, *et al.* (2016).

3.8 Análisis del suelo

Los análisis de laboratorio, fueron realizados en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología, UNAM.

3.8.1 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente (ρ_b) se utilizó el método de la USDA (2008); en cada punto de ensayo de infiltración se introdujo verticalmente en el suelo un cilindro de acero inoxidable de 100 cm³, se colectó una muestra inalterada de suelo en superficie dentro de bolsas herméticas; cuidando siempre de no se compactará el suelo.

La muestra húmeda se pesó y se llevó a secar en charolas de aluminio a la estufa (105° C) durante 24 horas o hasta que el peso fuera constante, con la finalidad de evaporar toda el agua.

Fue necesario realizar tres repeticiones para obtener un valor promedio y representativo. Así mismo, se determinó el volumen del cilindro (V), con las medidas internas; mediante la fórmula:

$$V = h\pi r^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

h= la altura del cilindro y r= el radio del cilindro

Con el valor del cilindro se determina la ρ_b en $\frac{g}{cm^3}$

$$\rho_b = \frac{\text{Peso de suelo seco (g)} * 100}{\text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}} \quad (\text{Ec. 2})$$

3.8.2 Humedad volumétrica

Una de las formas indirectas de medir el contenido de agua en el suelo es con el equipo TDR (reflectometría de dominio de tiempo por sus siglas en inglés) en campo. Se tomó una primera medición del porcentaje de humedad volumétrica inicial (Hi) fuera del anillo y al finalizar los ensayos de infiltración, se tomó otra medición en el suelo al interior del anillo, para conocer el contenido de humedad final (Hf) de los ensayos de infiltración.

3.8.3 Espesor del mantillo

Se midió el espesor del mantillo (EM) en centímetros empelando un vernier o cinta métrica y posteriormente, en bolsas de papel se colectó una muestra del mantillo de

25 x 25 cm. La muestra húmeda se pesó y se secó dentro de la estufa (60° C) hasta tener un valor constante.

3.9 Ensayos de infiltración

En cada sitio se realizaron 11 ensayos de infiltración por cobertura vegetal (bosque de pino y pastizal subalpino) utilizando infiltrómetros portátiles de carga constante y anillo sencillo (IPCCAS) que son una variante de los infiltrómetros de presión descritos por Elrick y Reynolds (1992) y Fortín (2003), clasificado como de presión de anillo sencillo según Angulo-Jaramillo, *et al.* (2000).

El IPCCAS es un instrumento que está constituido por tres componentes: el primero es el tubo de Mariotte, con un diámetro de 65 mm, tiene adherida una regla graduada en milímetros y funciona como el reservorio principal del agua, está sellado en ambos extremos con dos tapones de goma (#12). En el interior del Mariotte, se encuentra el tubo de burbujeo con un diámetro de 6.0 mm, el cual sobresale por una apertura del tapón superior. Ambos tubos son de Plexiglás o Perspex (polimetil-metacrilato). En la parte inferior del tubo de Mariotte está conectada una manguera con una válvula de paso. El segundo componente es un anillo de acero inoxidable que tiene un diámetro de 150 mm y 60 mm de profundidad con una tapa hermética y una campana hembra que se conecta con la llave de paso, un tubo de purga soldado herméticamente y un mango de inserción que permite montar y desmontar fácilmente el anillo. En el tubo de purga se inserta un trozo de manguera de polietileno de 20 mm de diámetro y 200 mm de longitud que sirve para medir la carga hidráulica generada por la succión del suelo. La tercera parte es la base de soporte del tubo de Mariotte, que se compone de una base en forma de disco y la caña de inserción, ambos son de PVC (Fig. 11).

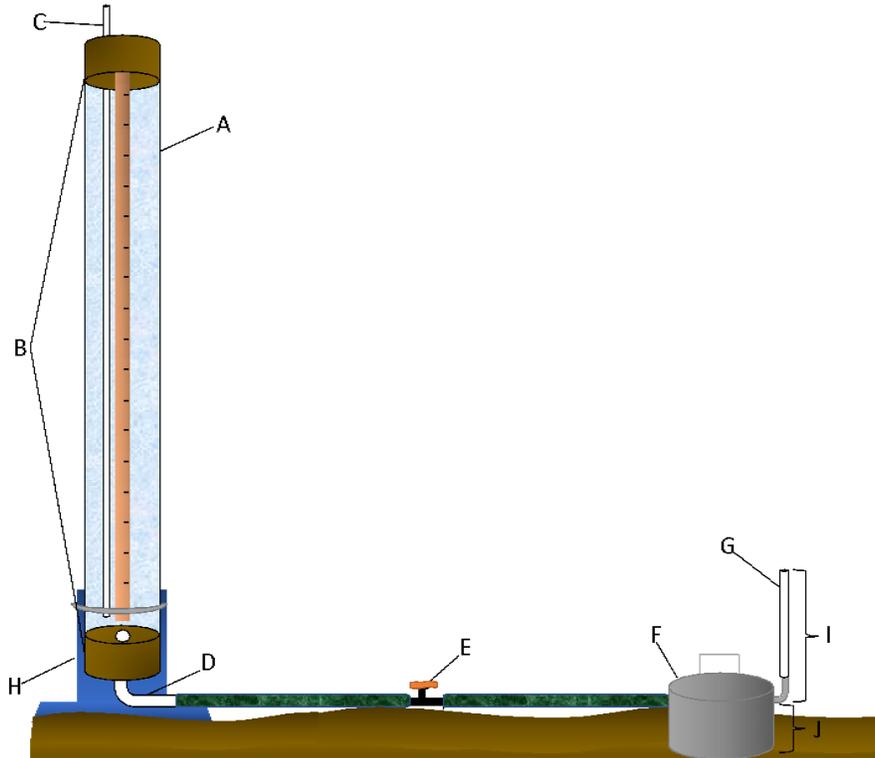


Figura 11. Componentes del infiltrómetro de anillo sencillo y carga constante (IPCCAS) A) Reservorio principal; B) tapones de goma; C) tubo de burbujeo; D) tubo de salida da agua del reservorio principal; E) llave de paso; F) anillo sencillo de acero; G) tubo de purga y medición de la tensión; H) base y soporte del equipo; I) carga hidráulica constante y J) profundidad de inserción del anillo en el suelo (modificado según Gómez-Tagle, 2008).

Los ensayos de infiltración se realizaron directamente sobre el horizonte A (horizonte órgano-mineral). En sitios con pendiente se utilizaron estacas, para mantener estable el dispositivo. Previamente fue necesario retirar el mantillo y las raíces superficiales de forma cuidadosa sin alterar la estructura del suelo para facilitar la inserción del anillo. Utilizando un martillo de goma, se enterró el anillo a una profundidad de 50 mm en el suelo y el tubo de burbujeo dentro del reservorio principal lleno de agua se ajustó para tener una carga constante. Las mediciones comienzan cuando se abre la llave de paso e inicia el burbujeo, entonces se registra con la regla graduada del reservorio principal el descenso de la columna de agua y el tiempo con un cronómetro, el ensayo de infiltración continua hasta alcanzar un

gasto estable, es decir, la entrada de un mismo volumen de agua por unidad de tiempo, indicando que se ha alcanzado la fase estacionaria; a su vez también se mide la carga hidráulica. El agua utilizada para los ensayos de infiltración provino de la toma municipal de Nicolás Romero, Estado de México que logísticamente permitió ser viable para el acarreo a los sitios de muestreo (comentario personal).

La infiltración medida con el IPCCAS se representa gráficamente como tiempo vs infiltración acumulada. Se distinguen dos fases; la primera de ellas es la fase transitoria (sucesión de puntos con rápido cambio de pendiente) dominada por la sorbilidad o el componente capilar del suelo (Fig. 12a), y la segunda es la fase estacionaria (línea recta) controlada por el componente gravitacional y la K_{fs} (Fig. 12b), en donde ya no cambia la tasa de infiltración (Fig. 12c) (Elrick y Reynolds, 1992).

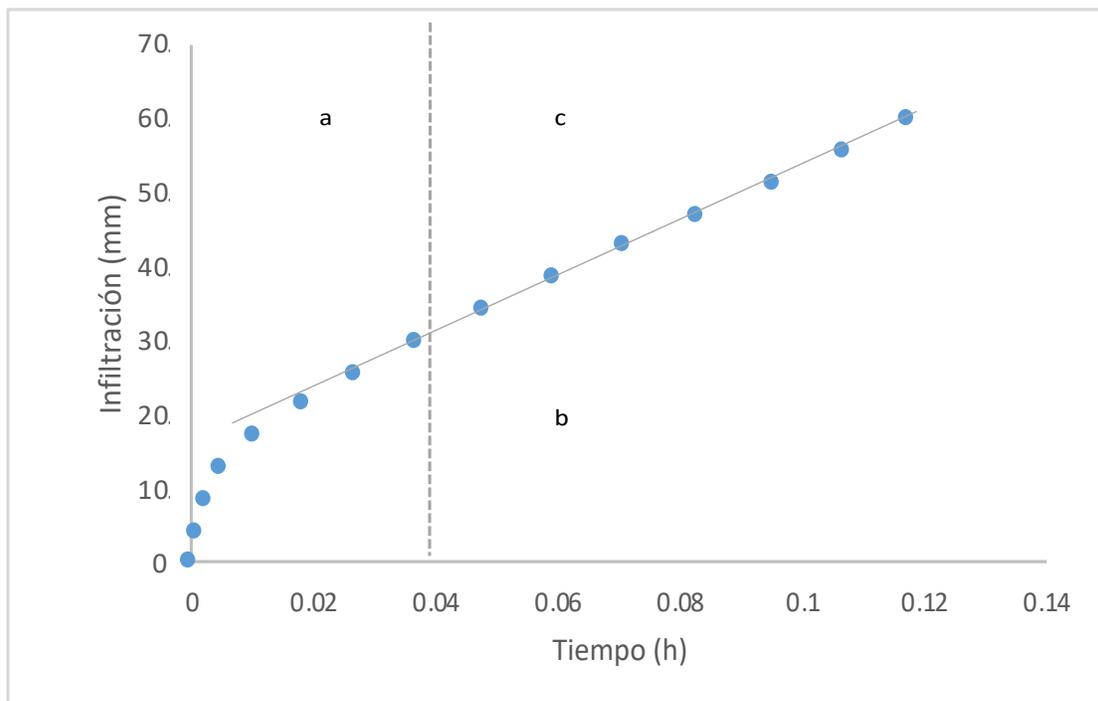


Figura 12. Gráfica de infiltración acumulada para un ensayo de infiltración. Se distinguen la fase transitoria (a), la fase estacionaria (b) y el umbral de tiempo en que alcanza la condición de flujo estacionario (c).

3.10 Determinación de la conductividad hidráulica saturada de campo.

Se aplicó el segundo método de Wu, *et al.* (1999) para determinar la conductividad hidráulica saturada de campo (Kfs). El **método Wu2** (Ec. 3) utiliza datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (Fig. 12c); en donde A es la pendiente de la recta obtenida por regresión de mínimos cuadrados (tiempo vs lámina acumulada) y se emplea el coeficiente $a = 0.9084$ correspondiente al intercepto y la pendiente de la ecuación generalizada. La solución con este método adopta la siguiente forma:

$$Kfs = \frac{A}{af} \quad (\text{Ec. 3})$$

a su vez, el parámetro f (Ec. 4) se define como:

$$f = \left\{ \frac{\left[h + \left(\frac{1}{\alpha^*} \right) \right]}{G^*} \right\} + 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

donde h es la carga hidráulica, α^* el componente capilar del flujo hidráulico; valor (de 12^{-1} correspondiente a la mayoría de los suelos estructurados con arcilla y limos) tomado del cuadro de Elrick y Reynolds (1992) y G^* el factor de forma (Ec. 5) definido como:

$$G^* = d + \left(\frac{r}{2} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

donde d es la profundidad de inserción del anillo y r el radio de este.

3.11 Análisis estadístico

Se realizó un primer análisis exploratorio con estadística descriptiva (valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación) de las propiedades hidrofísicas del suelo (ρ_b , %Hi, %Hf y EM) y de la Kfs por cada sitio y por cada tipo de cobertura vegetal. Para comparar cómo varía la Kfs entre los dos tipos de cobertura vegetal se realizó un análisis de covarianza (Ancova) con los mismos datos de Kfs y sitio y cobertura vegetal de manera aditiva; esto para evaluar la diferencia de las medianas de Kfs y determinar qué variación existe entre cada uno; las diferencias de estos sitios se determinaron por una prueba de contrastes de *post hoc* Tukey. Para demostrar una distribución normal, la Kfs se transformó a logaritmo natural y se realizó la prueba de Shapiro y Wilk (1965), a partir de esta prueba se dedujeron factores para un modelo lineal y una regresión que considera las variables que explican de forma significativa la variación de la Kfs. El modelo propuesto es el siguiente:

$$Kfs \sim EM + \rho_b + Hi + USO + \varepsilon$$

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el Software estadístico R versión 3.6.3.

4. Resultados

4.1 Características de las unidades edáficas del suelo.

Se realizaron seis perfiles de suelo, uno para cada sitio de muestreo, todos se abrieron y describieron en los meses de abril-mayo y agosto-septiembre del año 2019.

En general corresponden a suelos profundos llegando aproximadamente a 140 cm, bien desarrollados y con buena estructura. Todos ellos presentan un horizonte orgánico con gran espesor (Cuadro 1) y densidades aparentes bajas, características de los suelos Andosoles.

La descripción detallada de cada perfil de suelo se encuentra en el Apéndice 1, correspondientes a cada sitio y cobertura vegetal.

Cuadro 1. Características edáficas de los perfiles de suelo correspondientes a los tipos de cobertura vegetal, en los tres sitios de estudio. Por cada tipo de horizonte encontrado por perfil, se describe la profundidad, la textura y la densidad aparente.

	Sitio	Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	ρ_b (g/cm ³)
BOSQUE	Tláloc (TB)	Ah ₁	0-10	CLf	0.38
		Ah ₂	10-40	CRL	0.55
		Bw ₁	40-60	CRA	0.43
		Bw ₂	60-86	CR	0.41
		Bw ₃	86-110	CR	0.61
		Bw ₄	110-140	RA	0.82
	Tulmiac (TuIB)	Ah ₁	0-10	CLg	0.60
		Ah ₂	10-20	CLg	0.73
		Ah ₃	20-40	CLg	0.69
		AB	49-62	C	0.69
		BA	62-71	C	0.85
		B	71-119	C	0.66
	Tuxtepec (TuxB)	Ah ₁	0-10/15	CL	0.78
		Ah ₂	10/15-25/28	CL	0.68
		AB	25/28-40	AC	0.65
Bw ₁		40-77	AC	0.78	
Bw ₂		77-120	CRL	0.73	
	Sitio	Hor	Prof (cm)	Textura	ρ_b (g/cm ³)
PASTIZAL	Tláloc (TP)	Ah ₁	0-11	C	0.46
		Ah ₂	11-30	CLg	0.42
		2Ah ₁	30-89	CRA	0.44
		2AC	89-115	CRL	-
		Cw	115-130	CLf	-
	Tulmiac (TuIP)	Ah ₁	0-11	CRA	0.60
		Ah ₂	11-31	CA	0.73
		AC	31-58	CRA	0.69
		BC	58-115	CRA	0.69
		2Ah ₁	115-132	CRA	0.85
	Tuxtepec (TuxP)	Ah ₁	0-6	CLg	0.66
		Ah ₂	6-22	CLg	0.78
		AB	22-36/56	CLg	0.68
		Bw ₁	36/56-74	C	0.65
		Bw ₂	74-100	CR	0.78
Bw ₃	100-125	CRL	0.73		

C: Franca, CLg: Franco limosa gruesa, CRA: Franco arcillo arenosa, CRL: Franco arcillo limosa, CLf: Franco limosa fina, CA: Franco arenosa, CR: Franco arcillosas, RA: Arcillo arenosa, CL: Franco limoso, AC: Arenoso franco

4.1.1 Características de las unidades edáficas del suelo en los sitios de Bosque.

El perfil de Tlálloc (TB) se abrió en abril, en un sitio donde había ocurrido un incendio superficial, donde además tenía pastizal en el sotobosque; con pendiente moderadamente inclinada de 3° (Fig. 13) y profundidad de 140 cm en donde se distinguieron seis horizontes y un horizonte orgánico, el perfil presentó color café-marrón amarillento oscuro según la tabla Munsell, uniforme aparentemente; la textura difiere de franco limosa fina en el primer horizonte a arcillo arenosa en el último horizonte, sin pedregosidad, presentando una densidad aparente de 0.38 - 0.82 g/cm^3 y pH ligeramente ácido de 5.9 a 6.4. La distribución de raíces gruesas es alta con mayor densidad en los tres primeros horizontes y mediana en profundidad. Se identificó aluminio activo en todos los horizontes, lo cual nos indica que el suelo contiene minerales de bajo orden estructural como el alofano, una característica determinante de los Andosoles.



Figura 13. Vista del sitio de bosque de Tlálloc (TB)

En agosto, en temporada de lluvias; en el sitio del Tulmiac, TuIB se abrió el perfil en una pendiente escarpada de 15° a 20°; en 119 cm de profundidad se identificaron seis horizontes; la variación del color va de negro a café-marrón amarillento oscuro en profundidad y textura de franco limosa a franca, sin pedregosidad. El sitio se encontraba con vegetación de *Pinus* y presencia de pastos de gramíneas como la especie de *Festuca sp* (Fig. 14) la densidad aparente va de 0.60 - 0.85 g/cm^3 y el pH ligeramente ácido de 5.8 a 6.5, con presencia de hifas a lo largo de todo el perfil y densidad de raíces alta.



Figura 14. Vista del sitio de bosque de Tulmiac (TuIB)

El sitio Tuxtepec, TuxB fue un sitio de bosque con un dosel abierto cercano a cultivos, con evidencias de fuerte perturbación antrópica (Fig. 15). El perfil se abrió en septiembre 2019, en una ladera con una pendiente escarpada de 15° a 21°; y tuvo una profundidad de 120 cm, se caracterizaron cinco horizontes, la variación del color es negro en superficie, café-marrón amarillento oscuro en profundidad; la textura varía de franco limosa a franco arcillo limosa, sin pedregosidad en los primeros horizontes excepto en el último horizonte de 77 - 120 cm con un vol. del 35% de piedras; el perfil tiene una densidad aparente general entre 0.65 - 0.78 g/cm^3 y pH ligeramente ácido de 6.2 a 6.5; la distribución de raíces es alta en los primeros horizontes, a partir de los 40 cm ésta disminuye a baja.



Figura 15. Vista del sitio de bosque de Tuxtepec (TuxB)

4.1.2 Características de las unidades edáficas del suelo en los sitios de pastizal subalpino.

En el sitio de Tláloc, el perfil TP tiene una pendiente moderadamente inclinada de 3°, entre lavas de acumulación, teniendo influencia de un incendio superficial previo y evidencias de erosión laminar moderada (Fig. 16). Este perfil tuvo una profundidad de 130 cm, se identificaron cinco horizontes distribuidos de manera homogénea en el perfil con un horizonte sepultado (33 - 89 cm), el color dentro del perfil fue negro en los tres primeros horizontes y café-marrón amarillento en profundidad; su textura varía de franco a franco limosa, presentando una densidad aparente de 0.42 - 0.46 g/cm^3 y pH ligeramente ácido de 6 - 6.4; con presencia de Al activo, poca materia orgánica en superficie del 3% y densidad de raíces alta hasta los 89 cm de profundidad.



Figura 16. Vista del sitio de pastizal de Tláloc (TP)

Para TulP una zona de pastos altos y con algunos árboles de *Pinus*, el perfil se abrió en mayo en una posición fisiográfica a pie de monte y con pendiente escarpada moderada de 12° (Fig. 17); a una de profundidad 132 cm, se clasificaron cinco horizontes, en donde, el horizonte orgánico hubo presencia de lombrices y en el ultimo horizonte (115 – 132 cm) se observó un suelo sepultado, el color aparente del perfil en húmedo fue de negro a café-marrón amarillento oscuro y textura dominante franco arcillo arenosa, presentó una densidad aparente de 0.60 - 0.69 g/cm^3 y pH muy ligeramente alcalino de 6 a 7.1, con presencia de Al activo y alta densidad de raíces finas hasta los 58 cm de profundidad.



Figura 17. Vista del sitio de pastizal de Tulmiac (TulP); se observa el infiltrómetro utilizado para los ensayos de infiltración.

Para el sitio de Tuxtepec, el perfil TuxP (Fig. 18), el perfil se abrió en agosto y tuvo una profundidad de 125 cm, cerca de cultivos con una pendiente escarpada moderada de 9° a 15°; se identificaron seis horizontes, con una variación de color negro a café-marrón amarillento oscuro, con una textura franco limosa a franco arcillo limosa y densidad aparente de 0.65 - 0.78 g/cm^3 , pH ligeramente ácido a muy ligeramente alcalino de 5.9 a 7, con presencia de Al activo a lo largo de todo el perfil y una alta densidad de raíces hasta los 56 cm disminuyendo a profundidad.



Figura 18. Vista del sitio de pastizal de Tuxtepec (TuxP)

4.2 Evaluación edafocológica de los perfiles de suelo

Las evaluaciones edafocológicas de cada perfil de suelo se encuentran en extenso en el Apéndice 2, correspondientes a cada sitio. A continuación, se presentan las características generales de la evaluación por uso de suelo.

Cabe destacar, que la textura del suelo indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño e influye en el comportamiento del suelo con respecto a su capacidad de retención de agua y nutrientes, su permeabilidad y su capacidad para descomponer la materia orgánica. En este estudio, las texturas de los diferentes horizontes de cada perfil se definen de una manera gráfica solo como un sistema de clasificación en campo (Fig. 19).

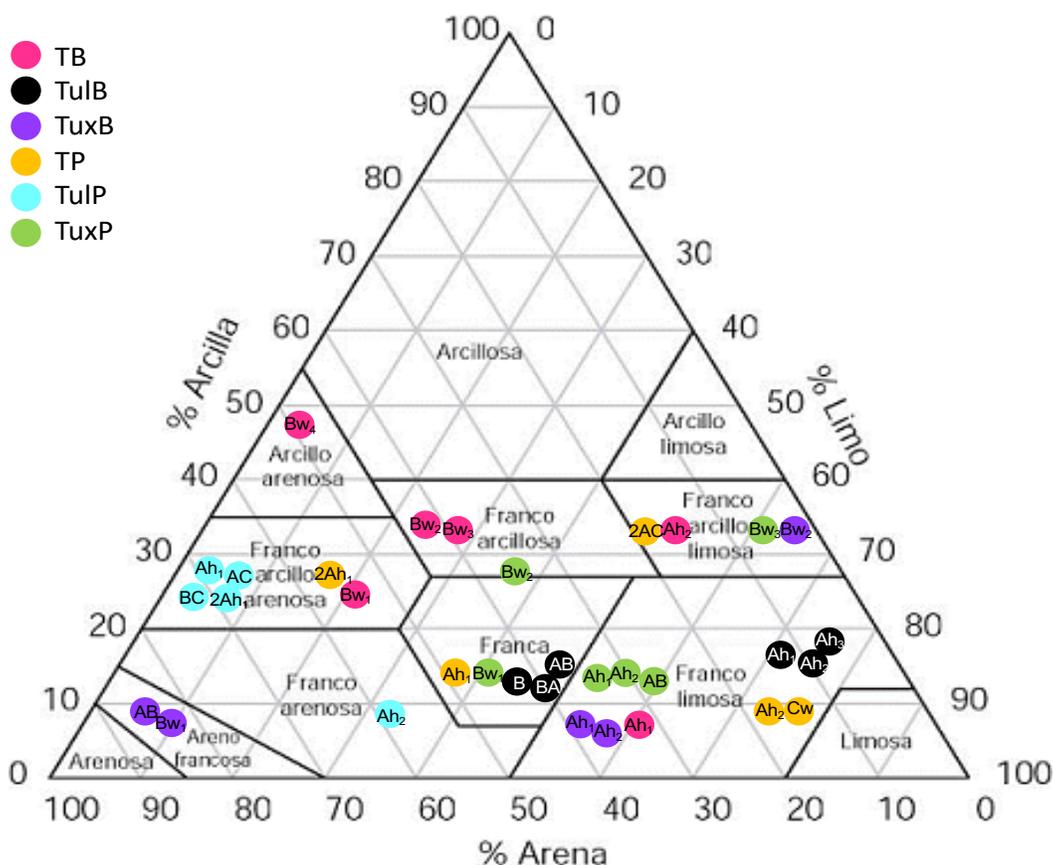


Figura 19. Triángulo de texturas (USDA), donde se ubican de forma representativa los horizontes evaluados en campo de cada perfil.

Existe una importante relación entre la porosidad, la textura y la estructura del suelo; ya que la disposición de las partículas determina la cantidad y naturaleza de los poros. Esto es imprescindible para realizar la evaluación edafocológica de cada perfil.

4.2.1 Evaluación edafocológica de los perfiles de suelo en los sitios de Bosque

En bosque, el mantillo se clasificó como tipo Mull, para los tres sitios; ya que los horizontes orgánicos del suelo son de espesores delgados y presentan rápidos procesos de descomposición de la hojarasca (Siebe, *et al.*, 2016). El EM promedio osciló entre los 3.5 y 4.3 cm.

La evaluación del volumen total de poros (VPT) para los sitios de bosque fueron, para TB en los dos primeros horizontes se encuentran en un porcentaje de 54% asignándole una evaluación de alta, para TulB con 46% es mediana y para TuxB alta al igual que TB (Fig. 20); lo que indica mayor presencia de poros y buena aireación con evaluación mediana, sobre todo en superficie para los tres sitios. El porcentaje de la Capacidad de Aireación (CA) es 8.5-10%, ya que también para esta propiedad influye la textura franca limosa predominante en los horizontes superficiales de los tres perfiles de suelo.

Para la capacidad de agua disponible (dCC), la textura fina del suelo determina el por que en los tres perfiles tenemos evaluaciones de dCC muy alta (Fig. 20), ésta muestra la capacidad que tiene un suelo de retener agua contra la gravedad y que puede ser absorbida por las plantas. La materia orgánica (MO) incorporada en el suelo juega un papel importante en la alteración y descomposición de los minerales del suelo, facilitando su desarrollo y permitiendo el suministro de agua disponible para las plantas, para TB su porcentaje de MO fue de 3%, para TulB de 3.8% y para TuxB de 2.9%, con evaluación media para los tres sitios.

Para los valores estimados de conductividad hidráulica (K_f (cm/día)) de cada uno de los perfiles, la velocidad para los sitios de TB y TuxB es alta; como se observa en la Figura 20; con un drenaje excesivo y una erosionabilidad media, mientras que para TulB la K_f es mediana con un drenaje excesivo y una erosionabilidad alta.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables (BI) son datos importantes para evaluar la fertilidad del suelo y la nutrición vegetal; de tal forma que, en suelos con alto contenido de materia orgánica y texturas francas, el complejo de intercambio es mayor; de modo que para TB su evaluación fue alta y para TulB y TuxB medianamente alta. Para la evaluación de la reserva de nitrógeno total, es muy alta en el sitio TB con una disponibilidad de 11.8 g/m^2 , para TulB es alta con 9.2 g/m^2 de N disponible y para TuxB, es alta con 8 g/m^2 disponible. Para los tres sitios la reserva de fósforo es muy alta (Fig. 20).

4.2.2 Evaluación edafocológica de los perfiles de suelo en los sitios de pastizal subalpino

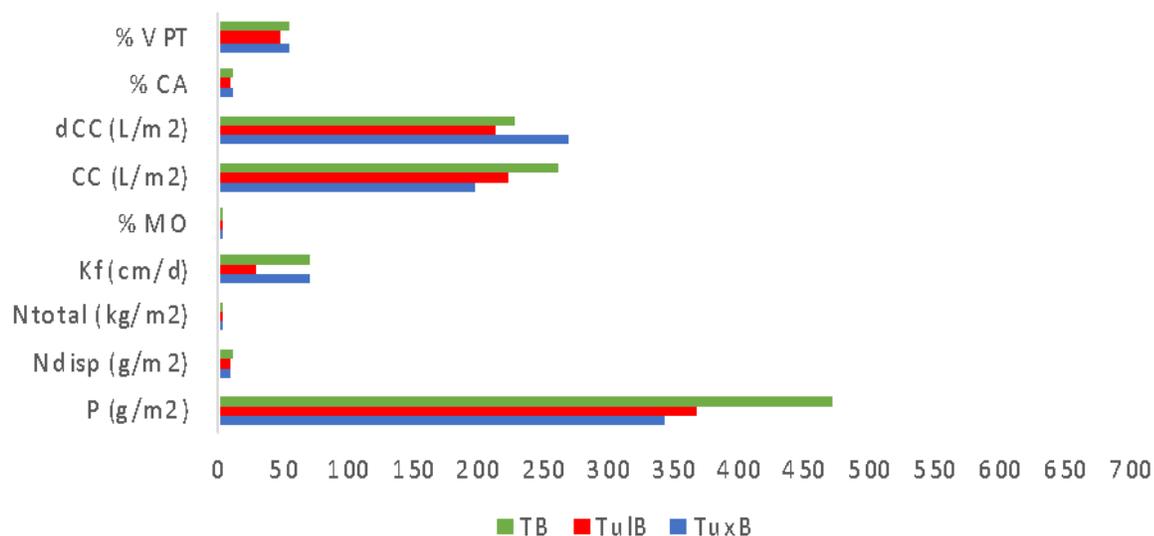
El mantillo también se clasificó como Mull para los tres sitios de pastizal, ya que además presenta una densidad de raíces muy alta y su EM se descompone por la mezcla del suelo mineral y la bioturbación. Su evaluación de VPT, para TP, sucede lo mismo que en los bosques, en donde los dos primeros horizontes se encuentran en un porcentaje entre 46 - 53% con evaluación de alta y mediana; para TulP el VPT es menor en los primeros horizontes (39% - 42%) siendo baja y mediana y para TuxP con 46 - 55% su evaluación es mediana y alta.

En cuanto a la CA para el sitio de TulP, su evaluación se encuentra en baja de 4.5%; mientras que para TP y TuxP es mediana de 8.5% - 9.5% (Fig. 20). En los tres sitios es difícil encontrar poros gruesos, pues en sus texturas predominan las partículas finas.

La evaluación de la capacidad de agua disponible (dCC) en los sitios de pastizal, fueron para TP muy alta con textura franca; para TulP alta con textura franco arcillo arenosa; y para TuxP con textura franco limosa una evaluación muy alta; teniendo baja CC en los tres sitios. La MO para TP fue de 3%, para TulP de 3.5% con evaluación media y presencia de lombrices como fauna edáfica; y para TuxP de 4%, con evaluación media alta.

Acorde a los valores estimados de Kf (cm/día) de los pastizales, sus evaluaciones fueron para TP muy alta y para TulP y TuxP esta propiedad disminuye y su evaluación es mediana; los tres sitios con un drenaje excesivo como se observa en la Figura 19. La evaluación de CIC y BI para TP fue medianamente alta, para TulP fue alta y para TuxP medianamente alta también. Para la evaluación de la reserva de nitrógeno total, es muy alta en el sitio TP con una disponibilidad de 16.18 g/m^2 , para TulP es muy alta con 11.6 g/m^2 de N disponible y para TuxP, es alta con 4.79 g/m^2 disponible. Para los tres sitios la reserva de fósforo es muy alta (Fig. 20).

Bosque



Pasto

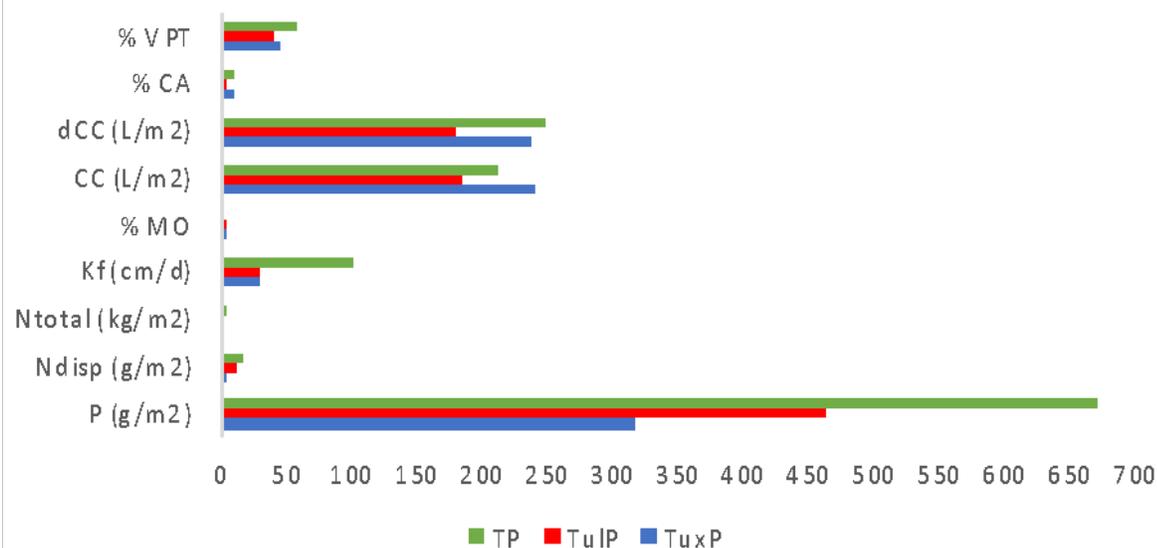


Figura 20. Variación de las diferentes propiedades del suelo consideradas en la evaluación edafocológica para cada uno de los tres sitios de bosque y pastizal. (VPT: Volumen total de poros, CA: Capacidad de Aireación, dCC: Capacidad de agua disponible, CC: Capacidad de campo, MO: Materia orgánica, Kf: conductividad hidráulica, Ntotal: Reserva de nitrógeno total, Ndisp: Nitrógeno disponible, P: Reserva de fósforo).

4.3 Infiltración y conductividad hidráulica saturada

Se obtuvieron gráficas de infiltración acumulada para cada uno de los sitios muestreados en bosque y pastizal de los 11 ensayos de infiltración para cada uno.

En las siguientes gráficas se pueden observar ejemplos de la fase transitoria y la fase estacionaria (Fig. 21), lo que indica que se alcanzó un flujo estable para cada caso, el cual fue necesario para calcular la Kfs.

Tomando en cuenta la clasificación de Landon (1984) retomada por Porta, *et al.* (1996), el valor promedio de infiltración los sitios de bosque y pastizal pertenecen a la clase 7 (muy rápida o excesiva infiltración) con valores independientes para cada sitio; a excepción de TuxP, cuyo valor es de 146 mm/h (± 116.9), que corresponde a la clase 6 (Rápida) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de Infiltración (*I*) correspondientes a los tipos de cobertura vegetal, en los tres sitios de estudio. Por sitio, se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.

	Sítio	Mín.	Máx.	Prom.	σ	% Cv
BOSQUE	Tiáloc (TB)	106.3	4323.6	1622.3	1402.3	86%
	Tulmiac (TulB)	93.1	1831.8	765.2	546.5	71%
	Tuxtepec (TuxB)	112.3	1944.9	501.8	511.9	102%
PASTIZAL	Tiáloc (TP)	164.0	569.5	370.7	134.7	36%
	Tulmiac (TulP)	404.9	7693.1	3290.0	2356.6	72%
	Tuxtepec (TuxP)	49.7	404.9	146.0	116.9	80%

Mín: Valor mínimo. *Máx:* Valor máximo. *Prom:* Promedio. σ : Desviación estándar.

% Cv: Porcentaje del coeficiente de variación.

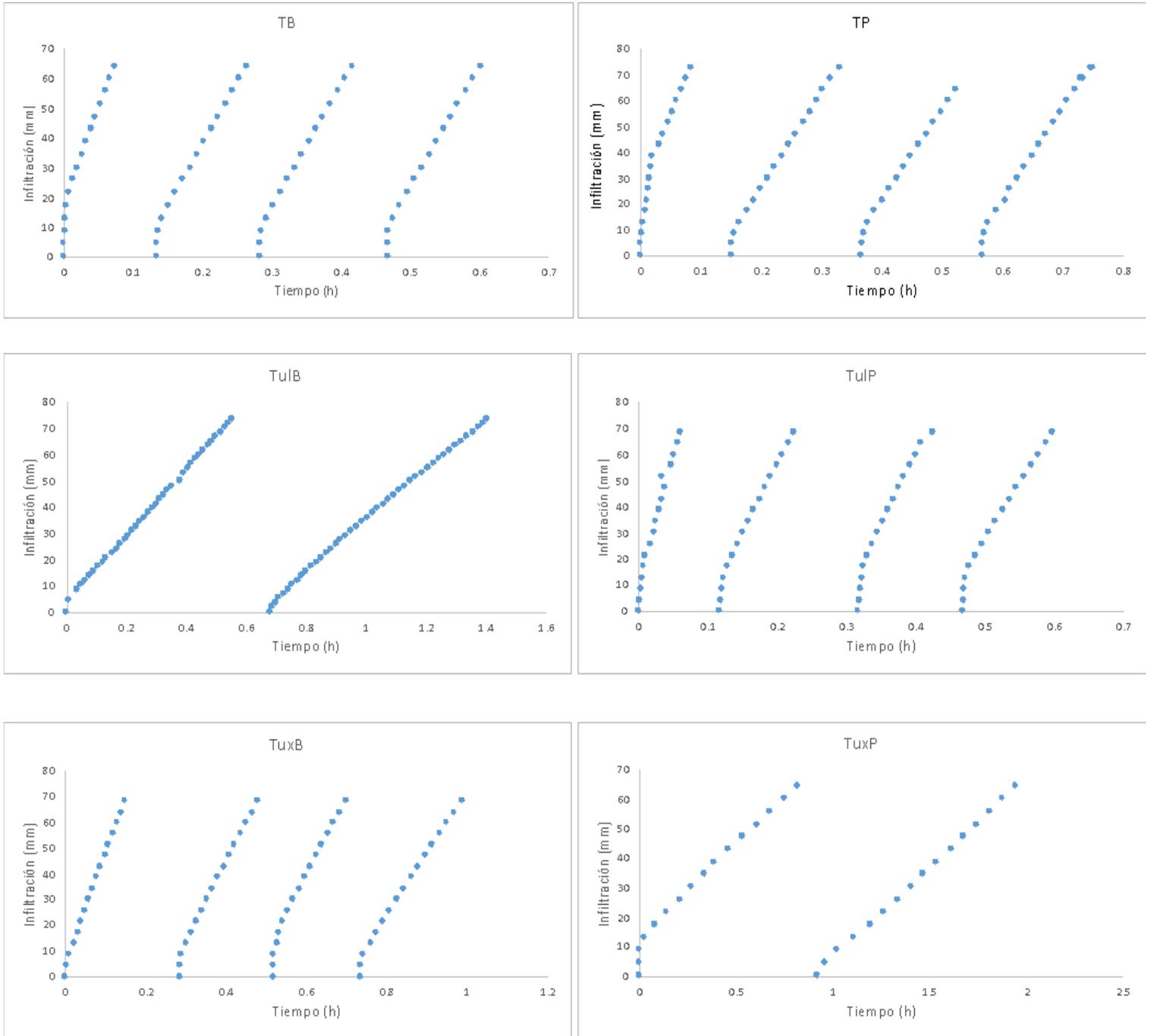


Figura 21. Ejemplos de las gráficas de infiltración acumulada en el bosque (TB) y pastizal (TP) de Tlálóc, en bosque (TuIB) y pastizal (TuIP) de Tulmiac y en bosque (TuxB) y pastizal (TuxP) de Tuxtepec. En el eje “x” se representa el tiempo (h) y en el eje “y” la columna de agua infiltrada (mm/h).

Los valores de Kfs determinados se transformaron a las unidades de $\mu\text{m/s}$ para compararlos con los valores de Kfs, según la clasificación del Soil Survey Manual de la USDA; los sitios TuxB ($45.5 \mu\text{m/s}$), TulB ($78 \mu\text{m/s}$), TP ($34.44 \mu\text{m/s}$) y TuxP ($14.44 \mu\text{m/s}$) corresponden a la clasificación **alta**, por otro lado TulP ($409.27 \mu\text{m/s}$) y TB ($166.58 \mu\text{m/s}$) tienen una conductividad **muy alta**.

Los valores de Kfs promedio para bosque, fueron TB de 599.7 mm/h (± 509.1), seguido de TulB con 280.8 mm/h (± 187.3) y TuxB con el menor valor de 163.8 mm/h (± 171.6). Mientras que para pastizales; fueron TP con 124.0 mm/h (± 35.6), TulP de 1473.4 mm/h (± 1054.8) y TuxP con el menor valor promedio de 52.0 mm/h (± 36.5) (Cuadro 3, Fig. 22).

Cuadro 3. Valores de conductividad hidráulica saturada (Kfs) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal. Se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.

	Sitio	Mín.	Máx.	Prom.	σ	% Cv
BOSQUE	Tláloc / Aclimeya (TB)	34.6	1523.6	599.7	509.1	80
	Tulmiac (TulB)	33.1	560.9	280.8	187.3	70
	Tuxtepec (TuxB)	34.8	665.4	163.8	171.6	100
PASTIZAL	Tláloc / Amoltepec (TP)	48.7	177.9	124.0	35.6	30
	Tulmiac (TulP)	228.3	3915.8	1473.4	1054.8	70
	Tuxtepec (TuxP)	17.8	138.9	52.0	36.5	70

Mín: Valor mínimo. *Máx:* Valor máximo. *Prom:* Promedio. σ : Desviación estándar. % Cv:

Porcentaje del coeficiente de variación.

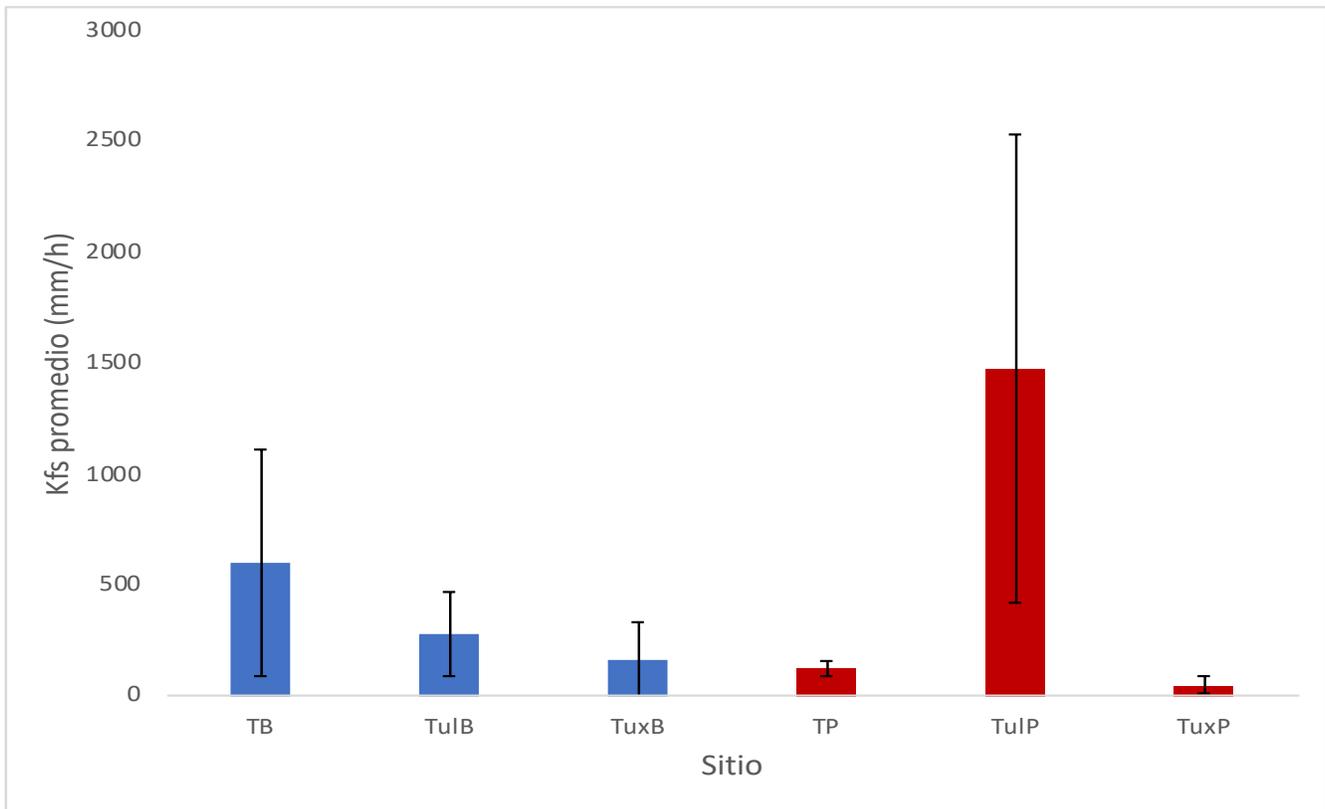


Figura 22. Gráfica de los valores promedio de Kfs (mm/h) por sitio y cobertura vegetal (azul: bosque y rojo: pastizal); las barras indican su error estándar.

4.4 Variación y diferencias entre la Kfs para cada cobertura vegetal y sitio estudiado.

Con el análisis exploratorio, en los boxplots podemos comparar la ubicación y las distribuciones de los datos alrededor de la mediana y la desviación estándar de la Kfs en el bosque y el pastizal (Fig. 23A) y también para cada sitio (Fig. 23B). La línea negra resaltada que corta las cajas nos muestra la localización de los valores de la mediana de la Kfs, los límites de los bigotes determinan los valores mínimo y máximo respectivamente de los promedios y los puntos fuera de los límites representan los valores atípicos de todas las mediciones de infiltración, en ambas gráficas se puede apreciar simultáneamente la tendencia y la dispersión asimétrica positiva además de los valores atípicos.

Considerando en conjunto los sitios de bosque y pastizal (Fig. 23A) se obtuvo que la Kfs es mayor en los sitios de pastizal que en bosque, aunque tenemos más valores atípicos, esto se debe a los valores máximos por ensayo de infiltración que se encuentran lejanos a los valores mínimos y máximos del promedio de la Kfs, es decir, en bosque hay dos valores atípicos correspondientes al sitio de Tlálloc y en pastizal hay tres valores atípicos para el sitio de Tulmiac.

También se realizó el análisis por sitio y se observa que el sitio de Tulmiac tiene una Kfs más alta que los otros dos sitios; los valores atípicos corresponden igualmente a los valores máximos de los ensayos de infiltración (Figura 23B). Para Tlálloc son dos ensayos de infiltración que se encuentran fuera de los valores mínimos y máximos del promedio, uno de 1295.7 mm/h y otro de 1523.6 mm/h; para Tulmiac hay un ensayo de 3915.8 mm/h y para Tuxtepec hay un ensayo de 655.4 mm/h (Apéndice 3, Cuadro 4).

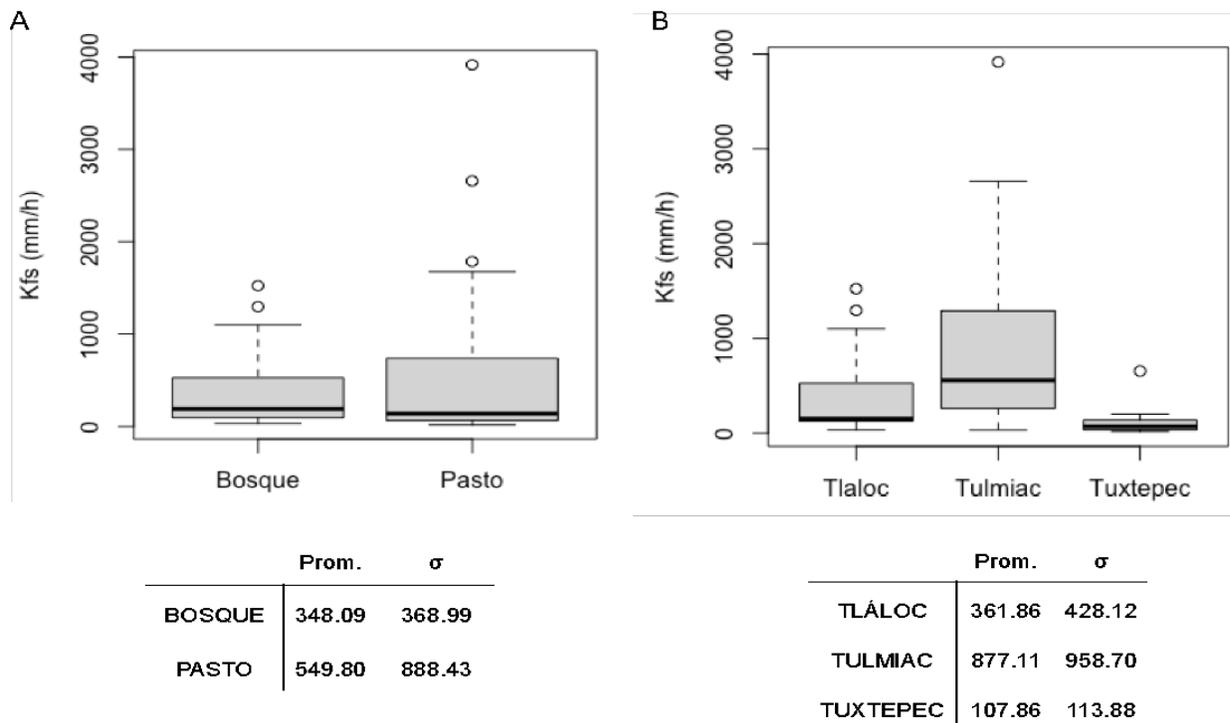


Figura 23. Diagramas boxplots de la mediana y desviación estándar de la Kfs obtenida por cobertura vegetal (A) y por sitio de muestreo (B).

Además, se realizó una Anova (Cuadro 5) para evaluar la diferencia de estas medianas de Kfs, en donde la Kfs no varía significativamente entre la cobertura, ya que el que sea pastizal o bosque no marca diferencias en la variable de respuesta, pero si entre sitios.

Cuadro 5. Anova para evaluar la diferencia de medianas de la Kfs entre sitios estudiados.

Residuales:	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-844.01	-259.62	-78.04	50.89	3038.69

Coefficientes:	Estimados	Error estándar	Estadístico t	P-Valores
(Intercepto)	361.9	130.3	2.777	0.00721 **
Sitio Tulmiac	515.2	184.3	2.796	0.00684 **
Sitio Tuxtepec	-254.0	184.3	-1.379	0.17291

Desviación típica de los errores estándar: 611.1 en 63 grados de libertad.
 Coef. de correlación múltiple: 0.2232, R cuadrado ajustado: 0.1985
 Estadística F: 9.05 en 2 y 63 GL, P-Valor: 0.0003508 **1% de significancia

Las diferencias entre sitios se vieron determinadas por una prueba de contrastes de post hoc Tukey. El sitio de Tulmiac es muy distinto de Tlálloc ($p = 0.01$) y de Tuxtepec ($p = 0.0002$), pero estos últimos no presentan gran variación entre ellos puesto que no hay una diferencia estadísticamente significativa de Kfs ($p = 0.35$) (Apéndice 3, Cuadro 6).

4.5 Propiedades físicas del suelo

Para cada sitio y cobertura vegetal se determinó la densidad aparente (g/cm^3), el contenido de humedad inicial y final (%) y el espesor del mantillo (cm), en el área donde se realizaron las mediciones de I y Kfs.

Densidad aparente

El promedio de la densidad aparente en bosque es TB $0.34 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.07)$, TuIB $0.55 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.14)$ y TuxB $0.49 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.10)$; mientras que para los pastizales TP $0.44 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.02)$, TuIP $0.50 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.11)$ y TuxP $0.67 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.05)$ (Apéndice 3, Cuadro 7).

Los valores promedio de la densidad aparente en bosque es 0.46 g/cm^3 y para pastizales 0.53 g/cm^3 ; según lo reportado en la literatura para suelos de origen volcánico de Shoji, *et al.* (1993), ambas coberturas vegetales entran en el intervalo de $0.4 - 0.8 \text{ g/cm}^3$.

Humedad antecedente y final

El contenido de humedad inicial promedio ($H_i\%$) más bajo para los bosques se observó en TB con $25\% (\pm 8.61)$, seguido por TulB con $25\% (\pm 5.85)$ y TuxB con $31\% (\pm 6.16)$. Y para los pastizales el más bajo fue TP con el $6\% (\pm 1.24)$, seguido de TuxP $35\% (\pm 1.71)$ y por último TulP con el valor más alto de $56\% (\pm 4.41)$.

Para el contenido de humedad final promedio ($H_f\%$) los valores fueron para bosque, TB de $56\% (\pm 10.72)$, TulB de $54\% (\pm 11.51)$ y TuxB de $60\% (\pm 6.26)$ y para pastizal TP de $58\% (\pm 5.89)$, TulP de $73\% (\pm 9.57)$ y TuxP de $63\% (\pm 11.29)$ (Apéndice 3, Cuadro 7).

Espesor del Mantillo (EM)

Los valores promedio del espesor de mantillo medido en campo fue variable; para bosque fueron TB con $3.5 \text{ cm} (\pm 1.6)$, TulB con $4.1 \text{ cm} (\pm 2.1)$ y TuxB con $4.3 \text{ cm} (\pm 1.6)$ y para los sitios de pastizal TP con $0.5 \text{ cm} (\pm 0.6)$, TulP con $9 \text{ cm} (\pm 2.6)$ y TuxP con $1.1 \text{ cm} (\pm 0.3)$ (Apéndice 3, Cuadro 7).

Para los sitios de Tláloc en bosque y pastizal el desarrollo del horizonte orgánico resulta ser mínimo, como consecuencia de incendios previos a la toma de mediciones en bosque y pastizal; mientras que para el sitio de pastizal del Tulmiac (TulP), este desarrollo fue mayor aunado a una gran cantidad de EM, su humedad inicial y la fauna edáfica (lombrices) en el sitio.

4.6 Relación de las propiedades físicas del suelo y la Kfs para cada cobertura vegetal estudiada.

Se realizó un análisis exploratorio para cada propiedad física, sitio y cobertura vegetal y partir de este modelo se dedujeron las variables que explican significativamente la variación de la Kfs.

Los valores de densidad aparente, se sitúan dentro de los límites de la mediana, teniendo mayor variedad de densidades en ambas coberturas en el sitio de Tulmiac (Fig. 24).

Para la humedad inicial, los valores atípicos corresponden a los valores mínimos y máximos de los ensayos de infiltración; en este caso para el bosque de Tulmiac (TulB) presenta cuatro valores atípicos correspondientes a dos ensayos de infiltración con %Hi mínima de 21.5% y 23.2% y a dos ensayos con %Hi máxima de 40.9% y 41.3% (Apéndice 3, Cuadro 8). Para todos los demás sitios los porcentajes de Hi se sitúan cercanos o dentro de los límites de la mediana, teniendo mayor variación de porcentaje de humedades en el sitio del bosque de Tláloc (TB).

Por otro lado, para los valores del espesor de mantillo se observa, que para TB y TuxB, estos se encuentran dentro de los límites de la mediana, teniendo baja variación (Fig. 24). Hay una mayor cantidad de valores atípicos; para TulB hay un ensayo con 9 cm de espesor, para TP un ensayo con 2 cm, para TulP uno de 15 cm, y para TuxP uno de 2 cm (Apéndice 3, Cuadro 8).

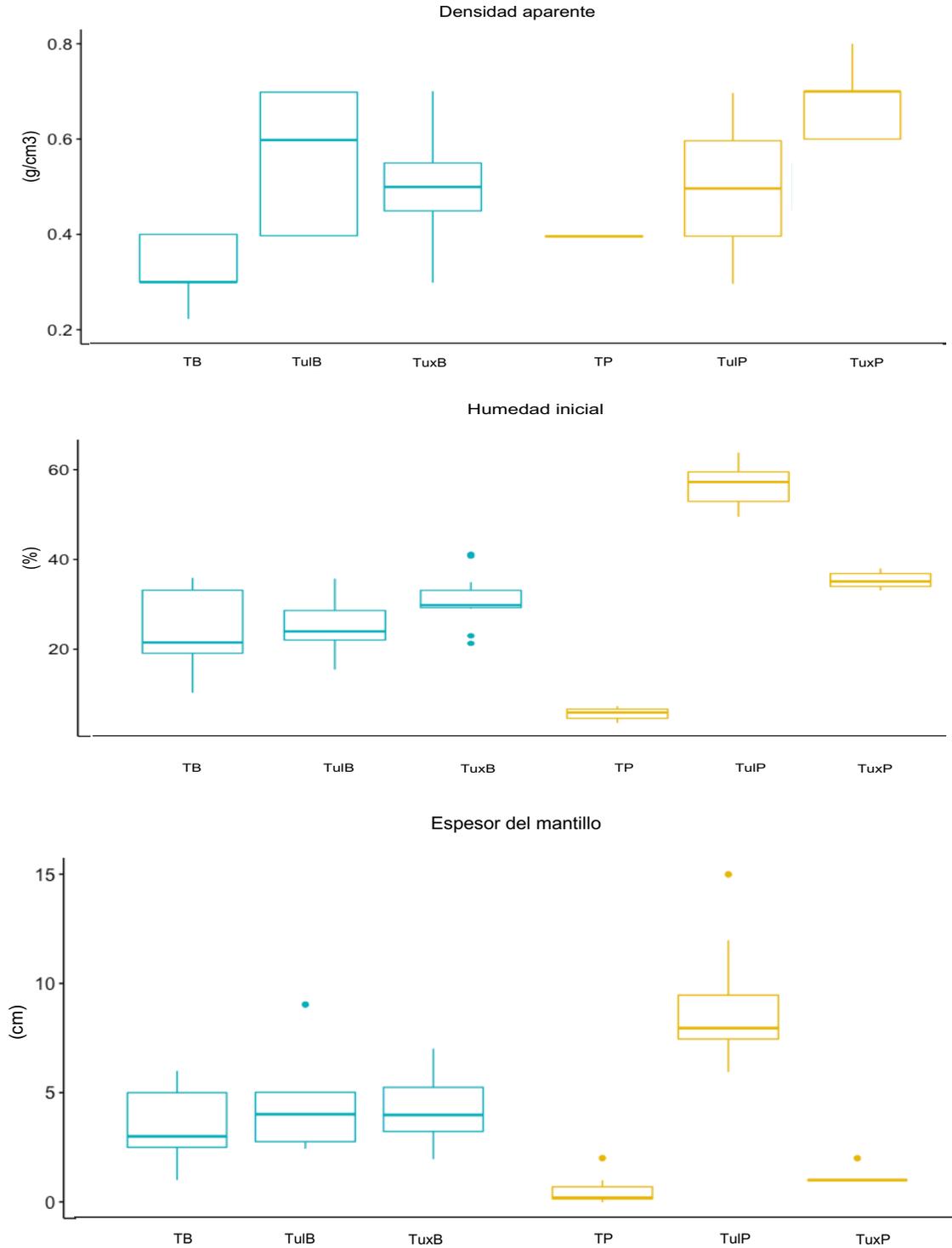


Figura 24. Diagramas boxplots de la variación de densidad aparente (ρ_b), contenido de humedad inicial (%Hi), y espesor de mantillo (EM) respectiva a su cobertura vegetal (Bosque: azul y Pastizales: amarillo) y sitios de muestreo.

Para establecer la relación de la Kfs con las propiedades del suelo, la Kfs se transformó a logaritmo natural (Kfs_{\log}) ($W = 0.97203$; $p = 0.1414$) mostrando una distribución normal. Se determinó que el modelo de mínimos adecuado que explica de forma significativa la variación de la Kfs esta dado por el sitio y el espesor del mantillo, ya que el resto de las variables no agregan un valor explicativo como tal a la variación que presentó la Kfs. El modelo final obtenido es:

$$Kfs \sim \text{Sitio} + EM + USO + \varepsilon$$

La crítica al modelo indica que las variables de respuesta están relacionadas con las predictoras, donde los residuales tienden a una distribución normal (Fig. 25), los puntos 20, 2 y 32 se desvían un poco pero no es determinante su influencia, puesto que no están muy alejados; estos residuos se comportan normalmente, es decir, los datos cumplen el supuesto de homocedasticidad a pesar de los puntos influyentes con efecto palanca como el 20 14 y 47, que tienen un valor muy alto de residuo asociado pero no distorsionan las estimaciones de los parámetros analizados.

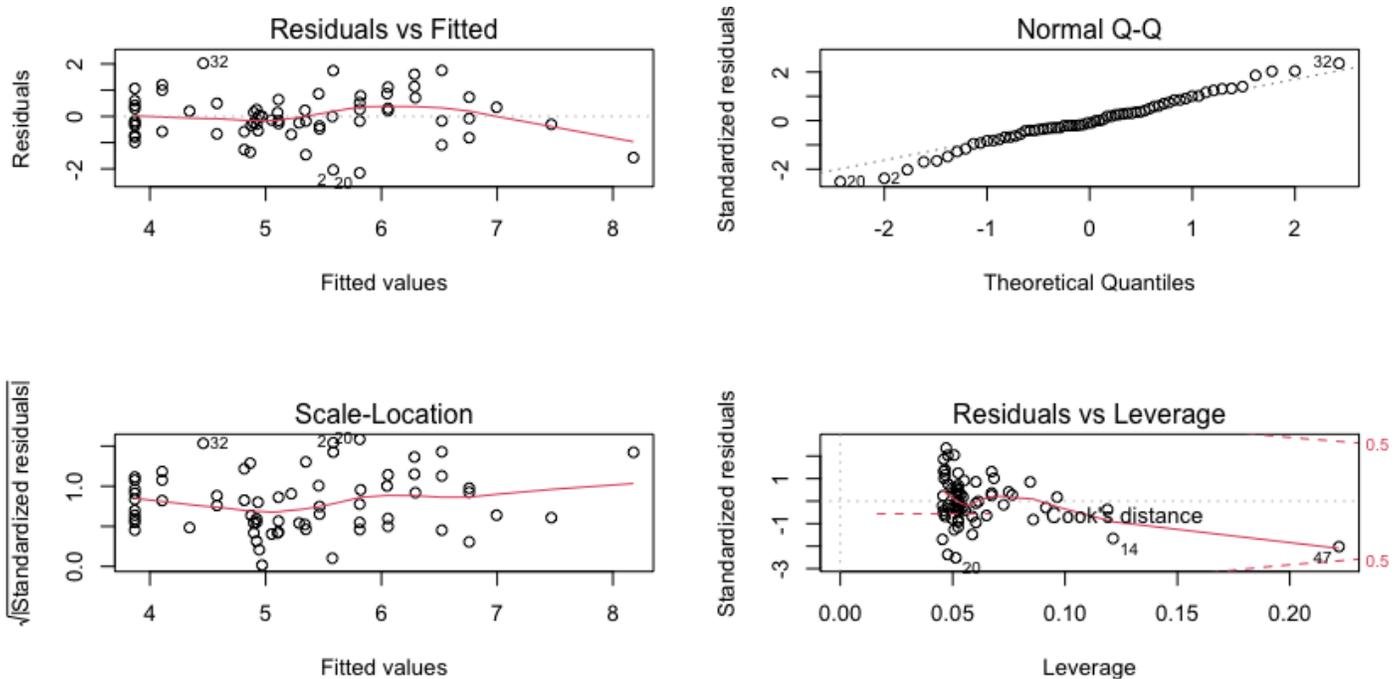


Figura 25. Crítica del modelo de la Ancova entre EM y la Kfs

En el modelo de regresión entre el EM y la Kfs_{log} se muestra gráficamente el modelo estudiado para cada sitio, estando sombreados los intervalos de confianza de cada regresión (Fig. 26).

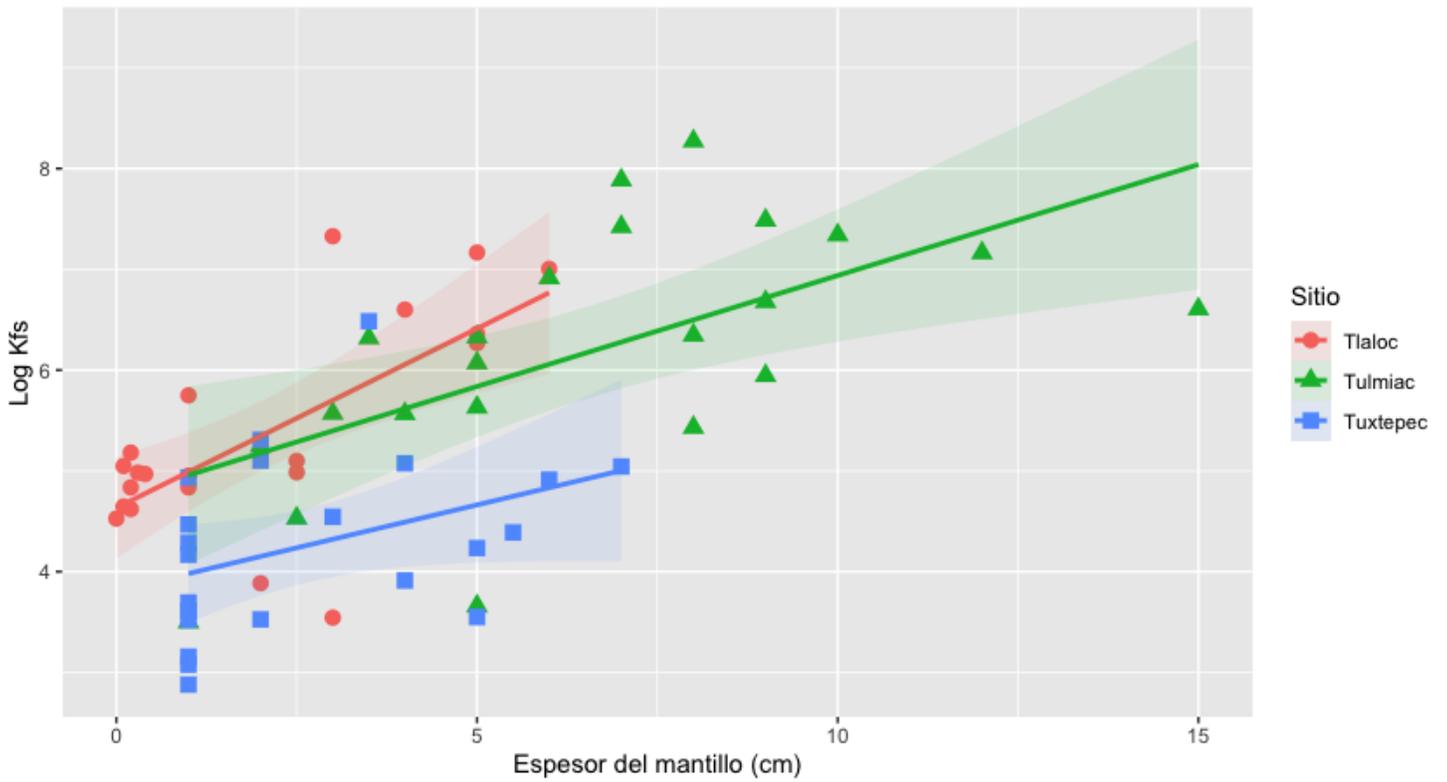


Figura 26. Modelo del comportamiento de las líneas de regresión entre el EM y la Kfs en los tres sitios de estudio.

5. Discusión

En este estudio las hipótesis planteadas fueron que el bosque tiene mayor capacidad que el pastizal para infiltrar y conducir el agua, debido al espacio poroso que presenta en los horizontes superficiales.

Cabe mencionar que se demostró que no hay diferencias estadísticamente significativas de la Kfs entre bosque y pastizal, pero si entre los sitios; aunque ambas coberturas vegetales proporcionan buenas condiciones para la captación de agua. Considerando así mismo, la importancia de las características físicas del suelo, como variables que influyen en la Kfs, dentro de los sitios y coberturas vegetales estudiadas, se discuten diferentes apartados de acuerdo a los resultados y particularidades previamente obtenidos para sustentar estas hipótesis.

5.1 Caracterización y evaluación edafocológica

Todos los perfiles estudiados son muy profundos (<140 cm) y se debe a la deposición de la caída intermitente de cenizas y el rejuvenecimiento del suelo (Shoji, *et al.*, 1988 y Lizcano, *et al.*, 2006). No se determinó la clasificación de suelos con base en la WRB (2014), asumiendo que los suelos de los sitios de estudio se encuentran dentro de la categoría de los Andosoles, tomando como referencia el trabajo de Peña-Ramírez (2013). En este trabajo no se realizó la clasificación completa de los perfiles de suelo debido a falta de información requerida por la WRB, ya que para dicha clasificación es necesario contar con datos de la relación $Al+1/2Fe$, índice melánico y fósforo retenido, datos que no se determinaron en este trabajo.

Para los sitios de bosque, las texturas del suelo se clasifican como franco limoso a franco arcilloso y para pastizales fueron francas a franco arcillo arenosa; la textura juega un papel importante, pues la dCC (capacidad de agua disponible) se incrementa cuando la textura es más fina, mientras que los suelos de textura gruesa

tienen una menor capacidad de campo. En general, todos los sitios estudiados se situaron sobre suelo de conservación de origen volcánico de edades jóvenes a intermedias (1,830-8,000 A.P., correspondientes a los conos Chichinautzin, Tláloc y Cuauhtzin ubicados cerca de los sitios de estudio (Peña-Ramírez, *et al.*, 2009); estas influyen en la velocidad de intemperismo de las cenizas volcánicas y en los cambios pedológicos del suelo (Peña-Ramírez, 2013); todos los perfiles de suelo presentan un color de negro a café-marrón amarillento oscuro y una densidad aparente baja, que podría deberse a que los suelos presentan alto contenido de alófono (Shoji, *et al.*, 1993) y grandes cantidades de MO contribuyendo así al desarrollo de las plantas (Brady y Weil, 1999), componente determinante de la calidad del suelo (Galicia, *et al.*, 2016).

La distribución de raíces es alta en general para los sitios de bosque y pastizal; sin embargo, en el sitio del bosque de Tulmiac (TulB) existe presencia de hifas, estando relacionada a un exceso de humedad en el suelo. Las raíces, provocan que se formen espacios porosos que generan las estructuras radicales de las plantas y ya que el suelo tiene presencia de alofano; también ayuda a tener una mejor CA; un buen aporte de aire es esencial para el buen crecimiento radical y puede tener profundos efectos en la calidad de sitio. Para el pastizal de Tulmiac (TulP) su dCC podría presentar menor porcentaje de poros debido a su textura franco arcillo arenosa y la cantidad de MO. Según Peña-Ramírez (2013) la dCC es la propiedad que se ve directamente ligada a la buena calidad de los sitios bajo cobertura de bosque de pino. Por otro lado, el VPT también está relacionado con la penetrabilidad de las raíces en capas inferiores y la capacidad de infiltración de agua en el suelo, está última relacionada con la baja densidad aparente presente en estos sitios.

En el estudio de Ferreira (2008), contempla la evaluación de los suelos en el volcán Tláloc, Milpa Alta, CDMX, en donde analizó 7 perfiles correspondientes a distintas Unidades Geomorfológicas Morfogenéticas (UGM). Las propiedades físico-químicas del suelo de los perfiles 1, 2 y 3 fueron clasificados como Andosoles, con una vegetación conformada por bosque de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* en

asociación con pastizal de los géneros *Festuca sp.* y *Muhlenbergia sp.* Estos sitios, presentaron altos contenidos de MO como producto de la descomposición de la vegetación arbórea y sus condiciones ambientales contribuyendo al desarrollo de la fauna edáfica, aportando una gran cantidad de humus al suelo. También presentan alta CIC, atribuibles al alto contenido de humedad, bajos valores de pH y alófono. El P disponible es bajo en los tres perfiles. Los resultados son similares a los de este trabajo en donde se atribuye a la misma unidad edáfica y vegetación; además del alto contenido de MO en sitios de bosque y pastizal, medio-alto CIC y alto contenido de P.

5.2 Valores promedio de la I y Kfs para bosque y pastizal de los sitios estudiados.

Los suelos de estos bosques son de origen volcánico y a diferencia de otros suelos se caracterizan por su alta capacidad de retención de humedad y almacenamiento de agua, lo cual a su vez determina la dinámica del agua a nivel superficial y subsuperficial (Tobón, *et al.*, 2000; Tobón, *et al.*, 2010; Gonzáles-Barrios, *et al.*, 2011).

Cuadro 9. Comparación de la evaluación de la I y la Kfs de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal; de acuerdo a diferentes autores y determinaciones.

	Sitio	INFILTRACIÓN Landon (1984)	I Promedio mm/h (el presente trabajo)	Kfs USDA (2008)	Kf Siebe, <i>et al.</i> (2016)	Kfs Promedio mm/h (el presente trabajo)
BOSQUE	Tláloc / Aclimeya (TB)	Muy rápida o excesiva infiltración	1622.3	Muy alta	Alta	599.7
	Tulmiac (TuIB)	Muy rápida o excesiva infiltración	765.2	Alta	Mediana	280.8
	Tuxtepec (TuxB)	Muy rápida o excesiva infiltración	501.8	Alta	Alta	163.8
PASTIZAL	Tláloc / Amoltepec (TP)	Muy rápida o excesiva infiltración	370.7	Alta	Muy alta	124.0
	Tulmiac (TuIP)	Muy rápida o excesiva infiltración	3290.0	Muy alta	Mediana	1473.4
	Tuxtepec (TuxP)	Rápida	146.0	Alta	Mediana	52.0

I: Infiltración. Kfs: Conductividad hidráulica saturada en campo.
Kf: Conductividad hidráulica.

Un factor muy importante es la vegetación ya que incrementa la capacidad de infiltración de los suelos (Morgan, *et al.*, 1997). Los valores de I promedio y su evaluación en el presente estudio (Cuadro 9) pueden ser comparados con los datos de Harden y Scruggs (2003) que con un infiltrómetro de anillo sencillo, encontraron en las montañas de los Andes, Ecuador un rango de infiltración de 6 a 206 mm/h, sin embargo en México, en bosque de oyamel del Parque Nacional el Chico, Hidalgo, Ángeles-Cervantes (2010) registró la mayor tasa de infiltración con un infiltrómetro de doble anillo de 194.2 mm/h (± 134.87) para un bosque no afectado por incendio; la I de los Andes y de Hidalgo son similares al TuxP de clase 6 (rápida). Castro-Alonso (2009) y Mora, *et al.* (2011) en el Parque Nacional Izta-Popo reportaron una infiltración superficial de 972 y 360 mm/h respectivamente; González-Vargas (2011) encontró en el Parque Nacional Desierto de los Leones una infiltración de 2240 mm/h (± 454), los valores promedio reportados por Marín-Castro (2010) en bosque mesófilo de montaña en Coatepec, Veracruz para bosque maduro (1352.01 ± 988 mm/h), bosque secundario (1140.20 ± 1003 mm/h) y un pastizal (0.93 ± 1 mm/h) corresponden a la clase 7 (muy rápida o excesiva infiltración) según Landon (1984) a excepción del pastizal perteneciente a la clase 2 (lenta) y finalmente el estudio de Hernández-Ordoñez (2014), que utilizó el permeámetro Guelph, en Villa del Carbón, EdoMex, reportó valores de I para tres sitios; una zona erosionada con bosque (5292 ± 2520 mm/h), el Cerro de la Bufa con bosque (2672 ± 1518 mm/h) y en la Presa del Llano con formación de río (17200 ± 11793 mm/h) correspondientes a una excesiva infiltración de agua.

Para la Kfs y su evaluación (Cuadro 9) en Andosoles se presentan diferentes valores; en las Islas Canarias, España Rodríguez, *et al.* (2002) reportan un valor de 168 mm/h, Poulenard, *et al.* (2001) en los páramos ecuatorianos, mediante eventos simulados de lluvia indican valores entre 60-70 mm/h y en Isla Azores, Portugal sus valores de Kfs fueron de 62.66 mm/h en suelo Andosol Férrico y de 42.95 mm/h en un Andosol Háplico (Fontes, *et al.*, 2004). En Andosoles de México también se han reportado diferentes valores de Kfs por ejemplo Marín-Castro (2010) empleando el

mismo equipo utilizado en este trabajo, en bosque mesófilo de montaña en Coatepec, Veracruz; en bosque maduro (777.29 ± 930.61 mm/h) y en bosque secundario (614.53 ± 690.31 mm/h), comparado con un pastizal (0.41 ± 0.35 mm/h); en el presente trabajo los valores encontrados en TB fueron similares a los del bosque secundario y TuxP similar al del pastizal. En Andosoles con bosque de oyamel, Ángeles Cervantes (2010) registró un valor de 176.04 mm/h (± 136.44) para un bosque no afectado por incendio y de 0.18 mm/h (± 3.96) para un bosque con un incendio superficial previo y por último en el estudio de Gómez-Tagle, *et al.* (2008), también utilizaron un infiltrómetro de anillo sencillo y carga constante, en Cuitzeo, Michoacán; y registraron promedios de Kfs para suelos de origen volcánico, en bosque de pino-encino cerrado de 1578.55 mm/h (± 1576.78), para una parcela abandonada con individuos jóvenes de *Pinus spp.* y *Crataegus pubescens* de 99.72 mm/h (± 92.02) y un agostadero que es un sitio con presencia de gramíneas y herbáceas (pastizal) con valores de 378.94 mm/h (± 465.97); este último presentando un valor alto de Kfs muy parecido a los sitios de bosque de la Sierra del Chichinautzin.

La variación de la Kfs entre los diferentes autores puede deberse a la heterogeneidad de los suelos (Gómez-Tagle, 2008) a pesar de que éstos correspondan a la misma unidad. Esto significa que es necesario conocer las propiedades hídricas y edáficas en cada sistema. Uno de los factores que pueden afectar fuertemente la I y la Kfs es la vegetación con la gran emisión de raíces de diferente tamaño y forma, debido a los flujos preferenciales, así como la actividad de la fauna edáfica, la textura del suelo, su estructura y la densidad aparente; es importante considerar que los valores de conductividad hidráulica saturada podrían estar subestimados por estas razones.

Este trabajo no contempló el análisis de densidad de raíces en los puntos donde se realizaron los ensayos de infiltración, pero fue evidente la abundancia de raíces en los puntos donde se insertó el anillo, al realizar las mediciones de infiltración y en la caracterización de cada uno de los perfiles en bosque y pastizal, principalmente

hasta el tercer horizonte respectivamente. La formación de macroporos construidos por las raíces y la fauna del suelo en los sitios de bosque favorecen los flujos preferenciales en contraste con la compactación que hay en los pastizales (Titus and del Moral, 1998; Corti, *et al.*, 2002; Clothier, *et al.*, 2008; Marín-Castro, 2010 y Benegas, *et al.*, 2014). En este estudio, la excepción es el sitio TulP (1473.4 ± 1054.8 mm/h), que presenta pastos altos con influencia de pino y cercano a cultivos, donde fue evidente la alta infiltración en los puntos de medición, atribuido a que las raíces de pino fracturan el suelo compactado, provocando efectos alelopáticos sobre el zacatonal ocasionando su mortalidad. Las raíces muertas de los pastizales incrementan la MO, la fauna edáfica y la generación de espacios porosos; en conjunto generan una mejor estructura del suelo, permitiendo una mayor conductividad hidráulica y una mayor retención de humedad (Capowiez Y., *et al.*, 2009; Yao S., *et al.*, 2009 y Zarea M. J., *et al.*, 2009); este sitio también se encuentra cerca al manantial y río subterráneo de Tulmiac. El estudio de Hernández-Ordoñez (2014), reportó valores de Kfs para la zona erosionada con bosque de (180 mm/h (± 288), para el Cerro de la Bufa con bosque de 248 mm/h (± 166) y en la Presa del Llano con formación de río de 1991 mm/h (± 1426); este último valor resultando muy alto similar para el sitio de TulP.

Las evaluaciones de Kf descritas con base en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo de Siebe, *et al.* (2016) se determinaron de forma vertical por horizonte; para bosques fue TB de alta a baja, TulB de mediana a alta y TuxB se mantuvo en alta, mientras que la evaluación para pastizales fueron TP de muy alta a mediana y TulP y TuxP se mantuvieron en mediana. Por ejemplo, Tobón, *et al.* (2010) al norte de Costa Rica midieron la Kfs utilizando tres instrumentos (permeámetro de Guelph, infiltrómetro de tensión y método del núcleo) en un bosque tropical y un pastizal, caracterizados por ser Andosoles (Soil Taxonomy, 2014). Sus resultados mostraron que la conductividad hidráulica promedio a nivel superficial para bosque fue bastante alta (714 mm/h); comparada con el pastizal (243 mm/h); los autores observaron que la permeabilidad del suelo

disminuyó conforme aumentaba la profundidad de los horizontes, notando que los cambios más drásticos se llevan a cabo sobre los primeros horizontes.

Los incendios provocan que el suelo quede más expuesto al sol ocasionando la deshidratación de los minerales, los cuales pierden volumen y con la MO se genera una emisión de aceites, resinas y de sustancias hidrófobas, lo que ocasionan en el suelo una reducción en la capacidad de absorción de humedad de los agregados (Campos, *et al.* 2001). En este caso, TB se pudiera ver afectado por el previo incendio superficial que presentó; ya que reduce la conductividad hidráulica y causa un aumento en el potencial de flujo mátrico debido a la formación de sustancias hidrófobas en el suelo (Imeson, *et al.*, 1992) formándose una capa discreta de espesor y continuidad variable sobre la superficie del suelo (Buczko, *et al.*, 2006), esto también puede atribuirse a que los incendios cuando alcanzan temperaturas mayores a 220°C, generan compactación de suelo, disminuyen los macroporos y aumenta el porcentaje de microporos; por tanto aumenta también la retención de humedad según Rab (1996); aunque la infiltración de agua puede llegar a ser rápida al inicio, debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre los sólidos del suelo y el agua, y extremadamente lenta o nula después de cierto tiempo (Jaramillo, 2004). Sin embargo, la tasa de infiltración parece no ser afectada por incendios en el sitio del Tláloc; se considera que las temperaturas alcanzadas no fueron suficientes para alterar la estructura del suelo (Parks y Kundy, 1989; Kutiel e Inbar, 1993) ni su capacidad para infiltrar y conducir agua.

El cambio o modificación de la cobertura vegetal, es un factor importante que a través de quemas, genera zonas de pastizal (Challenger 1998; Rzedowski 2001), en estas zonas la Kfs presenta valores mínimos, nulos o negativos, lo que indica problemas de drenaje y de infiltración del agua (Reynolds y Elrick 1985); tal es el caso del estudio de Castro-Alonso (2009) en suelos Andosoles en la zona de Amecameca, México; en donde reporta valores de Kfs promedio para bosque de pino de 489.6 (\pm 637.92 mm/h) afectado por un incendio superficial, similar al

bosque de Tulmiac (TulB); mientras que para su sitio de pradera (pastizal inducido) el valor de la Kfs resultó negativo; indicando problemas de drenaje.

La importancia de los suelos Andosoles en la Sierra del Chichinautzin, es que son zona de recarga natural de los mantos freáticos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), debido a su alta permeabilidad y a las rocas de basalto. Esta fuente de agua se deriva principalmente de las precipitaciones infiltradas en el suelo y el escurrimiento superficial de las montañas y cerros a su alrededor, generando así manantiales a piedemonte de los volcanes (National Research Council, 1995).

5.3 Relación de las propiedades físicas del suelo para cada cobertura vegetal y sitio.

Las propiedades físicas de los suelos determinan su estructura, la facilidad de penetración de raíces, la textura, su capacidad de infiltrar y conducir el agua, el almacenamiento de agua y la retención de nutrientes (Porta, *et al.*, 2003). Es importante señalar que las muestras para determinar cada una de las propiedades de ρ_b , %Hi, %Hf y EM fueron tomadas en diferentes días, esto conforme se realizaron los ensayos de infiltración. En este trabajo se evaluaron algunas características edáficas *in situ* de las coberturas estudiadas a nivel superficial en el suelo.

Los Andosoles presentan, en la mayoría de los casos, bajos valores de densidad aparente, los cuales encontramos en todos los sitios de estudio y que es una característica propia de estos suelos. Los valores promedio de la densidad aparente en bosque fue menor que en el pastizal; según lo reportado en la literatura para suelos de origen volcánico de Shoji, *et al.* (1993), ambas coberturas vegetales entran en el intervalo de 0.4–0.8 g/cm³; el factor principal responsable de la baja densidad aparente en los Andosoles es el desarrollo de la estructura porosa del suelo. Hernández-Ordoñez (2014), reportó valores de ρ_b para la zona erosionada con bosque de 1.52 g/cm³ que se encuentra por arriba para suelos Andosoles, para

el Cerro de la Bufa con bosque de 0.58 g/cm^3 y en la Presa del Llano con formación de río de 0.61 g/cm^3 ; Ángeles Cervantes (2010) registró un valor de 0.81 g/cm^3 para un bosque no afectado por incendio y de 0.66 g/cm^3 para un bosque con un incendio superficial previo; ambos reportando valores muy similares a los de este estudio.

Los valores de humedad sólo son útiles como antecedentes de la condición de humedad que tiene el suelo antes de los ensayos de infiltración y no permite hacer una comparación precisa entre sitios, pero sí entre coberturas. Los valores de %Hi en promedio para bosque es de 27% y para pastizal 32%. Sin embargo, para los valores de %Hf en promedio para bosque fueron de 57% y para pastizal de 65% influyendo su capacidad del suelo ante la retención del agua. Las diferencias de promedios en la humedad pueden estar dados por dos razones: la primera es que puede deberse a la época del año y a las condiciones meteorológicas de los días en que se tomaron las mediciones (abril-mayo / agosto-septiembre) y la segunda razón es que la cantidad de MO que presenta cada sitio fue muy representativa; aunque fue variable debido a la frecuencia de incendios previos; para ello, es probable que el EM no sea un reflejo real del desarrollo natural en sitios como el Tlálloc, pero para el pastizal de Tulmiac (TuLP) el EM tuvo 9 cm en promedio (± 2.6); esto se puede atribuir a que las raíces de pino fracturan el suelo, ocasionando la muerte de raíces de algunos pastos, incrementando la cantidad de microporos y la MO, permitiendo así mayor retención de humedad; la cubierta de los pastizales puede promover una mayor evaporación de agua en la capa superficial (Shoji y Nanzyo, 1993; Capowiez Y., *et al.*, 2009; Yao S., *et al.*, 2009 y Zarea M. J., *et al.*, 2009). Para los sitios de Hernández-Ordoñez (2014), obtuvo valores de humedad para la zona erosionada con bosque de 16%, para el Cerro de la Bufa con bosque de 33% y en la Presa del Llano con formación de río de 64% y Ángeles Cervantes (2010) obtuvo valores de humedad relativa de 60% para el bosque no afectado por el incendio y de 56.68% para el bosque con un incendio superficial previo.

En los Andosoles la capacidad de retención de humedad se va perdiendo de manera irreversible cuando la superficie está expuesta o cuando es sometida a incendios

forestales (Wada, 1980). La retención de humedad puede alcanzar hasta 200% (FAO-ISRIC-ISSS, 1994), por lo que la MO, la textura y la estructura que presentan los suelos conservados con laderas y fuertes pendientes cercanas a la formación de un cuerpo de agua confiere una alta capacidad retención de agua, tal sería el caso del sitio de TulP.

5.4 Relación de las propiedades físicas del suelo y la Kfs

Es importante señalar que se exploró la relación que existe entre la conductividad hidráulica y algunas variables físicas.

Independientemente que todos los sitios hayan obtenido valores de ρ_b bajos; esto nos indica que entre menor sea la densidad aparente, mayor es el espacio poroso del suelo. A su vez el incremento del espacio poroso se ve reflejado por los procesos de bioturbación; favoreciendo los flujos preferenciales. Al respecto Fontes, *et al.* (2004), en Portugal muestran valores de ρ_b bajos, de 0.74 g/cm³ para Andosol Férrico y 0.69 g/cm³ para Andosol Háplico con valores altos de Kfs; en México el estudio de Marín-Castro (2010), en Veracruz reportó para bosque maduro 0.45 g/cm³, bosque secundario 0.48 g/cm³ y Kfs muy altas comparadas con un pastizal con 0.89 g/cm³ y Kfs casi nula; Ángeles Cervantes (2010) en Hidalgo registró un valor de 0.65 g/cm³ con Kfs alta para un bosque no afectado por incendio y de 0.81 g/cm³ con Kfs casi nula para un bosque con un incendio superficial previo. En este estudio, la densidad aparente obtenida en los sitios de bosque y de pastizal se asemejan con los reportados en otros trabajos tanto fuera y dentro de México; sin embargo, no se detectó una relación estadísticamente significativa entre la Kfs y la densidad aparente.

En cuanto a las constantes de humedad inicial, se encontró que en el pastizal de Tulmiac (TulP) fue el sitio que tuvo un sesgo y los contenidos de humedad más altos (56.27%) sin haber llovido, comparado con los demás sitios de muestreo incluso con el sitio de bosque de Tlálloc (TB) con 24.55% que obtuvo en su cobertura vegetal

el mayor valor de Kfs. Esto indica que TulP puede retener la mayor cantidad de agua en el suelo después del drenaje por efectos de gravedad, es decir, que en terrenos con grandes pendientes la fuerza de gravedad actúa en forma descendente durante el proceso de infiltración del agua (Hincapié y Tobón, 2012). Ángeles Cervantes (2010) obtuvo valores de humedad del suelo para un bosque no afectado por incendio de 60.12% atribuido al alto contenido de MO, que favorecen la formación de agregados, la porosidad (Bigham, *et al.*, 2002; Huang, *et al.*, 2002), y una mayor retención de agua (Harsh, *et al.*, 2002) y un bosque con un incendio superficial previo de 56.68% que mostró disminuciones significativas en la porosidad total, la tasa de infiltración y la Kfs; por otro lado, el estudio de Hernández-Ordoñez (2014), reportó valores de humedad del 16% para la zona erosionada con bosque y Kfs negativa, de 33% para el Cerro de la Bufa con bosque y evaluación de Kfs Alta y de 64% en la Presa del Llano con formación de río y Kfs muy alta.

Para TulP en este estudio, la variación de la Kfs se debe muy probablemente a su textura con presencia de arenas y al alto contenido de materia orgánica observado a nivel superficial produciendo mayor infiltración a mayor volumen de agua. El espesor del mantillo y la textura del suelo están relacionados con la forma y topografía de la ladera que a su vez influyen en la variación de la Kfs; es posible que la vegetación desarrolle más raíces que favorezcan los mecanismos de anclaje para su estabilización, especialmente en laderas con fuerte pendiente (Soethe, *et al.*, 2006).

En este estudio se puede sugerir que la variación de la Kfs está fuertemente influenciada por el espesor del mantillo; incluyendo también el porcentaje de humedad inicial, ya que el resto de las variables no agregan un valor explicativo al modelo como tal a la Kfs. La relación positiva entre el EM y la Kfs, podría determinar que el mantillo este manteniendo un microclima superficial y local, manteniendo activos y humectados los poros del suelo (Basile, *et al.*, 2003), y facilitando la infiltración y conductividad del agua por dichos poros siendo rápida y profunda (Walsh and Voigt, 1977; Facelli and Pickett, 1991; Cusack, *et al.*, 2009 y Ilek, *et al.*,

2017). Ya que están linealmente relacionadas estas propiedades, la humedad inicial apoya esta última idea, en donde la infiltración del agua no ocurre de forma instantánea sino en una humectación más constante en el tiempo, evitando la erosión laminar y la escorrentía superficial (Gerke and Kuchenbuch, 2007; Van der Putten, *et al.*, 2013 y Wu, *et al.*, 2016). El estudio de García, *et al.* (2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro; midieron la velocidad de infiltración media de agua en suelo volcánico de un bosque de *Pinus plántula* con EM de 5 cm cubierto por acículas de pino, un bosque de encino con 4 cm de espesor y un pastizal que carecía de mantillo, y muestran que la presencia de una capa de mantillo es uno de los factores determinantes que favorece la infiltración y la conductividad del agua, incrementando el volumen que es captada por el suelo. La MO y el EM del suelo juega un papel central para facilitar el ingreso del agua en el suelo, ya que funciona como una esponja capaz de absorber el agua de la lluvia reduciendo la escorrentía superficial (Tamhane, *et al.*, 1978).

De acuerdo con Buurman, *et al.* (2007) la MO vegetal generalmente se degrada por incendios y es rápidamente sustituida por la MO producida por una gran actividad microbiana; en el sitio de TulP se encontró la presencia de lombrices al momento de realizar las mediciones de infiltración; además de presentar pastos altos con mucha influencia de *Pinus sp.* y tener una inclinación del relieve pronunciada. Por otro lado, Kunst, *et al.* (2003), reporta que la velocidad de I y Kfs registrada bajo el mantillo de plantas leñosas, con hojarasca y ramillas supera casi en un 50% a la vegetación con suelo desnudo o con mantillo de gramíneas, lo cual explica también las mayores tasas de Kfs en los bosques comparadas con las de pastizales dominados por gramíneas; aunque este no sea el caso de TulP, ya que presenta mantillo de ambas coberturas vegetales.

El modelo de regresión lineal, visualiza el comportamiento para los tres sitios de estudio entre el espesor del mantillo y la Kfs, aunque también se pueden ver relacionadas con la cercanía a los cuerpos de agua, la textura edáfica y la edad del ecosistema y la biomasa de raíces (gruesas, medianas y finas) teniendo una

distribución espacial en gradiente, al igual que la Kfs (Marín-Castro, 2017); además el EM y la textura del suelo están relacionados con la forma y topografía de la ladera, dados por los procesos de erosión (Hincapié y Tobón, 2012) y acumulación que históricamente han ocurrido (Elsenbeer, *et al.*, 1992; Lizcano, *et al.*, 2006; Perkins, *et al.*, 2007 y Marín-Castro, 2010).

6. Conclusiones

- Las hipótesis planteadas en este estudio fueron la diferencia entre coberturas vegetales para infiltrar y conducir el agua considerando la importancia de las propiedades físicas como la humedad, la densidad aparente y el espesor del mantillo. Los resultados sustentan dichas hipótesis, así como las preguntas de investigación que se lograron contestar; estadísticamente no hubo diferencias significativas de la Kfs entre coberturas vegetales, pero si entre sitios en donde las propiedades que determinan estas diferencias son el uso de suelo (solo para el pastizal de Tulmiac) y el espesor de mantillo, es decir, que el sitio de pastizal de Tulmiac tuvo tanta variación que generó diferencias entre sitios. Si se elimina el sesgo del pastizal de Tulmiac, se obtiene por ende que los sitios de bosque infiltran más que los sitios de pastizal. Para posteriores estudios se deberá aumentar el número de observaciones, cuidando la densidad arbórea de los sitios.
- En los sitios estudiados, los suelos corresponden a Andosoles, que son oscuros, fértiles y profundos formados de ceniza volcánica, caracterizados por sus texturas francas; con propiedades edafogenéticas favorables para permitir una adecuada capacidad de infiltración, debido a su alta retención de humedad, estabilidad estructural, resiliencia a la degradación por incendios y a su alta porosidad, esta última influenciada también por la actividad de organismos edáficos que realizan la descomposición de la MO. La calidad de los seis sitios estudiados en general es buena con relación a los servicios ambientales hídricos que presentan, ya que la cantidad de agua que el suelo puede infiltrar, conducir, retener y proporcionar a las plantas es

muy alta, por lo que suponemos que la capacidad que tienen estos suelos para la recarga de agua es alta.

- La I y la Kfs se ven estrechamente relacionadas con el EM, la cobertura vegetal, la textura, la humedad inicial del suelo y la densidad aparente; además de las raíces de diferente tamaño y la formación de macroporos contruidos por estas, que favorecen los flujos preferenciales. Este trabajo no contempló el análisis de densidad de raíces, pero fueron evidentes en los puntos donde se insertó el anillo al realizar las mediciones de infiltración.
- En general los bosques si tienen mayor capacidad para infiltrar y conducir el agua, pero también depende de las características ecológicas del área a estudiar, como el sitio de Tulmiac. Estadísticamente no hubo diferencias significativas entre coberturas vegetales; pero ambas coberturas vegetales proporcionan buenas condiciones para la captación de agua.
- En el sitio de TB, la Kfs al parecer no fue afectada por el incendio; aunque se notó la formación de sustancias hidrófobas en el suelo, también se generó cierta compactación que aumentó la retención de humedad. Durante los ensayos de infiltración, ésta llegó a ser rápida al inicio, manteniéndose extremadamente lenta a un cierto tiempo, debido a las altas fuerzas de atracción generadas entre los sólidos del suelo y el agua.
- En el sitio de TulP, la infiltración y la Kfs fueron las más altas dentro del límite del área; atribuido a su textura, al alto contenido de humedad antecedente y posiblemente a la fauna edáfica descrita en el perfil, indicando que puede retener una mayor cantidad de agua en el suelo a pesar de la pendiente. También su alto contenido de MO observado y su EM de ambas coberturas vegetales (hojarasca, ramillas y gramíneas) podría determinar que está manteniendo un microclima superficial y local, manteniendo activos y humectados los poros del suelo facilitando la I y la Kfs por dichos poros, siendo rápida y percolando a mayor profundidad.

- Independientemente las condiciones medioambientales para los sitios de TB y TulP, ambos presentan una conductividad muy alta según la clasificación del Soil Survey Manual de la USDA; en donde claramente las condiciones de incendio de TB y las características peculiares de TulP no afectan al suelo de manera drástica para cumplir su función al sistema con los servicios hídricos.
- Los valores obtenidos del análisis de la Anova – Prueba *post hoc* de Tukey permitieron determinar que la Kfs muestra diferencias significativas entre los tres sitios de muestreo, específicamente para Tulmiac muy diferente de Tláloc y Tuxtepec, lo cual se debe a diferencias en su ubicación espacial y puntuales en las propiedades del suelo como su textura con presencia de arenas y al alto contenido de materia orgánica.
- Con el análisis exploratorio se encontró que los sitios cuentan con propiedades físicas favorables para los procesos de I y Kfs, representativas de los Andosoles. Estos presentan ρ_b bajas y %H altos relacionadas con el desarrollo de la estructura y la porosidad del suelo; sin embargo, en este estudio la ρ_b y la humedad no se relacionan directamente con la variación de la Kfs.
- Con el modelo de regresión lineal se identificó que la Kfs en este estudio, se ve fuertemente influenciada por el EM, proporcionando un microclima superficial, local y permitiendo que los poros se encuentren hidráulicamente activos. Sin embargo, la humedad inicial apoya esta última idea, ya que la infiltración del agua no ocurre de forma instantánea sino en una humectación constante en el tiempo.

7. Recomendaciones y sugerencias

- En este estudio se puede inferir que la variación y el aumento de la I y la Kfs está influenciada por el espesor del mantillo, por lo que se sugiere profundizar en el estudio entre la relación de las características del mantillo y la Kfs.
- La alta calidad del suelo en bosque y pastizales en la Sierra del Chichinautzin es apropiada para llevar a cabo un buen manejo forestal. Se recomienda conservar estos sitios que favorecerían la I y la Kfs para mantener los mantos acuíferos que abastecen a la Ciudad de México; así como evitar el cambio de uso de suelo y el control de los incendios forestales frecuentes en la zona. Sin embargo, también surge la importancia de conocer cómo inciden los incendios superficiales en la I y la Kfs, ya que se ha señalado que los Andosoles pierden de manera irreversible estas propiedades.
- Los resultados de este trabajo no permiten establecer que la capacidad de I y la Kfs están determinadas por la pendiente, por lo que una de las recomendaciones es la de poner a prueba un estudio nuevo en donde se verifique que existe un incremento de la Kfs en los Andosoles a medida que el ángulo de inclinación de la pendiente del terreno es mayor, generando cambios en la densidad aparente, la cantidad de materia orgánica y la porosidad del suelo.
- Por la fauna edáfica observada en el sitio de Tulmiac; propondría un estudio en donde se analice la presencia de canales de flujos preferenciales producidos principalmente por bioturbación en coberturas de pastizal debido a las diferencias de las variables edáficas y la Kfs estudiada.

8. Referencias

- Ángeles-Cervantes E. 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco.
- Angulo-Jaramillo, R., J. P. Vandervaere, S. Roulier, J.-L. Thony, J.-P. Gaudet, and Vauclin M. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments. *Soil Tillage*. 55:1-29.
- Arana, L. y H. Delgado. 1997. Pelado volcano in Southern city, a young monogenetic volcano (<1,000 years old) and its possible impact in human settlements, IAVCEI, 123 pp
- Arana S., L. 2004. Tesis "Geología De Los Volcanes Monogenéticos Teuhtli, Tláloc, Tlacotenco, Ocusacavo V Cuauhtzin En La Sierra Chichinautzin, Al Sur De La Ciudad De México" Instituto de Geofísica, UNAM. México. Pp. 123
- Ávila, V. 1998. Cartografía, geología y estratigrafía del Grupo Chichinautzin, en el área de Tepoztlán, Morelos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 59 pp.
- Bartolli, F., Poulénard, A. J. & Schouller, E. B. 2007. Influence of allophone and organic matter contained on surface properties of Andosols. *European Journal of Soil Science*. 58: 450-464.
- Basile, A., Ciollaro, G., Coppola, A., 2003. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 39, n/a-n/a. doi:10.1029/2003WR002432
- Bauters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y. 1998. Preferential flow in water repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1185–1190.
- Benegas, L., Ilstedt, U., Roupsard, O., Jones, J., Malmer, A., 2014. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agric. Ecosyst. Environ.* 183, 185–196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.027>.
- Bigham J.M., Fitzpatrick R.W. y Schulze D. G. 2002. Iron Oxides. En: Dixon J. y Schulze D. Eds. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, pp. 323-366. Soil Science Society of America.
- Birkeland, P. W., 1999. *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press. EU. 429 pp
- Bosco I., Blanco J. A. y Castillo F. J., 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. *Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global*. Ministerio de medio ambiente, Madrid. ISBN: 84-8014-552-8. 479-506 pp.
- Brady, C. N. and R. R. Weil. 1999. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall.
- Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104 (1):185-228.
- Buczko, U., Bens, O., Hüttl, R.F., 2006. Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine-beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology* 331, 383–395.

- Buurman P., Petersen F. y Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils: a pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science* 58:1330–1347.
- Campos-Aranda, D. 1987. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. 56 pp.
- Campos, A., Oleschko, K., Etchervers, J., Hidalgo, C., 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *For. Ecol. Manag.* 248, 174–182.
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 41:711–717.
- Carrera-Hernández, J. J. and S. J. Gaskin, 2008. Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology* 353: 228– 246
- Castro-Alonso A. 2009. *Conductividad hidráulica en bosques y praderas de alta montaña de Amecameca, Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México D.F.
- Challenger, A. (Ed.) 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro*. 847 pp Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México y Agrupación Sierra Madre S.C., México.
- Chandler, K. R., Stevens, C. J., Binley, A. y Keith A. M. 2018. Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation. *Geoderma* 310 (2018) 120–127.
- Chen, X., Zhang, Z., Chen, X., Shi, P., 2009. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. *Environ. Earth Sci.* 59, 811–820.
- Chiesura, A., y R. de Groot. 2003. Critical natural capital: a socio-cultural perspective. *Ecological Economics* 44:219-231.
- Childs, E. C., y Collis-George, N. 1950. *The permeability of porous materials*. School of Agriculture, University of Cambridge.
- Clothier, B.E., Green, S.R., Deurer, M., 2008. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 2–13. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00991.x>.
- CONABIO. 2020. *Ecosistemas de México: Bosques Templados*. México <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- CONAFOR, 2006. *Programa Estratégico Forestal del Distrito Federal (PEF-DF) 2006-2025*. México, 192 pp.

- CONAGUA, 2010. Estadísticas del agua en la cuenca del Río Balsas, 2010. Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Balsas. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Pp. 180
- CONAGUA. 2013. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Cuernavaca (1701), Estado de Morelos. México. Pp. 27
- Corti, G., Ugolini, F.C., Agnelli, A., Certini, G., Cuniglio, R., Berna, F., Fernández, M.J., 2002. The soil skeleton, a forgotten pool of carbon and nitrogen in soil. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 283–298.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van den Belt. 1998a. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics* 25:67-72.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van den Belt. 1998b. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics* 25:3-15.
- Cotler, H.; Sotelo, E.; Dominguez, J.; Zorrilla, M.; Cortina, S. y Quiñones, L. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, núm. 83, abril-junio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México. Pp. 5-71
- Cusack, D. F., Chou, W. W., Yang, W. H., Harmon, M. E. and Silver, W. L. 2009. Controls on long-term root and leaf litter decomposition in neotropical forest. *Global Change Biology*, 15: 1339-1355
- de Groot, R. S., M. A. Wilson, y R. M. J. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41:393-408.
- De Groot, R., J. Van der Perk, A. Chiesura, y A. van Vliet. 2003. Importance and threat as determining factors for criticality of natural capital. *Ecological Economics* 44:187-204.
- Dahlgren, R.A. & Saigusa, M. & Ugolini, F.C., 2004. The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy*. 82. 113-182. 10.1016/S0065-2113(03)82003-5.
- Delgado, G. H. y A. L. Martín del Pozo. 1993. Pliocene to Holocene volcanic Geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco, Southwest of Mexico City. *Geofísica Internacional*, 32(3):511-522
- Delgado G., H y A. L. Martín del Pozo. 1998. Geology of Xitle volcano in southern Mexico City, a 2000- year old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 15, 115-131.
- Donado, L.D. 2004. Modelo de conductividad hidráulica en suelos. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 16 pp.
- ECOBA, 2012. Estrategia Regional para la Conservación del Bosque de Agua. J. Hoth (Editor). Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., Fundación Biósfera del Anáhuac, A.C. y Pronatura México, A.C. México. 85 pp

- Elrick, D. E., y W. D. Reynolds. 1992. Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters. Pages 1-24 in G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green, editors. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Inc.
- Elsenbeer H., Cassel K. y Castro J. 1992. Spatial analysis of soil hydraulic conductivity in a tropical rain forest catchment. *Water Resources Research*. 28, 3202-3206.
- Escamilla, M. 2007. La vegetación de la alta montaña del volcán Iztaccíhuatl (México): un enfoque fitosociológico. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 124 pp.
- Ethos. Laboratorio de Políticas Públicas, 2016. ROI Sustentable en países emergentes. Redefiniendo la medición de la inversión en sustentabilidad corporativa. México, 90 pp.
- European Commission (EU), 2010. The factory of life. Why soil biodiversity is so important. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 22 pp.
- Facelli, J.M., Pickett, T.A., 1991. Plant Litter: Its Dynamics and Effects on Plant Community Structure. *Bot. Rev.* 57, 1–32.
- FAO, ISRIC, ISSS. 1994. World Reference Base for Soil Resources (WRB). Draft. O. C. Spaargaren (Ed.). Wageningen, Rome.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Instituto de Geología, UNAM. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Pp: 84-92
- Ferreira, O. M. 2008. Relaciones Funcionales Relieve-Suelos En El Volcán Tláloc, Milpa Alta, Distrito Federal. Facultad De Filosofía Y Letras. Colegio De Geografía. UNAM. Tesis de Licenciatura. Pp. 113
- Ferrer, J.M., Estrela Monreal T., Sánchez del Corral Jiménez A. y García-Meléndez E. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*. 123, 257-277.
- Fontes J.C.; Gonçalves M.C. y Pereira L.S. 2004. Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena* 56:145–154.
- Fortin, S. 2003. Permeability testing in unconsolidated materials. Robertson *GeoConsultants*. Vancouver, BC, Canada.
- Fregoso, A., A. Velázquez, G. Bocco y G. Cortéz. 2001. El enfoque de paisaje en el manejo forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM.* 46:58-77.
- Fries, C. 1956. Bosquejo geológico de las partes centrales y occidentales del estado de Morelos y áreas contiguas de Guerrero y México. Congr. Geol. Intern. XX Sesión, Libroto Guía de la Excursión C-9. México, D.F.

- Fries, C. 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero. Región Central Meridional de México. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 60. 236 pp
- Galicia, L., A. M. Gamboa Cáceres, S. Cram, B. Chávez Vergara, V. Peña Ramírez, V. Saynes y C. Siebe. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- García, E. 1998. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, 5ª ed. Ed. Instituto de Geografía, UNAM, México p.
- García H., M. A.; García H., M. A.; Castellanos V., I.; Cano S., Z.; Peláez R, C. M. 2008. Velocidad De Infiltración Media En Seis Ecosistemas Inalterados. *Terra Latinoamericana Volumen 26 Número 1*.
- Geris, J. 2007. Changes in soil physical characteristics, infiltration and hillslope hydrological response associated with forest conversion to pasture in Central Veracruz, Mexico. Master's thesis ecohydrology. Vrije Universiteit Amsterdam.
- Gerke, H.H., Kuchenbuch, R.O., 2007. Root effects on soil water and hydraulic properties. *Biol. Bratislava* 62, 557–561. Doi:10.2478/s11756-007-0110-8
- Gómez-Tagle, C. A., R. A. F. Gómez-Tagle, J. Batlle-Sales, H. Zepeda-Castro, M. A. Guevara-Santamaría, S. Maldonado-López y J. E. Pintor. 2008. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. 26: 287-297.
- González Barrios, J.L., Jean-Pierre V., Luc Descroix, Sánchez-Cohen I., Chávez-Ramírez E. y González Cervantes, G. 2011. Impacto del cambio de uso del suelo en la hidrodinámica superficial de una cuenca receptora de agua. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA). 8, 105-110 pp.
- González Vargas Tania. 2011. Ecohidrología de un bosque de oyamel: Diagnóstico y rehabilitación. Tesis de Licenciatura. FESZ, UNAM. México. DF.
- Guzmán Mendoza, R. 2004. Patrones de actividad de forrajeo de *Pogonomyrmex barbatus* en el valle semiárido de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. 116 p.
- Harden C. y Scruggs P. 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* 55:5-24.
- Harsh J., Chorever J. y Nizeyimana E. 2002. Allophane and Imogolite. En: Dixon J. y Schulze D. Eds. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, pp. 291- 320. Soil Science Society of America.
- Hernández-Ordoñez J. O., 2014. Diagnóstico y habilitación de suelos forestales con presencia de Manganeso-Hierro, Caso Villa del Carbón, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad De Estudios Superiores Zaragoza. México. Pp. 89

- Hincapié, E. and Tobón, C. de J. 2012. Soil Water Dynamics in Andisols Under Hillslope Conditions. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 65(2): 6771-6783. 2012
- Hiroshi, M. S. 1974. Estudio de algunos perfiles de suelo derivados de cenizas volcánicas de los volcanes Xitle, Teuhtli, Chichinautzin y el Cerro Tres Cumbres. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 42 pp
- Huang P. M., Wang M. K., Kampf N., y Schulze D. G. 2002. Aluminum hydroxides. En: Dixon J. y Schulze D. Eds. 2002. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, pp. 261- 289. Soil Science Society of America
- Ilek, A., Kucza, J., Szostek, M., 2017. The effect of the bulk density and the decomposition index of organic matter on the water storage capacity of the surface layers of forest soils. *Geoderma* 285, 27–34. Doi: 10.1016/j.geoderma.2016.09.025
- Imeson A.C., Verstraten J.M., Van Mulligen E.J. y Sevink J. 1992. The Effects of Fire and Water Repellency on Infiltration and Runoff under Mediterranean Type Forest. *Catena* 19:345 361
- INEGI. 1975. Centro de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) Carta Geológica. 1:50,000.
- INEGI. 1997. Cuaderno Estadístico Delegacional. Milpa Alta. México, D.F. 136 pp
- INEGI. 2007. Conjunto de datos vectorial edafológico, Serie II, Escala 1:250,000 (Continuo Nacional), México.
- INEGI-CONAGUA, 2007. Mapa de la Red Hidrográfica Digital de México; Escala 1:250,000, México.
- INEGI-CONAGUA, 2020. Aspectos geográficos / Marco Geoestadístico Nacional. Pp: 25 Link: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_09.pdf
- Jahn, R. y K. Stahr. 1996. Development of soil and site qualities on basic volcanoclastics with special reference to the semiarid environment of Lanzarote, Canary Islands, Spain. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13 (1): 104-112.
- Jaramillo J. Daniel. F. 2004. Repelencia al agua en suelos: Con énfasis en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias. Medellín. 197 pp.
- Jenny, Hans. 1941. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. *McGraw-Hill*, New York. 281 pp.
- Karlen, D. L. and D. E. Stott. 1994. Framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. Páginas 53-72. En Doran, J. W., D. C. Leman, D. F. Bezdicek and B. A. Stewart, (Editores). *Defining soil quality for a sustainable environment; Proceedings of a symposium*, Minneapolis, MN, USA. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
- Karlen, D. L. and S. S. Andrews. 2000. The soil quality concept: A tool for evaluating sustainability. Pp. 15-26. In: S. Elmholt, B. Stenberg, A. Gronlund, and V. Nuutinen (eds.). *Soil stresses, quality and care*. DIAS report, 38. Danish Institute for Agricultural Sciences. Tjele, Dinamarca.
- Körner, C. 2007. The use of "altitude" in ecological research. Institute of Botany, University of Basel, Switzerland. *TRENDS in Ecology and Evolution*. Vol. 22 No. 11. Pp: 6, 569-574

- Kunst, C., R. Ledesma, N. Basan, G. Angela, D. Prieto y J. Godoy. 2003. Rolado de "fachinales" e infiltración de agua en suelo en El Chaco Occidental (Argentina). *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32: 105-126.
- Kutiel P. e Inbar M. 1993. Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *CATENA* 20:129-139.
- Lambin, E. F., Turner, B., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269.
- Landon, J. R. 1984. *Tropical Soil Manual*. Booker Agriculture. International limited. 450 pp. Londres
- Lee, K.E., 1985. *Earthworms: Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use*. Academic Press, New York, 441 p.
- Lin, H. S., Bouma, J., Pachepsky, Y., Western, A., Thompson, J., van Genuchten, M. Th., Vogel, H., and Lilly, A., 2006^a: *Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology*, *Water Resour. Res.*, 42, W05301, doi:10.1029/2005WR004085.
- Lin, H. S., Kogelmann, W., Walker, C., and Bruns, M. A., 2006^b: *Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydropedological perspective*, *Geoderma*, 131, 345–368.
- Lizcano, A.; Herrera, M. C. y Santamarina, J. C. (2006). *Suelos Derivados De Cenizas Volcánicas En Colombia*. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2) 167-198
- Marín-Castro, B.E. 2010. *Variación espacial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de origen volcánico bajo tres usos de suelo en el centro de Veracruz, México*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias. INECOL, Xalapa, Ver. 14-35 pp.
- Marín-Castro, B. E. 2017. *Comportamiento hidrológico del suelo a diferentes escalas espaciales en laderas de montaña subtropical con diferentes usos*. Xalapa, México. Pp. 98
- Martin del Pozzo, A. L. 1982. *Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico*. *Bull Volcanol*, 45(1)
- Medina, J.G. y J.D. Tejero-Diez. 2006. *Flora y vegetación del parque estatal Atizapán-Valle Escondido, Estado de México, México*. *Polibotánica* 21:1-43.
- Meza, E. y Geissert, D., 2007. *El comportamiento hidrodinámico de Andosoles con uso diferencial en el municipio de Coatepec, Estado de Veracruz, México*. En Reporte técnico Final del proyecto No. INE/A1-064/2007. Instituto de Ecología, A.C. Vrije Universiteit Amsterdam. Instituto Nacional de Ecología. Xalapa, Ver., México.
- Meza Pérez, E. y Geissert K. D. 2003. *Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México* *Foresta Veracruzana*.
- Miller, R. W., y R. L. Donahue. 1990. *Soils, An introduction to Soils and Plant Growth*, 6th edition. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

- Mora Santiago A., Páez Reyes J. C., Ángeles Cervantes E., 2011. Evaluación del servicio ambiental hidrológico del Parque Nacional Pico de Orizaba. 7º Congreso de Investigación y 1º de Posgrado en la FES Zaragoza, UNAM.
- Morgan, R.; McIntyre, K. Vickers, A. W.; Quinton, J. N.; Rickson, R. J. 1997. A rainfall simulation study of soil erosion and rangeland in Swaziland. School of Agriculture Food and Environment, Cranfield University, Silsoe Campus, Bedford MK45, UK.
- Montero, I. 2002. Atlas Arqueológico de la Alta Montaña Mexicana. SEMARNAT-CONAFOR. México. 180 p.
- Mooser, F.M., A. E. M. Nairn, J. F. W. Negendank. 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII. A paleomagnetic and petrologic study of the volcanics of the Valley of Mexico. *Geol. Rundsch.* (63): 451–483.
- Mooser, F. 1975. Historia geológica de la Cuenca de México. En: *Memorias del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*. México, D.F. pp 9-38
- Morgan, R.; McIntyre, K. Vickers, A. W.; Quinton, J. N.; Rickson, R. J. 1997. A rainfall simulation study of soil erosion and rangeland in Swaziland. School of Agriculture Food and Environment, Cranfield University, Silsoe Campus, Bedford MK45, UK.
- Naeem, S., F.S. Chapin III, R. Constanza, P.R. Ehrlich, F.B. Golley, D.U. Hooper, J.H. Lawton, R.V. O'Neill, H.A. Mooney, O.E. Sala, A.J. Symstad y D. Tilman. 1999. Biodiversity and ecosystem functioning: Maintaining natural life support processes. *Issues in Ecology* 4:1-11
- Nakagawa M. y T. Ohba. 2002. Minerals in volcanic ash 1: Primary minerals and volcanic glass. *Global Environ. Res.* 6(2): 41–51.
- Nanzyo, M., Shoji, S., Dahlgren, R., 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. In: Shoji, S., Dahlgren, R., Nanzyo, M. (Eds.), *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. Development in Soil Science*, vol. 21, Elsevier, Amsterdam, pp. 189-201.
- Nanzyo, M., 2002, Unique properties of volcanic ash soils: *Global Environmental Research*, 6 (2), 99–112.
- Naranjo Arias J. L., J. Jiménez Mendoza, R. Ramírez Hernández, V. Tena Carranza, E. Robles Becerril, R. Montiel Pérez y E. Molina Ramos. 2002. Programa de manejo forestal persistente para Pino (*Pinus hartwegii* y *Pinus Montezumae*) y oyamel (*Abies religiosa*) en 5,000.00 ha de bosque comunal en Milpa Alta, Servicios Forestales y Ambientales, México, 150 pp
- National Research Council. 1995. *Mexico City's Water. Supplu: Improving the Outlook for Sustainability*. Washington, D.C: The National Academies. Pp: 256. Press: <https://doi.org/10.17226/4937>.
- Negrete-Yankelevich, S., Fragoso, C., Newton, A., Russell, G., Heal, O.W., 2006. Spatial patchiness of litter, nutrients and macroinvertebrates during secondary succession in a Tropical Montane Cloud Forest in Mexico. *Plant Soil* 286, 123–139.
- Nishimura, S., Noguchi T., & Shindo H., 2008. Distribution of charred plant fragments in particle size fractions of Japanese volcanic ash soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 54:4, 490-494

- Ortega, G. & Farvolden, R. 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of México. *Journal of Hydrology*, 110, 271-294.
- PAOT. 2010. Análisis Físico-Territorial para el control y tratamiento de los Asentamientos Humanos Irregulares en Suelo de Conservación.
- Parks D. S. & Kundy T. W. 1989. Soil Hydraulic Characteristics of a Small Southwest Oregon Watershed following high intensity wildfire. En Berg N. Coord. 1989 *Proceedings of the symposium on fire and watershed management*, pp. 63-67. USDA Forest Service Pacific.
- Peña-Ramírez, V. M.; Vázquez-Selem, L. and Siebe, C. 2009. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835–30,500 years B.P.) in Mexico. *Geoderma* 149. 224-234
- Peña-Ramírez, V. M. 2013. Dinámica de la Calidad de Sitio a Través de una Cronosecuencia Volcánica y sus Implicaciones para la Productividad Forestal. Tesis de Doctorado. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Perkins, D.B.; Haws, N.W.; Jawitz, J.W.; Das, B.S.; Rao, P.S.C. 2007. Soil hydraulic properties as ecological indicators in forested watersheds impacted by mechanized military training. *Ecological Indicators* 7, 589-597.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo M. y Roquero De Laburu C., 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Tercera edición; Impreso en España, Ediciones Mundiprensa. 929 pp.
- Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.L. y Collinet J. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45:199-218.
- Prado, B. *et al.*, 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land use in Central Mexico. *Geoderma* 139: 300-313.
- Pulido, C., 2006. Andisoles, pp. 1-10. Instituto Geográfico Agustín Codazzi- Colciencias. Estudio de las sustancias húmicas en Andisoles y molisoles de Colombia desarrollados bajo ambientes ecológicos diferentes. Bogotá, Colombia
- R for MacOS. 2020. <https://cran.itam.mx/>
- Rab M.A., 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*. 84:159-176.
- Ramos L., A. (2000). Florística y vegetación del zacatonal subalpino localizado en la triangulación entre los volcanes Tulmiac, Tlaloc y Yecahuazac en la Sierra del Chichinautzin, Sur de la Cuenca de México. Tesis de Licenciatura. Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México. Pp: 89
- Reynolds W.D. y Elrick D.E. 1985. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*. 140:292-301.

- Ritsema, C.J., Dekker, L.W., Nieber, J.L., Steenhuis, T.S., 1998. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.* 34, 555–567.
- Rodríguez, G. M. L., 2001. Diagnóstico Ambiental de la Zona Lacustre de Tláhuac, Tesis de Maestría en Ciencias (Biología), Facultad de Ciencias, UNAM, México, 109 p.
- Rodríguez A., Arbelo C., Guerra J. y Mora. J. 2002. Erosión hídrica en andosoles de las islas canarias. *Edafología* 9(1):23-30.
- Rzedowski, J. 1975. Flora y vegetación de la cuenca del Valle de México. En: *Memorias de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*. México, D.F. pp 79-134.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México, D.F. 432 pp.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14: 3-21.
- Rzedowski, J. 1992. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Ciencias* número especial 6:47-56
- Rzedowski, G.C., Rzedowski, J y colaboradores. 2001. *Flora Fanerogámica del Valle de México*. 2ª ed. Instituto de Ecología A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro (Michoacán), México. 1406 pp.
- Selby, M.J. 1982. *Hillslope materials and processes*. Oxford, Oxford University Press.
- SEMARNAT-Colegio de Postgraduados. 2003. Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la Republica Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- Shapiro, S.S, y Wilk, M.B. 1965. An análisis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 52: 571-611.
- Shimada, M. K. 1972. Estudio de algunos perfiles de suelos derivados de cenizas volcánicas y de Andosoles del Ajusco, D.F. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Shoji, S., Takahashi, T., Ito, T., Ping, C.L., 1988. Properties and classification of selected volcanic ash soils from Kenai Peninsula, Alaska. *Soil Sci.* 145, 395-413.
- Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. The Netherlands. 288 pp.
- Shoji, S., R. Dahlgren, and M. Nanzyo. 1993a. Terminology, concepts, and geographic distribution of volcanic ash soils. In S. Shoji, M. Nanzyo and R. Dahlgren (Eds.). *Volcanic Ash Soil-genesis, properties, and utilization*. *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam. pp 1-5.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993b. Productivity and utilization of volcanic ash soils. In S. Shoji, M. Nanzyo and R. Dahlgren (Eds.). *Volcanic Ash Soil-genesis, properties, and utilization*. *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam. pp 209-251
- Shoji, S.; Takahashi, T., 2002. Environmental and Agricultural Significance of Volcanic Ash Soils. In Japan, *Global Environmental Research*, pp. 133-135.

- Siebe, C. 2000. Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 104, 45-64.
- Siebe, C., V. Rodriguez-Lara, P. Schaaf y M. Abrams. 2004. Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guesalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology* (66): 203-225.
- Siebe C., Arana Salinas, L. and Abram M. 2005. Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (141): 225–243
- Siebe, C.J., R.; Stahr, K. 2016. *Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de suelos en campo*. Instituto de Geología; UNAM, México.
- Silva L del Carmen, Romero J. F., Velázquez A. y Almeida L. L. 1999. La vegetación de la región de montaña del sur de la Cuenca de México. *Biodiversidad de la cuenca de México*. México Pp: 65.92
- Sobieraj, J.A., Elsenbeer, H. y Cameron, G. 2004. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *CATENA*. 55, 49-77.
- Soethe, N., Lehmann, J., Engels, C., 2006. Root morphology and anchorage of six native tree species from a tropical montane forest and an elfin forest in Ecuador. *Plant Soil* 279, 173–185. doi:10.1007/s11104-005-1005-5
- Tamhane, R., D. Motiramani y Y. Bali. 1978. *Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales*. Diana. México, D. F.
- Titus, J.H., del Moral, R., 1998. Seedling establishment in different microsites on Mount St. Helens, Washington, USA. *Plant Ecol.* 134, 13–26.
- Tobón C., Bouten W., y Dekker S. 2000 Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in Northwest Amazonia. *Journal of Hydrology*. 237, 169-183
- Tobón C., Bruijnzeel, L.A., Frumau, F.A. y Calvo-Alvarado J.C. 2010. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. *Tropical Montane Cloud Forest: Since for Conservation and Management*. Cambridge University Press. 52, 502-513.
- Ugolini, Fiorenzo & Dahlgren, Randy, 2002. Soil development in volcanic ash. *Global Environ. Res. Engl.* Ed. 6.
- USDA, Soil Conservation Service. (2008). *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. Soil Survey Investigations Report no. 1. U.S. Dept. Agric., Washington, D.C., U.S.A.
- Valencia A., S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75:33-53.
- Van der Putten, W.H., Bardgett, R.D., Bever, J.D., Bezemer, T.M., Casper, B.B., Fukami, T., Kardol, P., Klironomos, J.N., Kulmatiski, A., Schweitzer, J. a., Suding, K.N., Van de Voorde, T.F.J.,

- Wardle, D. a., 2013. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *J. Ecol.* 101, 265–276. doi:10.1111/1365-2745.12054
- Walsh, R.P.D., Voigt, P.J., 1977. Vegetation Litter: An Underestimated Variable in Hydrology and Geomorphology. *J. Biogeogr.* 4, 253.
- Wada K. 1980. Mineralogical characteristics of Andisols. pp. 87-107. In: K. G. Theng (ed.). *Soils with variable charge*. New Zealand Society of Soil Science. Lower utt, N.Z.
- Wit, A.M.W. 2001. Runoff controlling factors in various sized catchments in a semi-arid Mediterranean environment in Spain. Ph. D. Thesis, Universiteit Utrecht, Utrecht, The Nederland. 229 pp.
- Wolf, B.; Snyder, G. *Sustainable soils; the place of organic matter in sustainable soils and their productivity*. New York, Food Products Press, 2003. 352 p
- World Reference Base of Soil Resources (WRB). 2014. International Society of Soil Science. International Soil Reference and Information Centre. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Wu, G.L., Yang, Z., Cui, Z., Liu, Y., Fang, N.F., Shi, Z.H., 2016. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *J. Hydrol.* 535, 54–60. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.059
- Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, y B. Sanden. 1999. Measuring Saturated Hydraulic Conductivity using a Generalized Solution for Single-Ring Infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J* 63:788-792.
- Yao S., Qin J, Peng X., Zhang B. 2009. The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil in China. *Ecological Engineering.* 35:723-734.
- Zareaa M. J., Ghalavanda A., Goltapehb E.M., Rejalic F., Zamaniyand M. 2009. Effects of mixed cropping, earthworms (*Pheretima* sp.), and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on plant yield, mycorrhizal colonization rate, soil microbial biomass, and nitrogenase activity of free-living rhizosphere bacteria *Pedobiologia* 5:223-235.
- Zimmermann, B. y Elsenbeer, H. 2008. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance, *Journal of Hydrology.* 361, 78-95.

Apéndice 1. Caracterización edafocológica de campo de los perfiles del suelo, de los sitios de muestreo.

PERFIL No. 1

Sitio: Tláloc Bosque (TB)
 Fecha de descripción: 30 de abril del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tláloc
 UTMhor 0494436
 UTMver 2113544
 Altitud: 3190 msnm
 Posición fisiográfica: Media ladera
 Pendiente: Moderadamente inclinado (3°),
 exposición: Oeste

Uso del suelo o vegetación: Bosque con pastizal subalpino
 Estado del tiempo: Sin precipitación en los últimos 7 días. Soleado, despejado.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Ceniza volcánica
 Influencia humana: Incendio superficial previa.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Horizonte	Prof (cm)	Características
Ah ₁	0-10	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; contenido medio de materia orgánica (2-4%); textura franco limosa fina; moderadamente ácido (5.9); humedad muy seco; pedregosidad clase 0 (2-4%); estructura granular; muchos poros finos con estabilidad de agregados moderada; densidad aparente >1; densidad de raíces mediana; el límite del horizonte es difuso y ondulado. MP: Cenizas
Ah ₂	10-40	Color 10YR 2/1 negro; textura franco arcillo limosa; ligeramente ácido (6.1); humedad seco; pedregosidad clase 1 (2-10%); estructura granular; con estabilidad de agregados moderada a baja; poros finos y medianos; densidad aparente >1; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es abrupto y claro.
Bw ₁	40-60	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; contenido medio de materia orgánica (2-4%); textura franco arcillo arenosa; ligeramente ácido (6.1); humedad seco; pedregosidad clase 0 (2-4%); estructura subangular en bloques grandes, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados moderada a baja; poros comunes tabulares y vesiculares; densidad aparente 1; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es difuso y abrupto; presencia de Al activo (x).
Bw ₂	60-86	Color 10YR 3/4 marrón amarillento oscuro; textura franco arcillosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.2); humedad seco; pedregosidad clase 0 (2-4%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados moderada; pocos poros tabulares y vesiculares muy finos; densidad aparente 1.2; densidad de raíces mediana; el límite del horizonte es difuso y abrupto; presencia de Al activo (x).
Bw ₃	86-110	Color 10YR 3/3 café oscuro; textura franco arcillosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.2); humedad seco; pedregosidad clase 0 (2-4%); estructura subangular en bloques grandes, medianos y pequeños, de tamaño medianos a finos; con estabilidad de agregados baja; pocos poros tabulares; densidad aparente 1.4; densidad de raíces baja; el límite del horizonte es difuso y abrupto. Presencia de carbón, raíces muy gruesas; presencia de Al activo (x).
Bw ₄	110-140	Color 10YR 3/6 marrón amarillento oscuro; textura arcillo arenosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.4); humedad seco; pedregosidad clase 0 (2-4%); estructura subangular en bloques grandes y medianos de tamaño medianos a finos; con estabilidad de agregados baja; poros comunes tabulares muy finos; densidad aparente 1.6; densidad de raíces muy baja; el límite del horizonte es difuso y abrupto; presencia de Al activo (x).

PERFIL No. 2

Sitio: Tulmiac Bosque (TulB)
 Fecha de descripción: 06 de agosto del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tláloc
 UTMhor 0488092
 UTMver 2115117
 Pendiente: Escarpado (15°-20°),
 exposición: Noreste

Uso del suelo o vegetación: Bosque de *Pinus montezumae* con presencia de pastizal subalpino.
 Estado del tiempo: Lluvioso con precipitación ligera (<25 mm/h). Temperatura ambiente baja (<12° C).

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Ceniza volcánica
 Evidencias de erosión: Pérdida de mantillo

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Horizonte	Prof (cm)	Características
Ah ₁	0-10	Color 10YR 2/1 negro; textura franca limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); moderadamente ácido (5.8); humedad 27.7%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura granular media-gruesa, de tamaño muy fino y grado débil; poros comunes tabulares y vesiculares inped muy finos y medianos con estabilidad de agregados baja a moderada; densidad de raíces mediana; el limite del horizonte es uniforme. Abundantes pedazos de carbón; presencia de hifas.
Ah ₂	10-20	Color 10 YR 2/1 negro; textura franca limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); moderadamente ácido (5.9); humedad 32.6%; pedregosidad clase 0; estructura subangular en bloques y granular grueso, tamaño medianos y grandes; con estabilidad de agregados moderada a mediana; poros comunes tabulares intersticiales inped muy finos y mediano; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es uniforme; presencia de hifas.
Ah ₃	20-40	Color 10 YR 2/1 negro; textura franca limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.1); humedad 30.5%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grueso y granular grueso, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados baja a moderada; poros comunes intersticiales muy finos-medianos; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es uniforme; presencia de hifas. Horizonte con material más claro / posiblemente origen coluvial.
AB	49-62	Color 10 YR 2/2 café muy oscuro; textura franca; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.3); humedad 29.5%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos consistencia moderada, con estabilidad de agregados baja; muchos poros grandes, exped muy finos, finos y medianos-grandes; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es uniforme; presencia de hifas.
BA	62-71	Color 10 YR 2/2 café muy oscuro; textura franca; contenido baja de materia orgánica (1-2%); ligeramente ácido (6.3); humedad 29.1%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos, finos y muy finos, grado débil; con estabilidad de agregados moderada, baja y débil; poros comunes tabulares intersticiales finos, muy finos y gruesos; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es horizontal gradual; presencia de hifas.
B	71-119	Color 10 YR 3/4 marrón amarillento oscuro; textura franca; contenido baja de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente ácido (6.5); humedad 35.3%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura angular en bloques muy gruesos, de tamaño finos y grado débil; con estabilidad de agregados baja a media; poros comunes tabulares inped muy finos, finos y gruesos; densidad de raíces mediana; el limite del horizonte es horizontal difuso; presencia de hifas.

PERFIL No. 3

Sitio: Tuxtepec Bosque (TuxB)
 Fecha de descripción: 08 de septiembre del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tláloc
 UTMhor 19°07'11.00"
 UTMver 99°06'07.02"
 Altitud: 3063 msnm
 Posición fisiográfica: Ladera

Pendiente: Escarpado (15°-21°), exposición: Sureste

Uso del suelo o vegetación: Bosque abierto

Estado del tiempo: Sin precipitación en las últimas 24 horas. Soleado despejado.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Influencia humana: Muy cerca de cultivos, evidencia de trabajo.

Clasificación: Andosol

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Horizonte	Prof (cm)	Características
Ah ₁	0-10/15	Color 10YR 2/1 negro; textura franco limoso; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.2); pedregosidad clase 0 (<2%); humedad 4%; estructura subangular en bloques y granular, de tamaño medianos y finos, débil; poros comunes angulares vesiculares inped medianos y finos con estabilidad de agregados baja; densidad de raíces muy alta; el limite del horizonte es gradual y ondulado.
Ah ₂	10/15-25/28	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; textura franco limoso; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.3); pedregosidad clase 0 (<2%); humedad 37%; estructura subangular en bloques medianos, de tamaño finos granular, con estabilidad de agregados baja; poros tabulares inped medianos a grandes;; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es difuso y ondulado.
AB	25/28-40	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; textura arenoso limoso; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.4); pedregosidad clase 1 (2-10%); humedad 39%; estructura subangular en bloques medianos, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados muy baja; poros tabulares inped finos y medianos; densidad de raíces muy alta; el limite del horizonte es difuso irregular.
Bw ₁	40-77	Color 10YR 3/2 marrón grisáceo muy oscuro; textura arenoso limoso; contenido baja de materia orgánica (1-2%); ligeramente ácido (6.4); pedregosidad clase 0 (<2%); humedad 40%; estructura subangular en bloques tabulares, intersticiales inped, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados moderado; muchos poros grandes tabulares inped finos; densidad de raíces mediana; el limite del horizonte es difuso irregular.
Bw ₂	77-120	Color 10YR 3/2 marrón grisáceo muy oscuro; textura franco arcillo limoso; contenido medio de materia orgánica (2-4%); muy ligeramente ácido (6.5); pedregosidad clase 3 (25-50%); humedad 54%; estructura subangular en bloques tabulares intersticiales inped, de tamaño muy finos, finos y medianos; con estabilidad de agregados moderado; muchos poros comunes tabulares muy grandes; densidad de raíces baja; el limite del horizonte es claro uniforme.

PERFIL No. 4

Sitio: Tlálloc Pastizal (TP)
 Fecha de descripción: 29 de abril del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tlálloc
 UTMhor 0493370
 UTMver 2113888
 Altitud: 2924 msnm
 Posición fisiográfica: Ladera media
 Forma del terreno circundante: Entre lavas de acumulación.

Pendiente: Moderadamente inclinado (3°),
 exposición: Oeste
 Uso del suelo o vegetación: Pastizal subalpino
 Estado del tiempo: Sin precipitación en los últimos 7 días. Soleado despejado.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Ceniza volcánica
 Evidencias de erosión: Moderada laminar
 Influencia humana: Incendio superficial previo
 Clasificación: Andosol

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Horizonte	Prof (cm)	Características
Ah ₁	0-11	Color 10YR 2/1 negro; textura franca; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.0); humedad 3.4% seca; gravas finas clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques dada por raíces, de tamaño medianos a finos, grado fuerte; muchos poros tabulares y vesiculares muy finos con estabilidad de agregados moderada; densidad aparente >1; densidad de raíces muy alta; el limite del horizonte es límite difuso y ondulado.
Ah ₂	11-30	Color 10YR 2/1 negro; textura franco limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.1); humedad 11.5% fresca; gravas medianas clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos con consistencia moderada, grado fuerte; con estabilidad de agregados moderada; muchos poros tabulares muy finos; densidad aparente 1.4; densidad de raíces alta; el limite del horizonte es difuso y abrupto; presencia de Al activo (xxx).
2Ah ₁	30-89	Color 10YR 2/1 negro; textura franco arcillo arenosa; contenido medio alto de materia orgánica (4-8%); ligeramente ácido (6.3); humedad 24% humeda; gravas gruesas clase 1 (2-10%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos, grado fuerte con estabilidad de agregados baja; muchos poros tabulares inped finos y medianos; densidad aparente 1.4; densidad de raíces muy alta; el limite del horizonte es difuso y ondulado. Muestra lixiviación de ceniza; presencia de Al activo (xxx).
2AC	89-115	Color 10YR 3/3 café oscuro; textura franco arcillo limosa; contenido medio alto de materia orgánica (4-8%); ligeramente ácido (6.4); humedad 30.5% humeda; gravas gruesas clase 1 (2-10%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos con consistencia moderada, grado fuerte con estabilidad de agregados baja; poros comunes tabulares inped finos; densidad aparente 1.2; densidad de raíces mediana; el limite del horizonte es claro-abrupto y ondulado. Los poros son resultado de las raíces; presencia de Al activo (xxx).
Cw	115-130	Color 10YR 3/6 marrón amarillento oscuro; textura franco limosa fina; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.4); humedad 8.4% seca; gravas gruesas clase 1 (2-10%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño muy finos, finos y medianos; con estabilidad de agregados baja; poros comunes muy grandes tabulares inped-exped; densidad aparente 1.4; densidad de raíces baja; el limite del horizonte es de roca; presencia de Al activo (xx).

PERFIL No. 5

Sitio: Tulmiac Pastizal (TulP)
 Fecha de descripción: 02 de mayo del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tláloc
 UTMhor 0487836
 UTMver 2114727
 Altitud: 3119 msnm
 Posición fisiográfica: Pie de monte
 Pendiente: Escarpado moderado (12°),
 exposición: Oeste

Uso del suelo o vegetación: Pastizal con algunos elementos de pino
 Estado del tiempo: Sin precipitación en los últimos 7 días. Soleado, despejado.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Ceniza volcánica
 Evidencias de erosión: Baja
 Influencia humana: Muy cercano a cultivos

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Horizonte	Prof (cm)	Características
Ah ₁	0-11	Color 10YR 2/1 negro; textura franco arcillo arenosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.0); humedad 11.4% muy seco; pedregosidad clase 1 (2-10%); estructura granular; muchos poros finos con estabilidad de agregados moderada; densidad aparente 1.6; densidad de raíces mediana; el límite del horizonte es difuso; presencia de Al activo (x), bastantes lombrices.
Ah ₂	11-31	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; textura franco arenosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.4); humedad 9.5% seco; pedregosidad clase 1 (2-10%); estructura subangular en bloques y granular, de tamaño pequeños, con estabilidad de agregados moderada; poros comunes tabulares grandes y finos; densidad aparente 1.4; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es difuso; presencia de Al activo (xxx).
AC	31-58	Color 10YR 2/2 café muy oscuro; textura franco arcillo arenosa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); muy ligeramente ácido (6.7); humedad 10.8% fresco; pedregosidad clase 1 (2-10%); estructura subangular en bloques, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados baja a muy baja; poros tabulares comunes muy finos; densidad aparente 1.2; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es difuso. Presencia de carbón; presencia de Al activo (xxx).
BC	58-115	Color 10YR 3/6 marrón amarillento oscuro; textura franco arcillo arenosa; contenido bajo de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente alcalino (7.1); humedad 21.6% fresco; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes, medianos y pequeños, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados baja; poros comunes tabulares inped muy finos; densidad aparente 1.4; densidad de raíces mediana; el límite del horizonte es abrupto y gradual. Presenta una lengüeta de inclusión de material orgánico; presencia de Al activo (xxx).
2Ah ₁	115-132	Color 10YR 3/3 café oscuro; textura franco arcillo arenosa; contenido bajo de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente alcalino (7.1); humedad 20.8% fresco; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes, medianos y pequeños, de tamaño medianos a finos; con estabilidad de agregados baja; poros comunes tabulares vesiculares inped medianos y finos; densidad aparente 1.8; densidad de raíces baja; el límite del horizonte es abrupto-claro; presencia de Al activo (x).

PERFIL No. 6

Sitio: Tuxtepec Pastizal (TuxP)
 Fecha de descripción: 07 de agosto del 2019
 Localización: Subcuenca Tulmiac-Tlálloc
 UTMhor 0488244
 UTMver 2114061
 Altitud: 3070 msnm
 Posición fisiográfica: Ladera media
 Forma del terreno circundante: Pendiente
 Pendiente: Escarpado moderado (9°-15°),
 exposición: S-N

Uso del suelo o vegetación: Pastizal con influencia de pino. Reforestación natural.
 Estado del tiempo: Lluvioso con precipitación ligera (<25 mm/h).

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Ceniza volcánica
 Evidencias de erosión: Laminar baja
 Influencia humana: Cultivos cerca

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

Horizonte	Profm)	Características
Ah ₁	0-6	Color 10 YR 2/1 negro; textura franco limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); moderadamente ácido (5.9); humedad 37.4%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes y medianos de tamaño medianos, finos y muy finos; muchos poros tabulares finos con estabilidad de agregados moderada; densidad aparente 1.2; densidad de raíces mediana; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).
Ah ₂	6-22	Color 10 YR 2/2 café muy oscuro; textura franco limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.0); humedad 29.0%; pedregosidad clase 5 (>75%); estructura subangular en bloques chicos y granular, tamaño finos y muy finos; con estabilidad de agregados moderada; muchos poros tabulares finos y muy finos; densidad aparente 1; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).
AB	22-36/56	Color 10 YR 3/2 marrón grisáceo muy oscuro; textura franco limosa gruesa; contenido medio de materia orgánica (2-4%); ligeramente ácido (6.4); humedad 38.7%; pedregosidad clase 5 (>75%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos y finos, con estabilidad de agregados baja-moderada; abundantes poros tabulares finos; densidad aparente 1; densidad de raíces alta; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).
Bw ₁	36/56-74	Color 10 YR 3/4 marrón amarillento oscuro; textura franca; contenido baja de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente ácido (6.5); humedad 40.4%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos a finos, con estabilidad de agregados moderada; muchos poros grandes tabulares, inped grandes; densidad aparente 1.2; densidad de raíces baja; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).
Bw ₂	74-100	Color 10 YR 4/4 pardo amarillento oscuro; textura franco arcillosa; contenido baja de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente ácido (6.9); humedad 42.8%; pedregosidad clase 5 (>75%); estructura subangular en bloques grandes y medianos, de tamaño medianos chicos; con estabilidad de agregados baja; poros comunes tabulares inped muy grandes; densidad aparente 1.3; densidad de raíces baja; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).
Bw ₃	100-125	Color 10 YR 3/6 marrón amarillento oscuro; textura franco arcillo limosa; contenido baja de materia orgánica (1-2%); muy ligeramente alcalino (7.0); humedad 45.1%; pedregosidad clase 0 (<2%); estructura angular en bloques subangulares, de tamaño medianos y finos; con estabilidad de agregados baja a moderada; poros comunes tabulares inped; densidad aparente 1.4; densidad de raíces muy baja; el límite del horizonte es difuso irregular; presencia de Al activo (xxx).

Apéndice 2. Evaluación edafocológica de los perfiles del suelo.

Megalopolis																													
Localidad:		TB (Antes Acilmeya / Tlaloc)																											
Fecha: 30/04/2019		UTM x: 14Q0494436		UTM y: 2113544																									
Autor: Beatriz/José		msnm: 3190																											
Espesor	Penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		Kfs		CIC		BI	Humus	Nt	Ndis	Pmo											
		Vol-%	Eval.	Vol-%	Eval.	Vol (%)	L/m2	Vol %	L/m2	cm/d	Eval.	cmol/kg	Eval.						cmol/kg	mol/m2	kg/m2	g/m2	g/m2						
1	Muy Buena	54.5	Alto	10	Mediana	28	27.99	44.5	44.5	40-100	Alta	45	Alta	31.5	3.14	2.99	0.1495	0.7	29.9										
3	Muy Buena	54.5	Alto	8.5	Mediana	21.5	64.48	46	46	40-100	Alta	64	Alta	51.2	15.35	8.99	0.4495	2.2	89.9										
2	Muy Buena	54.5	Alto	5.5	Bajo	16.5	33	49	49	100-300	Muy alta	80	Muy alta	64	12.8	6.00	0.3	1.5	60										
2.6	Muy Buena	47.5	Mediano	5.5	Bajo	13.5	35.1	42	42	10-40	Mediana	80	Muy alta	68	21.21	7.8	0.39	2.0	78										
2.4	Muy Buena	47.5	Mediano	5.5	Bajo	13.5	32.4	42	42	10-40	Mediana	80	Muy alta	68	22.84	9.4	0.47	2.35	94										
3	Muy Buena	41.5	Mediano	4.5	Bajo	11.5	34.5	37	37	1-10	Baja	96	Muy alta	76.8	36.86	12	0.6	3	120										
														Drenaje natural:		Excesivo		Suma Humus kg/m2:		Suma Nt:		Suma Ndis		Suma Pmo:					
Profundidad fisiológica (cm): 140 cm Muy Profundo														Erosionabilidad (Ah)		0.39		Suma BI:		112.2		2.359		11.8		471.8			
Espacio radicular efectivo (dm):														Eval.		Muy alta		Eval. Baja-Med		Media		Eval.		Alta		MULL		Eval.	
Comentarios: Raíces muy gruesas a los 80-100 cm. La presencia de un pasto incrementa las raíces en un radio de 10 cm														Eval.		Muy alta		Muy Alta		Muy Alta		Muy Alta		Muy Alta		Muy Alta		Muy Alta	

Megabopolis

Localidad: TuIB (Tulmiac Bosque)

Fecha: 06/08/2019
 UTM X: 0488092.2
 UTM Y: 2115117.22

Autor: Lucy
 msnm: -

Espesor	Penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		Kfs		CIC		BI	Humus	Nt	Ndis	Pmo			
		Vol-%	Eval.	Vol-%	Eval.	Vol (%)	L/m2	Vol %	L/m2	cm/d	Eval.	cmol/kg	g						cmol/kg	kg/m2	
dm	raices	Vol-%	Eval.	Vol (%)	L/m2	cm/d	Eval.	cmol/kg	g	cmol/kg	kg/m2	kg/m2	kg/m2	kg/m2	kg/m2	kg/m2	g/m2	g/m2			
1	Muy Buena	46	Mediano	25	25	37.5	37.5	10-40	Mediana	45	Alta	31.5	3.78	4.56	0.228	1.1	45.6				
1	Muy Buena	46	Mediano	25	25	37.5	37.5	10-40	Mediana	45	Alta	31.5	3.78	4.32	0.216	1.1	43.2				
2	Muy Buena	46	Mediano	25	50	37.5	37.5	10-40	Mediana	60	Alta	48	13.44	8.40	0.42	2.1	84				
1.3	Muy Buena	45.5	Mediano	16.5	21.45	37	37	10-100	Alta	60	Alta	48	8.736	4.73	0.2365	1.2	47.3				
0.9	Muy Buena	45.5	Mediano	16.5	14.85	37	37	10-100	Alta	48	Alta	38.4	4.838	2.52	0.126	0.6	25.2				
Evaluación edafológica																					
										Drenaje natural:		Excesivo		Suma Humus		Suma Nt:		Suma Pmo:			
Profundidad fisiológica (cm): 119 cm Profundo										Erosionabilidad (Ah)		Suma BI:		Suma Humus		Suma Nt:		Suma Pmo:			
										0.56		60.37		37		1.83		366.2			
Espacio radicular efectivo (dm):										Eval.		Muy alta		Baja		Eval.		Altaa		Eval.	
										Eval.		Muy alta		Baja		Eval.		Altaa		Eval.	
Comentarios: Primer horizonte (0-10) abundantes pedazos de carbono. Presencia de hifas en todo el perfil. Tercer horizonte con material más claro/ posiblemente origen coluvial.																					
										Media		Alta		Alta		Alta		Muy Alta			

Megalopolis

Localidad:	TuxB (Tuxtepec-Bosque) Al lado del pasto		
Fecha: 08/09/2019	UTM x: 19°7'11"	UTM y: 99°6'7"	
Autor: Lucy/José	msmni: 3063		

Espesor	Penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		Kfs		CIC		BI		Humus	Nt	Ndis	Pmo				
		Vol-%	Eval.	Vol-%	Eval.	Vol (%)	L/m2	Vol %	L/m2	cm/d	Eval.	cmol/kg	g	cmol/kg	g					mol/m2	kg/m2	kg/m2	g/m2
1.0/1.5	Muy Buena	54.5	Alto	10	Mediana	28	29.74 / 41.99	44.5	44.5	40-100	Alta	60	48	4.79 / 7.19	2.89 / 4.34	0.1445 / 0.217	0.7225 / 1.085	28.9 / 43.4					
1.5/1.3	Muy Buena	54.5	Alto	10	Mediana	28	41.99 / 36.3	44.5	44.5	40-100	Alta	60	48	7.49 / 6.23	4.34 / 3.76	0.217 / 0.188	1.085 / 0.047	43.4 / 37.6					
1.5/1.2	Muy Buena	49.5	Mediano	19	Muy alto	21	31.49 / 25.1	31.5	30.5	100-300	Muy Alta	18	14.4	2.15 / 1.72	3.89 / 3.11	0.1945 / 0.1555	0.9725 / 0.7775	38.9 / 31.1					
3.7	Muy Buena	49.5	Mediano	18	Muy alto	20.5	74	29.5	31.5	100-300	Muy Alta	18	15.3	5.66	6.29	0.3145	1.6	62.9					
4.3	Mediana	54.5	Alto	8.5	Mediano	21.5	92.12	46	46	40-100	Alta	64	51.2	30.71	16.79	0.8395	4.2	167.9					
Evaluación edafológico-ecológica																							
Profundidad fisiológica (cm): 120 cm		Muy Profundo		Suma dCC: 267.5 / 269.6		Suma (CC): 197		Erosionabilidad (Ah): 0.46		Drenaje natural: Excesivo		CIC: Regular		BI: Suma 50.5 / Bi: 51.51		Suma Humus: 34.2 / 34.29		Suma Nt: 1.71		Suma Ndisp: 8.58 / 7.70		Suma Pmo: 342	
Espacio radicular efectivo (dm):		Muy Alta		Muy Alta		Baja		Media		Drenaje natural: Excesivo		CIC: Regular		BI: Mediana		MULL		Eval.		Eval.		Muy Alta	
Comentarios: Primeros horizontes evidencia del trabajo.																							

Megalopolis																					
Localidad:		Tuxtep (Tuxtepec Pasto)																			
Fecha: 07/08/2019		UTM x: 0488244		UTM y: 2114061																	
Autor: Beatriz/José		msnm: 3070																			
Espesor	Penetrabilidad	Volumen total de poros				CA		dCC		CC		Kfs		CIC		BI		Humus	Nt	Ndis	Pmo
		Vol-%	Eval.	Vol-%	Eval.	Vol (%)	L/m2	Vol %	L/m2	cm/d	Eval.	cmol/kg	Eval.	cmol/k g	mol/m2	kg/m2	kg/m2				
0.6	Muy Buena	46	Mediano	8.5	Mediana	25	15	37.5	37.5	10-40	Mediana	60	Alta	48	3.45	2.88	0.144	0.72	28.8		
1.6	Buena	55	Alto	10.5	Mediana	28	44.3	44.5	44.5	40-100	Mediana	60	Alta	48	7.6	5.06	0.253	1.27	50.6		
1.4/3.4	Buena	55	Alto	10.5	Mediana	28	38.8/94.2	44.5	44.5	40-100	Alta	60	Alta	48	6.65/16.15	4.43/10.77	0.2165/0.5385	0.1107/0.2692	44.3/107.7		
3.8/1.8	Muy Buena	43	Bajo	7.5	Mediana	15.5	58.9/27.9	35.5	35.5	10-100	Alta	48	Alta	40.8	18.60/8.81	7.75/3.67	0.3875/0.1835	0.1937/0.0917	77.5/36.7		
2.6	Buena	45	Bajo	4.5	Bajo	12.5	32.17	40.5	40.5	10-40	Mediana	80	Alta	68	22.75	6.35	0.3175	1.59	63.5		
2.5	Muy Buena	45	Bajo	6.5	Bajo	16.5	41.25	38.5	38.5	10-40	Mediana	64	Alta	54.4	19.04	3.5	0.175	0.88	35		
Profundidad fisiológica (cm): 125 cm Muy Profundo		suma dCC: 54.62		suma Vol (%): 230.42/254.62		Erosionabilidad (Ah): 0.58		Drenaje natural: Excesivo		Suma Humus kg/m2: 29.97/32.23		Suma BI: 78.09/77.8		Suma Nt: 1.49/1.61		Suma Ndis: 4.76/4.82		Suma Pmo: 299.7/322.3			
		Eval. Muy alta		Eval. Baja		Eval. Alta		Eval. Alta		MUL		Medianamente Alta		Eval.		Eval.		Eval.			
Espacio radicular efectivo (dm):		Eval. Muy alta		Eval. Baja		Eval. Alta		Eval. Alta		Medianamente Alta		Eval.		Eval.		Eval.		Eval.			
Comentarios: El mantillo se quemó y como remanencias quedan musgos y pequeñas herbáceas. Cilindro 180																					

Evaluación edaf-ecológica

Apéndice 3. Cuadros (Valores de Kfs para cada ensayo de I, prueba de contrastes post hoc de Tukey, valores promedio de ρ_b , %Hi y EM, valores de %Hi y EM para cada ensayo de I).

Cuadro 4. Valores de Kfs en mm/h para cada ensayo de infiltración (valores atípicos en rojo) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal. Se describen los valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación.

	Sitio	# Ensayo	Kfs (mm/h)		Sitio	# Ensayo	Kfs (mm/h)
	Tláloc (TB)	1	527.6		Tláloc (TP)	1	141.6
		2	34.6			2	145.8
		3	163.9			3	48.7
		4	735.7			4	126
		5	146.3			5	155.8
		6	1523.6			6	92.5
		7	1295.7			7	104.2
		8	1102.2			8	143.9
		9	314			9	126
		10	578.8			10	101.6
		11	174.7			11	177.9
BOSQUE	Tulmiac (TuIB)	1	560.9	PASTIZAL	Tulmiac (TuIP)	1	2658.8
		2	554.6			2	228.3
		3	33.1			3	739.8
		4	92.8			4	1290.4
		5	279.1			5	3915.8
		6	262.6			6	1542.8
		7	190.3			7	795.1
		8	261.7			8	570.5
		9	38.8			9	1785
		10	432.9			10	1674.1
		11	381.8			11	1007.3
	Tuxtepec (TuxB)	1	69		Tuxtepec (TuxP)	1	21.7
		2	160			2	17.8
		3	164.4			3	23.5
		4	94.1			4	72.8
		5	80.6			5	37
		6	136.1			6	87.2
		7	50			7	34
		8	202.1			8	40.2
		9	34.8			9	33.8
		10	655.4			10	138.9
		11	155			11	64.6

Cuadro 6. Prueba de contrastes post hoc de Tukey para determinar entre qué sitios hay diferencias de Kfs; en donde se muestra el valor P-ajustado.

Sitio	diff Dif. Media entre 2 grupos	lwr Punto final inferior del intervalo	upr Punto final superior	Valor P-Ajustado
Tulmiac-Tláloc	515.24	72.97	957.51	0.018
Tuxtepec-Tláloc	-254.00	-696.27	188.26	0.35
Tuxtepec-Tulmiac	-769.25	-1211.52	-326.97	0.00

Cuadro 7. Se resaltan en negritas los valores promedio de densidad aparente (ρ_b) en g/cm^3 , porcentaje del contenido de humedad inicial (%Hi), porcentaje del contenido de humedad final (%Hf) y espesor de mantillo en cm, de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal.

			ρ_b (g/cm^3)	Hi (%)	Hf (%)	Espesor Mantillo (cm)
BOSQUE	Tláloc (TB) (n=11)	Mín.	0.23	10.27	42.87	1.0
		Máx.	0.43	35.90	73.33	6.0
		Prom.	0.34	24.55	56.18	3.5
		σ	0.07	8.61	10.72	1.6
		% Cv	21	35	19	44
	Tulmiac (TuB) (n=11)	Mín.	0.36	15.50	38.03	1.0
		Máx.	0.71	35.47	73.90	9.0
		Prom.	0.55	25.38	54.16	4.1
		σ	0.14	5.85	11.51	2.1
		% Cv	25	23	21	52
	Tuxtepec (TuxB) (n=11)	Mín.	0.29	21.47	50.07	2.0
		Máx.	0.68	41.30	70.60	7.0
		Prom.	0.49	31.19	60.41	4.3
		σ	0.10	6.16	6.26	1.6
		% Cv	20	20	10	38
<hr/>						
			ρ_b (g/cm^3)	Hi (%)	Hf (%)	Espesor Mantillo (cm)
PASTIZAL	Tláloc (TP) (n=11)	Mín.	0.42	3.63	45.87	0.0
		Máx.	0.46	7.30	66.47	2.0
		Prom.	0.44	5.67	58.35	0.5
		σ	0.02	1.24	5.89	0.6
		% Cv	-	22	10	121
	Tulmiac (TuIP) (n=11)	Mín.	0.31	49.49	63.67	6.0
		Máx.	0.66	63.66	90.25	15.0
		Prom.	0.50	56.27	72.83	9.0
		σ	0.11	4.41	9.57	2.6
		% Cv	22	8	13	29

Tuxtepec (TuxP) (n=11)	Mín.	0.58	33.13	39.53	1.0
	Máx.	0.77	38.00	77.63	2.0
	Prom.	0.67	35.44	63.48	1.1
	σ	0.05	1.71	11.29	0.3
	%Cv	8	5	18	28

Da: densidad aparente. Hi: Humedad inicial. Hf: Humedad final. Mín: valor mínimo. Máx: valor máximo. Prom: promedio. σ : desviación estándar. % Cv: Porcentaje del coeficiente de variación. n: número de muestras

Cuadro 8. Se describen los valores del porcentaje de humedad inicial y espesor del mantillo (EM) en cm para cada ensayo de infiltración (valores atípicos en rojo) de los sitios estudiados correspondientes a su cobertura vegetal.

	Sitio	# Ensayo	Hi (%)	EM (cm)		Sitio	# Ensayo	Hi (%)	EM (cm)
	Tláloc (TB)	1	21.1	5	Tláloc (TP)	1	4.3	1	
		2	35.9	3		2	6.9	0.3	
		3	21.5	2.5		3	4.3	2	
		4	23.2	4		4	7.3	0.2	
		5	35.9	2.5		5	3.6	0.1	
		6	32.1	3		6	6	0	
		7	10.3	5		7	7.1	0.1	
		8	18.2	6		8	5.9	0.4	
		9	20	1		9	4.9	1	
		10	17.8	5		10	5.7	0.2	
		11	34.2	2		11	6.4	0.2	
BOSQUE	Tulmiac (TulB)	1	26.8	5	PASTIZAL	Tulmiac (TulP)	1	51.7	7
		2	28.4	3.5			2	49.5	8
		3	22.5	1			3	59.9	15
		4	33.2	2.5			4	59.3	12
		5	15.5	5			5	63.7	8
		6	28.6	3			6	57.9	10
		7	23.6	2			7	59.6	9
		8	23.9	4			8	50.8	8
		9	21.5	5			9	55.3	9
		10	19.8	5			10	54.1	7
		11	35.5	9			11	57.2	6
	Tuxtepec (TuxB)	1	30	5	Tuxtepec (TuxP)	1	33.7	1	
		2	41.3	4		2	38	1	
		3	35.1	2		3	33.1	1	
		4	29.2	3		4	35.5	1	
		5	29.7	5.5		5	37.8	1	
		6	40.9	6		6	36.3	1	
		7	23.2	4		7	34.8	2	
		8	31.5	2		8	37.4	1	
		9	21.5	5		9	35.1	1	
		10	29.7	3.5		10	33.8	1	
		11	31.1	7		11	34.2	1	