



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE BIOLOGÍA

Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas

**“PROCESOS Y FACTORES DEL FLUJO DE INFILTRACIÓN EDÁFICA EN
UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO DEL SUR
DE LA CUENCA DE CUITZEO, MICHOACÁN”**

TESIS

Que presenta

BIÓL. JAVIER RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

Como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

(Especialidad en Ecología y Conservación)

Director de tesis: Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez

Morelia, Michoacán, México, Marzo del 2014.



A los seres más hermosos con los que el tiempo y el espacio me hicieron coincidir

Alondra:

Gracias por ser mi motor, mi inspiración y mi bendición de vida.

Dulce María:

Gracias por ser mi complemento, por tu comprensión, paciencia, cariño, amor y por todo el tiempo bonito que haz compartido conmigo.

Mamá:

Gracias por tus bendiciones, por todo tu apoyo, por ser un modelo a seguir para mí. Estoy muy orgulloso de ti.

Papá:

Gracias por cuidarme desde donde te encuentres, algún día nos reencontraremos y no nos separaremos jamás.

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanas (Margarita, Cecilia, Angélica, Imelda, Guadalupe, María Isabel y Alejandra) y hermanos (Luis, Moisés, Alfredo y Rogelio) que siempre me han acompañado en las adversidades y la prosperidad, gracias por todo su apoyo, consejos y por siempre confiar en mí.

Agradezco al CONACyT por la beca otorgada durante el periodo de la maestría, sin la cual no hubiera sido posible la culminación de este proyecto.

Mi más amplio agradecimiento al Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez por inspirarme en la aventura de realizar este proyecto, gracias por todo su apoyo y conocimiento transmitido.

Al Dr. Daniel Geissert, Dr. Alberto F. Gómez-Tagle Rojas, Dr. Philippe Lobit, Dr. Alfredo Amador por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y sus valiosas aportaciones que ayudaron a enriquecerlo.

Gracias a los proyectos de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH: "Caracterización detallada del funcionamiento ecohidrológico para la captación hídrica en una microcuenca de Cuitzeo, Mich." (2011-2013) y "Cartografía de permeabilidad edáfica empleando métodos geoestadísticos a escala de cuenca" (2013-2014). Por el financiamiento de los materiales, reactivos y transporte necesarios para la realización de este proyecto.

Sin dejar de lado, un enorme agradecimiento al INIRENA por brindarme sus instalaciones del Laboratorio de Suelos para la determinación de las propiedades edáficas y preparación de las herramientas y materiales utilizados en campo.

Un agradecimiento muy especial para todos mis compañeros de laboratorio (Dulce María, Caro, Leiz, Isabel, Zareth, Norma, Rafa, Daniel, Edgar) por todo el apoyo brindado, que sin él, probablemente seguiría en campo. También agradecer a Diana y Nayeli por su valiosa colaboración en campo y a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la culminación de este trabajo.

RESUMEN

El flujo de agua en el suelo ha sido estudiado principalmente en ambientes agrícolas, siendo poco conocido en ambientes forestales. Algunos autores han utilizado la conductividad hidráulica saturada (K_s) como descriptor de la capacidad de infiltración del suelo. Diversos estudios han mostrado que ésta es muy sensible a los cambios de uso/cobertura del suelo. En el presente estudio se puso a prueba el paradigma actual que considera que a mayor cobertura vegetal habrá mayor infiltración. Esto a través de cuatro interrogantes: 1) ¿Cómo se modifica la capacidad de infiltración a lo largo de una disturbosecuencia de bosque de pino-encino en una escala temporal?, 2) ¿Cómo se modifican los flujos matriciales y preferenciales a lo largo de la disturbosecuencia en una escala temporal?, 3) ¿Existe un efecto de la copa de los árboles sobre la capacidad de infiltración del suelo? y 4) ¿Qué efecto tienen los contenidos de materia orgánica y humedad sobre la hidrofobicidad del suelo en una escala temporal? Se realizaron 198 ensayos de infiltración insaturada, 99 en temporada seca (2012-2013) y 99 en temporada lluviosa (2013) en un bosque natural de pino-encino (BN), un suelo revegetado naturalmente (SR), un pastizal-matorral (PM) y un suelo desnudo (SD), todos con suelos volcánicos en el sur de la cuenca de Cuitzeo. Los ensayos de infiltración se realizaron junto al tronco, a la mitad y fuera de la copa de los árboles. Se utilizaron infiltrómetros de disco a tensión automatizados aplicando cuatro tensiones. Los parámetros K_s y α del modelo exponencial de Gardner (1958) se estimaron con el método de Longsdon y Jaynes (1993) y las proporciones de los flujos de infiltración con el método de Watson y Luxmoore (1986). La hidrofobicidad se determinó en campo con la prueba de molaridad de etanol (MED) y en laboratorio, con MED y tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT). Durante la temporada seca el gradiente de K_s de mayor a menor en mm/h fue: PM (46.27 ± 27.5) > SR (13.25 ± 5.5) > SD (6.51 ± 3.6) > BN (0.0 ± 0.0) y durante la temporada lluviosa: SD (91.17 ± 35.1) > PM (86.29 ± 52.7) > BN (37.69 ± 28.9) > SR (18.01 ± 7.0). Se detectó hidrofobicidad extrema en el BN (28.5 ± 4.4 % etanol) en la temporada seca y nula capacidad de infiltración. En temporada lluviosa, dicha hidrofobicidad se revierte y aumenta significativamente la K_s del suelo. En temporada seca el gradiente de mayor a menor flujo matricial promedio fue: SD (98.3%) > PM (97.9%) > SR (96.6%) y en flujo preferencial: SR (3.4 %) > PM (2.1 %) > SD (1.7%), mientras que en la temporada lluviosa el gradiente de flujo matricial fue: SD (98.8%) > PM (98.7%) > SR (98.5%) > BN (97.8%) y en flujo preferencial: BN (2.2%) > SR (1.5%) > PM (1.3%) > SD (1.2%). Se confirmó la presencia de islas de infiltración en el suelo revegetado en temporada seca y lluviosa. En el pastizal-matorral las islas de infiltración en temporada lluviosa fueron muy marcadas. En el bosque natural se registraron “islas de hidrofobicidad”. Los altos grados de hidrofobicidad en temporada seca medidos en % etanol fueron: BN (28.5 ± 4.4) > SR (22 ± 8.6) > PM (5.3 ± 4.7) > SD (hidrofílico) y disminuyeron drásticamente en temporada lluviosa: SR (9.58 ± 18.9) > BN (6.97 ± 9.5) > PM (2.93 ± 1.7) > SD (hidrofílico). La hidrofobicidad estuvo en función de la cobertura vegetal y el contenido de humedad edáfica asociado a la estacionalidad de la zona (temporalidad). Los sitios con bosques de pinos (BN, SR) que mostraron repelencias extremas, requieren de altos contenidos de humedad (0.48 y $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivamente) para revertir su hidrofobicidad completamente. Los resultados obtenidos refutan el *status quo* del paradigma e indican que la capacidad de infiltración del suelo estuvo en función del grado de hidrofobicidad y humedad de cada sitio.

Palabras clave: Conductividad hidráulica, capacidad de infiltración, infiltrómetros de disco, hidrofobicidad, temporalidad, islas de infiltración.

ABSTRACT

The flow of water in the soil has been studied mainly in agricultural environments, still little known in forest environments. Some authors have used the hydraulic conductivity saturated (K_s) as describer of the infiltration capacity of a soil. Several studies have shown that it is very sensitive to changes of use / land cover. In the present study tests the current paradigm in which more vegetation will be greater infiltration. This through four questions: 1) How the infiltration capacity along a disturbosecuencia of pine -oak forest on a time scale is modified?, 2) How are the modified matrix and preferential flow along the disturbosecuencia on a time scale? , 3) Is there an effect of the treetops on the infiltration capacity of the soil? and 4) What is the effect of organic matter content and moisture on soil hydrophobicity on a time scale? 198 trials of unsaturated infiltration, 99 in dry season (2012-2013) and 99 were conducted in the rainy season (2013) in a natural pine-oak forest (BN) , a soil naturally revegetated (SR) , a grassland - scrub (PM) and bare soil (SD), all with volcanic soils in south basin Cuitzeo. The infiltration tests were conducted by the stem, and half out of the treetops. Disc infiltrometer used automated voltage applied four strains. The K_s and α parameters of the exponential model and Gardner (1958) were estimated using the method of Longsdon and Jaynes (1993) and the proportions of the flows of infiltration using the method of Watson and Luxmoore (1986). The hydrophobicity was determined in field testing molarity of ethanol (MED) and laboratory, with MED and breakthrough water drop penetration time (WDPT). During the dry season the gradient of high to low K_s in mm/h was: PM (46.27 ± 27.5) > SR (13.25 ± 5.5) > SD (6.51 ± 3.6) > BN (0.0 ± 0.0) and during the rainy season : SD (91.17 ± 35.1) > PM (86.29 ± 52.7) > BN (37.69 ± 28.9) > SR (18.01 ± 7.0). Extreme hydrophobicity was detected in the BN (28.5 ± 4.4 % ethanol) in the dry season no infiltration capacity. In rainy season, that hydrophobicity is reversed and significantly increases soil K_s . In dry season the gradient of high to low average flow matrix was: SD (98.3 %) > PM (97.9 %) > SR (96.6 %) and preferential flow : SR (3.4 %) > PM (2.1 %) > SD (1.7 %) , while in the rainy season the flow gradient matrix was: SD (98.8 %) > PM (98.7 %) > SR (98.5 %) > BN (97.8 %) and preferential flow : BN (2.2 %) > SR (1.5 %) > PM (1.3 %) > SD (1.2 %). The presence of islands of infiltration into the soil revegetated in dry and rainy season was confirmed. In the pasture - scrub islands infiltration detected in the rainy season were very marked. In the natural forest "islands of hydrophobicity" were recorded. The high degree of hydrophobicity in dry season % ethanol were measured: BN (28.5 ± 4.4) > SR (22 ± 8.6) > PM (5.3 ± 4.7) > SD (hydrophilic) and decreased dramatically in the rainy season: SR (9.58 ± 18.9) > BN (6.97 ± 9.5) > PM (2.93 ± 1.7) > SD (hydrophilic). The hydrophobicity was a function of plant cover and soil moisture contents (temporality). The pine forest sites (BN, SR) showed extreme repellencies, require high moisture contents (0.48 and $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectively) to completely reverse their hydrophobicity. The results refute the *status quo* paradigm. The infiltration capacity of the soil was a function of the degree of hydrophobicity and humidity of each site.

Keywords: Hydraulic conductivity, infiltration capacity, disk infiltrometer, hydrophobicity, temporality, infiltration islands.

CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, MARCO TÉORICO Y ACOTAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.3 HIPÓTESIS.....	13
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.4.1 Objetivos particulares.....	14
CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO.....	15
2.1 Ubicación.....	15
2.2 Clima.....	16
2.3 Geología, topografía y suelos.....	16
2.4 Caracterización de los horizontes.....	17
2.5 Hidrología.....	17
2.6 Descripción de los distintos ambientes e historia de uso de suelo.....	17
CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 Diseño de muestreo para la obtención de la infiltración insaturada superficial y el efecto de la copa de los árboles sobre ésta.....	20
3.2 Caracterización edáfica de la disturbosecuencia.....	26
3.3 Determinación de la repelencia real y potencial y valores críticos de humedad.....	27
3.4 Análisis de datos y procesamiento estadístico.....	28
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	30
4.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA K_s EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO DEL SUR DE LA CUENCA DE CUITZEO.....	30
4.1.1 K_s y α superficial en temporada seca y lluviosa en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino.....	30

4.1.2 Porosidad efectiva y proporciones del flujo de infiltración superficial en la disturbosecuencia de estudio en una escala temporal	34
4.1.3 Resumen estadístico de las propiedades edáficas determinadas en campo y laboratorio.	37
4.1.4 Relación de la K_s con las variables fisicoquímicas del suelo	38
4.2 EFECTO DE LA COPA DE LOS ARBOLES SOBRE LA K_s DEL SUELO EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO EN TEMPORADA SECA Y LLUVIOSA	44
4.2.1 Efecto de la copa de los árboles sobre la K_s del suelo en la disturbosecuencia de estudio	44
4.2.2 Efecto de la copa de los árboles/arbustos sobre la variación de algunas propiedades edáficas en la disturbosecuencia de estudio	47
4.3 DETERMINACIÓN DE LA REPELENCIA REAL Y POTENCIAL EN LA DISTURBOSECUENCIA Y SUS VALORES CRÍTICOS DE HUMEDAD ASOCIADOS	52
4.3.1 Repelencia real con MED y humedad volumétrica en temporada seca y lluviosa	52
4.3.2 Relación entre contenido de humedad y repelencia potencial en la disturbosecuencia .	55
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	59
5.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA K_s EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO DEL SUR DE LA CUENCA DE CUITZEO	59
5.2 EFECTO DE LA COPA DE LOS ARBOLES SOBRE LA K_s DEL SUELO EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO EN TEMPORADA SECA Y LLUVIOSA	70
5.3 CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO	83

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen estadístico de los parámetros K_s y α para cada uno de los sitios muestreados en temporada seca y lluviosa.	31
Cuadro 2. Categorías por textura/estructura del suelo para valores estimados de α (Tomado de Elrick y Reynolds, 1992).	31
Cuadro 3. Resumen estadístico del ANOVA de dos vías para probar el efecto de la temporada y el sitio sobre la K_s	33
Cuadro 4. Porosidad efectiva y proporción de los flujos de infiltración en cada ambiente.	35
Cuadro 5. Promedio y desviación estándar de las propiedades edáficas medidas en los diferentes sitios y pruebas de TukeyHSD para distintas variables fisicoquímicas entre ambientes.	37
Cuadro 6. Correlaciones significativas entre el $\ln K_s$ en temporada seca y lluviosa con las propiedades del suelo en cada ambiente.	39
Cuadro 7. Parámetros estadísticos de las intensidades de los eventos de precipitación de la zona a los 10 y 30 minutos e intensidad total del evento.	40
Cuadro 8. K_s y α promedio para cada una de los radios de copa de los árboles/arbustos en la disturbosecuencia de estudio en temporada seca y lluviosa.	44
Cuadro 9. Promedios y desviaciones estándar de algunas propiedades edáficas para cada uno de los radios de copa de los árboles/arbustos en la disturbosecuencia de estudio.	49
Cuadro 10. Efecto de la copa de los árboles sobre la severidad de la repelencia real en los sitios con cobertura vegetal en temporada seca y lluviosa.	55
Cuadro 11. K_s media en distintos usos/coberturas de suelo reportadas en estudios donde se utilizó la técnica de infiltrómetros de disco a tensión.	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Infiltración acumulada en el tiempo durante una tensión aplicada. Se observa la fase transitoria (Ft) y fase estacionaria (Fe).	3
Figura 2. Ubicación del área de estudio y los sitios de muestreo dentro de la cuenca de Cuitzeo.	15
Figura 3. Diseño de muestreo de los ensayos de infiltración en campo.	20
Figura 4. Uso de los infiltrómetros de disco-tensión automatizados para los ensayos de infiltración en campo en cada sitio.	22
Figura 5. Determinación de la repelencia real (a), potencial (b) y contenido de humedad gravimétrico (c).	28

Figura 6. Gráficas de caja y bigotes que muestran los resultados de la prueba de TukeyHSD para la K_s superficial en temporada seca y lluviosa entre sitios.	32
Figura 7. Gráfica de caja y bigotes que muestran los resultados de la prueba de TukeyHSD para el valor de α superficial en temporada seca y lluviosa entre sitios.....	33
Figura 8. Frecuencias de los eventos de precipitación determinados a los 10 y 30 minutos de intensidad y la intensidad total de los eventos.....	40
Figura 9. Frecuencias de los eventos de precipitación determinados a los 10 minutos de intensidad y el promedio de K_s obtenido en cada sitio durante la temporada seca y lluviosa.	41
Figura 10. Comparación de las K_s registradas en cada sitio y los valores medio, máximo y mínimo de las intensidades de las precipitaciones a los 10 minutos en temporada seca y lluviosa.	42
Figura 11. Gráfica de caja y bigotes que muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la K_s en la disturboscuencia en temporada seca.....	45
Figura 12. Gráfica de caja y bigotes que muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la K_s en la disturboscuencia en temporada lluviosa.	46
Figura 13. Se muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la densidad aparente en la disturboscuencia.	48
Figura 14. Efecto de la copa de los árboles sobre la cantidad de materia orgánica edáfica en la disturboscuencia.	50
Figura 15. Efecto de la copa de los árboles sobre el espesor de hojarasca en la disturboscuencia.	50
Figura 16. Efecto de la copa de los árboles sobre el pH en la disturboscuencia.	51
Figura 17. Concentraciones de etanol y humedades registradas en campo en cada uno de los sitios durante la temporada seca y lluviosa.....	53
Figura 18. Correlación entre la hidrofobicidad y el contenido de materia orgánica de los sitios en temporada seca y lluviosa.	53
Figura 19. Gráfica de caja y bigotes que muestra el cambio de la repelencia del suelo con respecto a la humedad volumétrica desde saturación hasta el secado de las muestras expresado en intervalos de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ se incluyen los datos de todos los sitios.....	55
Figura 20. Comportamiento de la hidrofobicidad expresado en concentraciones de etanol (%) a través del cambio del contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3) expresado en clases para cada uno de los sitios.	56
Figura 21. Comportamiento de la hidrofobicidad expresado en persistencia (WDPT, seg) a través del cambio del contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3) expresado en clases para cada uno de los sitios.	57

EL INICIO

Inicialmente este trabajo fue planteado bajo el título “Partición del flujo de infiltración edáfica en bosques de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo y sus ambientes de transformación” cuyo objetivo principal era determinar la partición del flujo matricial vs. preferencial en una disturboscuencia compuesta por cuatro ambientes: Bosque natural de pino-encino, Suelo revegetado naturalmente, Pastizal-Matorral y Suelo desnudo. Sin embargo, durante el muestreo de infiltración en la temporada seca (2012-2013) se observó que en el sitio de bosque la infiltración era nula. De hecho, el agua escurría sobre la superficie del suelo sin penetrar en él. Este hecho cambió drásticamente la perspectiva del trabajo ya que contravino mucho de lo que había sido planteado y se había encontrado algo que comúnmente no se reporta en la literatura para ambientes forestales de México. Por ello se consideró pertinente incluir la parte de hidrofobicidad que no había sido contemplada inicialmente. A raíz del muestreo de infiltración “fallido” antes mencionado una parte considerable del tiempo y recursos se destinaron a entender que ocurría. El diseño de muestreo cambió de solo una época, a dos épocas para realizar el seguimiento de los sitios y se incluyó una parte destinada a describir y caracterizar la hidrofobicidad del suelo.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, MARCO TÉORICO Y ACOTAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El flujo de agua en el suelo ha sido estudiado a lo largo de varias décadas básicamente para fines agrícolas, ya que conocer el comportamiento del agua en el suelo permite hacer eficientes los sistemas de riego y calcular el transporte de lixiviados. Sin embargo, es uno de los procesos menos entendidos dentro del ciclo hidrológico especialmente en ambientes no dedicados a la agricultura (Sobieraj, 2003). Lin (2008a) argumenta que existe un vacío cognitivo que explique los procesos de interacción entre la hidrósfera y pedósfera. Esto requiere ser abordado desde una perspectiva interdisciplinaria y transdisciplinaria. Lin (2003) propone el término Hidropedología para definir a la disciplina que se centra en la interacción de los procesos pedológicos e hidrológicos y los mecanismos que imperan en estos ambientes a lo largo del tiempo y el espacio (Lin, 2003; Lin et al., 2006a, Lin et al., 2010b). Desde esta perspectiva, la Hidropedología tiene como objeto de estudio la zona crítica terrestre definida por el Comité Nacional de Investigadores sobre los Recursos Básicos en Ciencias de la Tierra (2001) como la superficie externa de la tierra incluyendo desde la parte alta del dosel vegetal hasta la parte superior de los acuíferos subterráneos. Esta zona se denomina crítica porque determina la subsistencia de vida y provee recursos para todas las actividades humanas. Por tal motivo, la Hidropedología estudia el agua desde una perspectiva ambiental compleja considerando interacciones entre el agua y el suelo, la roca, el aire y los recursos bióticos en los ambientes cercanos a la superficie terrestre (Lin et al., 2010b).

Desde este punto de vista, el suelo es el control fundamental de la zona crítica ya que actúa como una geomembrana viviente a través de la cual el agua, solutos, energía, gases, sólidos y vida de los organismos interactúan dinámicamente con la atmósfera, hidrósfera, biósfera y litósfera para crear un ambiente sustentable de vida. De esta manera, la interacción del suelo y agua frecuentemente moldea la interface entre los factores bióticos y abióticos en diversos ecosistemas (Lin, 2010a).

Este trabajo emplea una perspectiva hidropedológica donde la interacción entre el suelo y el agua es descrita por el proceso de infiltración definido por Porta y colaboradores (1999) como el paso del agua de la superficie al interior del suelo que depende de las propiedades y

condiciones del medio poroso. La velocidad con la que ocurre este proceso se define como velocidad de infiltración o tasa de infiltración (Campos-Aranda, 1987). Por su parte, el concepto de capacidad de infiltración se aplica al estudio de la infiltración para diferenciar el potencial que tiene el suelo de absorber agua a través de su superficie en términos de lámina acumulada y tasa real de infiltración que se produce cuando hay disponibilidad de agua para penetrar en el suelo.

Una curva de tasa real de infiltración solamente coincide con la curva de capacidad de infiltración cuando la precipitación o escurrimiento superficial de otras áreas, tiene una intensidad superior o igual a la capacidad de infiltración. Si la precipitación presenta una intensidad menor a la capacidad de infiltración, toda el agua penetra el suelo, provocando una progresiva disminución de su capacidad de infiltración, ya que el suelo se está humectando. Si la precipitación continúa, la infiltración real iguala a la capacidad de infiltración, que pasa a decrecer exponencialmente en el tiempo tendiendo a un valor mínimo. La parte no infiltrada de la precipitación escurre superficialmente hacia áreas más bajas, pudiendo infiltrar nuevamente, si existen condiciones. Cuando termina la precipitación y no hay más aporte superficial, la tasa de infiltración real se hace cero rápidamente y la capacidad de infiltración superficial vuelve a crecer, porque el suelo continúa perdiendo humedad hacia las capas más profundas, además de las pérdidas por evapotranspiración. Los valores de infiltración dependen entonces del espacio y del tiempo (Porta, 1999).

A su vez, la velocidad de infiltración de un suelo a través de su espacio poroso depende de la conductividad hidráulica (K_s), por tal motivo autores como Wit (2001) y Gómez-Tagle et al., (2011) la utilizan como descriptor de la capacidad de infiltración. Sin embargo, la tasa de infiltración base depende de la conductividad hidráulica saturada (K_s) que se define como la velocidad de un flujo de agua en el suelo con su espacio poroso lleno de agua y la carga hidráulica es igual a la longitud de la sección analizada (Walker y Zhang, 2002). La K_s es entonces una medida de la velocidad con la que el agua atraviesa una sección del sistema poroso del suelo en condiciones de saturación (Amoozegar, 1992; Elrick y Reynolds, 1992). Esta variable hidrofísica se puede medir en laboratorio de distintas formas, la más común es utilizando núcleos de suelo inalterados en los que se hace pasar agua a carga hidráulica constante (Wu et al. 1999). En campo, comúnmente se utilizan simuladores de lluvia (Poulenard et al., 2001), infiltrómetros o permeámetros donde se mide el agua directamente al

interior del suelo (Gómez-Tagle, 2008; Gómez-Tagle et al., 2011; Elrick y Reynolds, 1992; Matula, 2003; Ziegler et al., 2004; Tobón et al., 2004) y posteriormente se utilizan soluciones matemáticas para estimar la conductividad hidráulica. Esta conductividad hidráulica se denomina conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}), generalmente tiene valores más pequeños que la K_s debido a que cuando se forma el bulbo de humedad en campo, queda cierta cantidad de aire atrapado en el suelo y no permite una condición de saturación completa (Constanz et al., 1988; Stephens et al., 1987). Sus valores se consideran como una mejor aproximación de lo que ocurre durante los eventos de precipitación de forma natural (Elrick y Reynolds, 1992). Por el motivo anterior, autores como Mallants y colaboradores (1997) otorgan preferencia a los valores de K_{fs} sobre los de K_s debido a que son más representativos de la realidad por no ocasionar disturbios en la superficie del suelo como lo ocurrido en los núcleos que se transportan a laboratorio.

La K_s puede ser estimada a partir de mediciones de infiltración insaturada en campo cuando los poros del suelo no están llenos totalmente de agua y tienen cierto volumen de aire. La conductividad hidráulica insaturada (Kh) se obtiene aplicando presiones negativas (tensiones) y calculando la lámina acumulada en el tiempo y su correspondiente tasa de infiltración en dos fases: transitoria (componente capilar del suelo) y estacionaria (componente gravitacional). Esta última permite obtener las pendientes de cada tensión aplicada para obtener los parámetros de α y K_s de la ecuación de Gardner (1958), (Gómez-Tagle et al., 2011), (Figura 1).

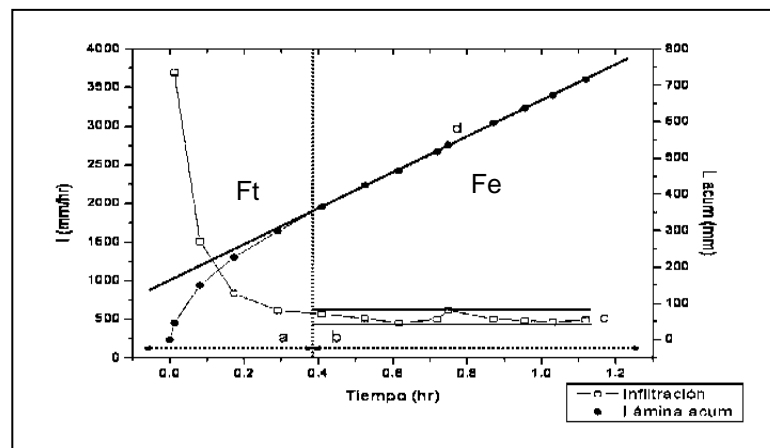


Figura 1. Infiltración acumulada en el tiempo durante una tensión aplicada. Se observa la fase transitoria (Ft) y fase estacionaria (Fe).

En el presente trabajo se calculó el flujo de infiltración $Q(h)$ para distintas tensiones aplicadas con infiltrómetros de disco a tensión tipo INDI-INECOL. Posteriormente se calculó la K_s a partir de mediciones de flujo de infiltración utilizando el modelo de Gardner (1958) como se explica en la sección de los métodos. Para realizar los ajustes y obtener los parámetros de α y K_s del modelo de Gardner (1958), se utilizó el método matemático de ajuste simultáneo no lineal de Logsdon y Jaynes (1993), el cual requiere de las pendientes o tasas de infiltración en flujo estacionario ($Q(h)$) para las diferentes tensiones. Una vez obtenidos los parámetros anteriores se calcularon la porosidad efectiva y conducente utilizando el método de Watson y Luxmoore (1986) que se explica en la sección de métodos.

La K_s es un buen descriptor de la capacidad de infiltración y sensible a las alteraciones producidas por cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo (Wit, 2001; Perkins *et al.* 2007; Zimmermann y Elsenbeer, 2008; Gómez-Tagle, 2008, 2009, 2011), que pueden ser de origen natural o antrópico.

Además de la cubierta vegetal, otro factor determinante en la capacidad de infiltración de un suelo son las precipitaciones. En un evento de precipitación en un bosque, una parte del agua es interceptada por el dosel (Lee, 1980; Bruijnzeel, 2004) Esta agua puede redistribuirse a través del dosel como precipitación directa, escurrir por los troncos como escurrimiento fustal o caulinar, o evaporarse directamente desde la superficie de los troncos y la hojarasca (pérdidas por interceptación) (Hewelett y Nutter, 1969; Grimm y Fassbender, 1980; Bond *et al.*, 2007). Por otro lado, las precipitaciones que alcanzan el suelo y se infiltran modifican la reserva de agua edáfica y pueden ser utilizadas por la vegetación (transpiración) o percolar hacia las capas inferiores del suelo como infiltración neta del sistema (Kwicklis *et al.*, 2005; Echeverría *et al.*, 2007; Guan *et al.*, 2010; Nívar, 2011).

La infiltración promedio crece con la intensidad de la precipitación, debido a una extensión mayor de la zona saturada por encharcamiento y la extensión de esta zona saturada por la lámina de escorrentía recién formada (Dunne *et al.*, 1991). Además hay una gran variabilidad de la K_s en suelos cubiertos por bosque aun tratándose del mismo tipo de suelo (Buttle y House, 1997). Inclusive, esta variación también depende de la temporalidad que modifica los contenidos de humedad edáfica previos a las mediciones de infiltración en campo, por lo general con valores más altos de K_s en temporada lluviosa que en temporada seca (Zhao

et al., 2014).

Aparte de la cubierta vegetal, las precipitaciones y la temporalidad, la facilidad del flujo también depende de propiedades edáficas como la densidad aparente, la textura, la cantidad y tipo de materia orgánica, la estructura y el contenido de humedad principalmente (Porta *et al.*, 1999). De acuerdo con Reynolds y Elrick (1991) la K_s está determinada por las características de tamaño y conectividad del espacio poroso del suelo.

Debido a la alta variación de éstas propiedades, la partición del flujo de infiltración tiene dos dominios. Los micro y mesoporos conforman el dominio matricial que está determinado por la distribución granulométrica, la densidad aparente y la cantidad y calidad de materia orgánica (Reynolds y Elrick, 1991; Logsdon y Jaynes, 1993). Mientras que los macroporos comprenden el dominio del flujo rápido a través de canales preferenciales. Este dominio está conformado por la macro y meso estructura del suelo y los canales generados por bioturbación animal o vegetal (Langner *et al.*, 1999; Pachepsky y Rawls, 2003; Luo *et al.*, 2008), las grietas formadas por humectación y secado del suelo y los poros interagregados de forma irregular (Luo *et al.*, 2008). En este sentido, las raíces vivas y su espacio inmediato circundante, los canales de raíz dejados por raíces muertas y las madrigueras de meso y macroinvertebrados son los principales mecanismos biogénicos de formación de macroporos (Nuutinen *et al.*, 1998; Pitkanen y Nuutinen, 1998; Luo *et al.*, 2008; Colloff *et al.*, 2010). La cantidad y dimensión de los macroporos asociados a la fauna edáfica están determinados por la estructura y composición de la comunidad de macroinvertebrados (Colloff *et al.*, 2010) y ésta a su vez está determinada por la composición y estructura de la comunidad vegetal (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2007; Negrete-Yankelevich *et al.*, 2008a).

Sin embargo, el espacio poroso modificado por la vegetación (Li y Shao, 2006) y la bioturbación edáfica ocasionada por meso invertebrados hasta mamíferos medianos (Sobieraj, 2003) en ambientes naturales, exhiben patrones de variación espacial complejos de la K_s y diferentes en zonas con un mismo grupo de suelo y se ha reportado que la estructura de la vegetación puede definir la variación espacial (Elsenbeer, *et al.*, 1999).

La proporción del flujo preferencial respecto al flujo total de infiltración en el suelo varía dependiendo de los factores asociados a la macroporosidad y puede comprender entre el 2.4 y 27% del flujo total (Cheng *et al.*, 2007; Eguchi y Hasegawa, 2008) y puede exceder hasta 5700 veces la velocidad del flujo matricial (Cheng *et al.*, 2007).

Guan et al., (2010) explican que los suelos con horizontes arcillosos sin macroporos inducidos por raíces, actúan como una capa que impide la recarga de agua subterránea. Esto resulta en una percolación menor al 1% de la precipitación anual. Sin embargo, cuando estos mismos suelos presentan canales de raíz, la percolación puede llegar hasta un 20% de la precipitación anual. Colloff y colaboradores (2010) demostraron que la capacidad de infiltración incrementa significativamente al aumentar la cantidad de macroporos como respuesta a la edad de las reforestaciones en terrenos previamente pastoreados.

Dentro de la perspectiva anterior, Eguchi y Hasegawa (2008) encontraron que suelos considerados como ejemplos clásicos de flujo matricial en Japón (Andisol, Hydric Hapludand) mostraron un componente preferencial superficial (48.7 %) dos veces mayor al flujo matricial (24.1%) lo cual provoca una rápida percolación a los horizontes subyacentes después de terminados los eventos de precipitación.

Gómez-Tagle (2008) argumenta que en ambientes con altas intensidades de precipitación (zonas templadas húmedas) con suelos arcillosos sobre una capa de roca permeable, la penetración de raíces profundas asociadas a los elementos arbóreos de la vegetación puede ser determinante para que ocurra percolación.

Sin embargo, las modificaciones de las propiedades hidrofísicas del suelo son más severas cuando están ligadas a su uso como resultado de los factores antrópicos y que éstos afectan a las capas superficiales (Matula, 2003; Perkins, *et al.*, 2007; Trimble y Mendel, 1995; Zimmermann, *et al.*, 2006). En este sentido, la K_s ha mostrado ser un indicador sensible a los disturbios producto del cambio de uso del suelo como las actividades agrícolas (Matula, 2003), pecuarias (Singleton, *et al.*, 2000) y modificaciones a la cobertura vegetal (Perkins, *et al.*, 2007; Zimmermann, 2006) que se relacionan directamente con las características intrínsecas del espacio poroso del suelo (Nanía, 2002).

Tobón y colaboradores (Tobón et al., 2004) realizaron ensayos de infiltración empleando infiltrómetros de disco a tensión y anillo sencillo. Compararon entre una zona de bosque nublado de montaña (bosque mesófilo de montaña *sensu* Rzedowski) en Costa Rica y una zona desmontada y otra empleada como potrero. Encontraron que la cobertura del terreno tiene un mayor efecto sobre la variación espacial de propiedades clave del suelo que inciden sobre el movimiento de agua que la unidad taxonómica o la textura. En contraste, Gómez-Tagle (2009) utilizando infiltrómetros de anillo sencillo, encontró que no hay diferencias en la

K_s entre una plantación de *Cupressus* y una cárcava desnuda, por lo que sustenta la hipótesis de que los valores de K_s en horizontes superficiales están influidos por el efecto de la historia de uso de suelo, más que por el efecto de la cubierta vegetal que presenten en la actualidad.

Zimmermann y Elsenbeer (2008) utilizaron un permeámetro de profundidad (*Compact Constant Head permeameter*) para medir la infiltración en campo y encontraron que la K_{fs} disminuye conforme se aumenta la profundidad del suelo. Obtuvieron que la K_{fs} no difiere entre sitios perturbados y el bosque natural, por tanto, argumentan que la variación espacial de K_{fs} está condicionada a todos los factores endógenos y exógenos de la matriz superficial que modifiquen la macroporosidad del suelo.

En un estudio realizado por Guevara (2009) en la subcuenca de Atécuaro-Loma Caliente, perteneciente a la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán, encontró que no existen correlaciones positivas entre la densidad aparente y la estabilidad de agregados con respecto a la K_s en un terreno agrícola y un bosque de pino, sin embargo los resultados muestran que en el caso del bosque, los valores más altos de K_s (13 837 mm/ hr) están asociados a las pequeñas zonas de difícil acceso con estructura completa de suelo poco perturbado y altos niveles de bioturbación por macro invertebrados. Los valores más bajos (38 mm/hr) están asociados a un antiguo camino de extracción forestal y los valores intermedios (467 mm/hr) asociados a la compactación por actividad pecuaria. En el caso del campo agrícola, la actividad biológica de tuzas provocó los valores más altos de todo el muestreo (32 533 mm/hr) que predominaron sobre los valores intermedios asociados a la vegetación herbácea de *Bacharis sp.* (576 mm/hr) y el suelo desnudo compactado por ganado (114 mm/hr).

En esta misma zona, Carlón-Allende y Mendoza (2007) quienes generaron cartografía hidropedológica basada en el cálculo de la infiltración, realizaron nueve ensayos distribuidos en Umécuaro empleando una técnica de doble anillo y reportaron diferencias importantes entre grupos de suelo asociadas a diferencias en la cobertura y tipo de roca. Debido a la reducida cantidad de ensayos, los autores no pudieron explicar la compleja variación dentro de la cuenca. En estos ambientes, la influencia del uso de suelo o cubierta vegetal sobre la variación espacial de K_s decrece a medida que se pierdan las capas superficiales por efectos erosivos y afloren las capas sub-superficiales producto de la historia de uso del suelo (Gómez-Tagle, 2008; Gómez-Tagle, *et al.*, 2009).

De forma que, la historia de uso del suelo puede modificar la estructura de las comunidades vegetales (Zepeda, 2008) y la tendencia natural en el desarrollo de la estructura y porosidad del suelo como base de sus funciones hidrológicas, ecológicas o ambientales (Blum, 2004). Por ello el tiempo de recuperación después de alguna transformación está relacionado con la intensidad de la perturbación, los patrones de revegetación y el grupo de suelo (Ziegler, *et al.*, 2006).

Justamente el proceso de revegetación natural que modifica las propiedades hidrofísicas del suelo por la adición de materia orgánica, puede repercutir en la modificación de los flujos de infiltración en suelos sin cubierta vegetal. Sin embargo, se conoce poco al respecto, ya que los esfuerzos de investigación se han dirigido más a suelos con plantaciones (Oyarzún, 2011). Por tal motivo, en el presente trabajo se evaluaron propiedades hidrofísicas de un suelo revegetado naturalmente en el contexto de una disturbosecuencia, término utilizado para referirse a una secuencia de disturbio que parte de un ambiente con bajo disturbio hacia uno altamente disturbado, el concepto que aquí se propone es análogo opuesto al de sucesión vegetal. En este sentido, Li y Shao (2006) estudiaron los cambios en las propiedades físicas del suelo después de una recuperación natural de la vegetación en una secuencia cronológica de 150 años y encontraron mayores valores de K_s en zonas dominadas por matorrales y bosques de *Quercus* que en zonas con pastizales y actividades agropecuarias. Atribuyen las principales diferencias a la mayor densidad de especies leñosas y su influencia sobre la matriz superficial del suelo y la calidad de los ecosistemas.

A lo largo de una disturbosecuencia, existen ambientes intermedios como los matorrales o pastizales que generan parches de vegetación sin un continuo de cubierta vegetal como se observaría en un bosque. Estos parches de vegetación podrían modificar en mayor medida las propiedades hidrofísicas del suelo como se ha observado en ambientes áridos (Janeau, *et al.*, 1999) y semiáridos (Descroix, *et al.*, 2007; Descroix, *et al.*, 2001) del centro y norte del país. En estos suelos la influencia de la vegetación sobre la K_s que generalmente se encuentra en parches, es más clara que en zonas con suelo desnudo. Esto es debido a las modificaciones que genera la materia orgánica debajo de las copas de los árboles creando islas de fertilidad como lo encontrado por Harradine (1954) en bosques mixtos de *Pinus poderosa* y *Quercus kelloggii* de California que tienen menos nitrógeno en el suelo fuera de la copa de los árboles que bajo sus copas (citado en Zinke, 1962). Con este mismo enfoque, también en bosques de California,

Zinke (1962) encontró que el pH es más bajo cerca del tronco de los árboles y aumenta hacia fuera de la copa, debido a la influencia relativa de la descomposición de la lignina de la corteza, hojas y materia orgánica no lignificada en las áreas abiertas entre árboles. Por lo que, cada árbol tiene una influencia circular directamente proporcional al área de la copa sobre el suelo superficial.

Por su parte, Perroni (2007) encontró que las islas de fertilidad formadas por *Prosopis laevigata* almacenan y transforman mayor concentración de C y N en el suelo a similares tamaños de islas de fertilidad formadas por *Cercidium praecox* en un ecosistema semiárido del centro de México. Sin embargo, son escasos los trabajos que evalúan la modificación de la K_s bajo estas premisas. Debido a esto, el presente trabajo propone el estudio de islas de infiltración, término aquí utilizado para referirnos a un gradiente en la capacidad de infiltración del suelo que está en función del área de la copa de los árboles/arbustos siendo mayor junto al tronco y menor fuera de la copa. Empleando esta perspectiva, Zapata y Manzano (2008) utilizando una técnica de doble anillo determinaron la K_s en tres especies cultivadas y tres forestales a distintas distancias del tronco de los árboles y encontraron que la infiltración decrece conforme aumenta la distancia al árbol, y que a mayor altura de éste, mayor es la alteración del suelo. Estos autores concluyen que la cantidad de materia orgánica asociada a cada una de las especies arbóreas está íntimamente relacionada con la modificación de la capacidad de infiltración.

Dentro de los ambientes naturales o revegetados antrópicamente, la vegetación aporta materia orgánica cuyas características dependen de las especies vegetales. Jaramillo (2006) menciona que el tipo de materia orgánica aportado por la vegetación, humedad del suelo y el material parental pueden ocasionar hidrofobicidad en los suelos impidiendo la infiltración y generando mayores tasas de escorrentía y erosión (común en suelos de origen volcánico). Por tal motivo, en el presente estudio se evaluó la hidrofobicidad como un componente importante que determina la capacidad de infiltración.

La hidrofobicidad se puede determinar mediante dos métodos comunes reportados en la literatura: como severidad de la repelencia con el método del MED (*Molarity of Ethanol Droplet*) propuesto por Roy y McGill (2002) o como persistencia de la repelencia con el método del WDPT (*Water Drop Penetration Time*) propuesto por Dekker y Ritsema (1994).

Según Dekker y Ritsema (1994) la repelencia real, es aquella que se presenta en el suelo en condiciones de campo y la repelencia potencial se manifiesta cuando el suelo es sometido al secado al aire o en estufa en el laboratorio. Por otra parte Dekker (1998) señala que el contenido crítico de humedad del suelo debajo del cual hay repelencia al agua y por encima del cual el suelo es humectable, resulta ser un parámetro útil en los estudios de repelencia al agua.

Dicho fenómeno es causado principalmente por dos tipos de compuestos químicos: hidrocarburos alifáticos (compuestos no polares casi insolubles en agua) y compuestos anfifílicos (una parte terminal polar y otra no polar) productos de la descomposición de la hojarasca depositada en el suelo (Doerr *et al.*, 2000). Estos compuestos se originan por factores asociados a las condiciones naturales del sitio como la composición florística (géneros como *Pinus*, *Acacia*, *Quercus*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *etc.*), y los microorganismos descomponedores (más de 60 especies de hongos) o bien por actividades antrópicas como los incendios o la contaminación con derivados del petróleo (DeBano, 1981, 2000; Dekker & Ritsema, 2000; Roy & McGill, 1998). DeBano y Krammes (1966) mencionan que la repelencia varía ampliamente, e inducida por el fuego, generalmente pueden ser más grave que en un suelo sin este tipo de disturbio.

En suelos hidrofóbicos, el agua de lluvia tiende a permanecer en la superficie del horizonte hidrófobo (Doerr *et al.*, 2000) y circula a lo largo de ella a favor de la pendiente (Martínez-Zavala *et al.*, 2009; Wallach y Jortzick, 2008). Sin embargo, la presencia de discontinuidades, grietas o caminos en la superficie hidrófoba proporciona zonas de flujo preferencial para el agua (Doerr *et al.*, 2000).

En países como Australia, la hidrofobicidad ha llegado a afectar 5 millones de hectáreas de uso agrícola (House, 2000) y hasta un 75% de los horizontes superficiales de los suelos de las tierras agrícolas y ganaderas de Holanda (Dekker & Ritsema, 1994). Está documentado que este fenómeno existe en países de todo el mundo como Estados Unidos, Egipto, India, Japón, Rusia, Nueva Zelanda, Alemania, Brasil, Colombia, Grecia, España, Polonia, Reino Unido, Sudáfrica, entre otros sin mencionar México (DeBano, 1981; Jaramillo, 2006).

En Alemania, Buczko *et al.*, (2006) evaluaron la repelencia al agua en una cronosecuencia de un bosque de Haya y sus ambientes transformados utilizando la técnica del MED y WDPT encontrando que la repelencia al agua en el suelo en todos los ambientes fue significativamente más alta en la temporada seca que durante las otras estaciones sin tener un

efecto significativo de las asociaciones florísticas. Con el objetivo de determinar en qué cantidades de humedad la hidrofobicidad puede ser reversible, Regalado & Ritter (2005) aplicaron la prueba del MED y determinaron la curva de humedad en muestras de un suelo cubierto con especies vegetales de la familia Lauraceae y encontraron que la repelencia al agua en el suelo se revierte cuando la humedad se encuentra en porcentajes intermedios (contenido crítico de humedad) y no cuando está saturada de agua.

Aun cuando México es un país con una gran cantidad de suelos de origen volcánico y asociaciones vegetales que generan hidrofobicidad, ha sido casi nula la atención que se le ha dado al fenómeno debido a que las personas se interesan más por explorar terrenos agrícolas que ambientes naturales, sin que todavía se puedan comprender y predecir los efectos de este proceso sobre el ciclo hidrológico en los suelos forestales.

Ante estos escenarios, surgió el interés por evaluar algunos factores y procesos como los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en ambientes forestales particularmente con suelos volcánicos y horizontes arcillosos, que están involucrados en la capacidad de infiltración de los suelos. Es de esperarse que en estos ambientes volcánicos con disturbosecuencias, las precipitaciones, la temporalidad, la revegetación natural y la diversidad florística jueguen un papel importante en la modificación de las propiedades hidrofísicas, sin embargo, la forma de cómo estos factores interactúan y determinan la capacidad de infiltración es desconocido en los ambientes forestales de México.

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1a.- ¿Cómo se modifica la capacidad de infiltración superficial del suelo a través de una disturbosecuencia bosque natural de pino-encino, suelo revegetado naturalmente, pastizal-matorral y un suelo desnudo en una escala temporal?

1b. ¿Cómo se modifica la partición de la infiltración (matricial vs preferencial) superficial a través de una disturbosecuencia bosque natural de pino-encino, suelo revegetado naturalmente, pastizal-matorral y un suelo desnudo en una escala temporal? En este sentido se aplica el término “disturbosecuencia” a una secuencia de disturbio que parte de un sitio menos disturbado y termina en uno altamente disturbado. El término es analógico opuesto al de sucesión vegetal.

2.- ¿Existe un efecto local de los individuos vegetales (árboles y arbustos) análogo a las islas de fertilidad pero en términos de capacidad de infiltración en una escala temporal?, esto de tal forma que exista una diferenciación en la infiltración por efecto de la copa de un árbol/arbusto y las propiedades fisicoquímicas del suelo.

3.- Dado un gradiente de cobertura vegetal que modifica los contenidos de humedad y materia orgánica en el suelo, ¿qué efecto tienen éstas propiedades sobre la hidrofobicidad del suelo en cada uno de los sitios de estudio en una escala temporal?

1.3 HIPÓTESIS

1a.- Si la capacidad de infiltración superficial de un suelo en términos generales depende directamente de la cobertura vegetal y la humedad edáfica, se espera que exista un gradiente de mayor a menor en el siguiente orden: bosque natural, suelo revegetado naturalmente, pastizal-matorral y suelo desnudo siendo mayor en temporada lluviosa que en temporada seca.

1b.- Dado que los flujos preferenciales dependen de la macroporosidad asociada a la bioturbación vegetal y animal y los flujos matriciales directamente de la matriz del suelo, se espera que exista mayor flujo preferencial en el bosque natural y mayor flujo matricial en el suelo desnudo que en los otros sitios.

2.- Debido a la adición de materia orgánica que generan las copas de los árboles y la bioturbación por raíces cercanas a los tallos modificando las propiedades físicas del suelo, se espera una mayor capacidad de infiltración cerca de los tallos de los árboles/arbustos que fuera de sus copas en temporada lluviosa siendo más visible en el pastizal-matorral.

3.- Se espera que durante la temporada seca exista mayor hidrofobicidad en el suelo relacionada con los contenidos de humedad y materia orgánica en cada uno de los sitios siendo mayor en el bosque natural y menor en el suelo desnudo.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Cuantificar *in situ* procesos y factores que modifican la capacidad de infiltración en un bosque natural de Pino-Encino y sus ambientes derivados del disturbio antrópico (disturbosecuencia) así como en un suelo revegetado naturalmente en el sur de la Cuenca de Cuitzeo en temporada seca y lluviosa.

1.4.1 Objetivos particulares

- 1.- Determinar la conductividad hidráulica insaturada superficial y la partición del flujo de infiltración y porosidades efectiva y conducente en un bosque natural de pino-encino, un pastizal-matorral, un suelo revegetado naturalmente y un suelo desnudo en temporada seca y lluviosa.
- 2.- Obtener la conductividad hidráulica insaturada superficial a distintas distancias del tronco de los árboles/arbustos en un bosque natural de pino-encino, un pastizal-matorral, un suelo revegetado naturalmente y un suelo desnudo en temporada seca y lluviosa.
- 2b.- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio y relacionarlas con su capacidad de infiltración.
- 3.- Determinar la repelencia real y potencial al igual que la humedad del suelo en la disturbosecuencia de estudio en temporada seca y lluviosa.

CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO

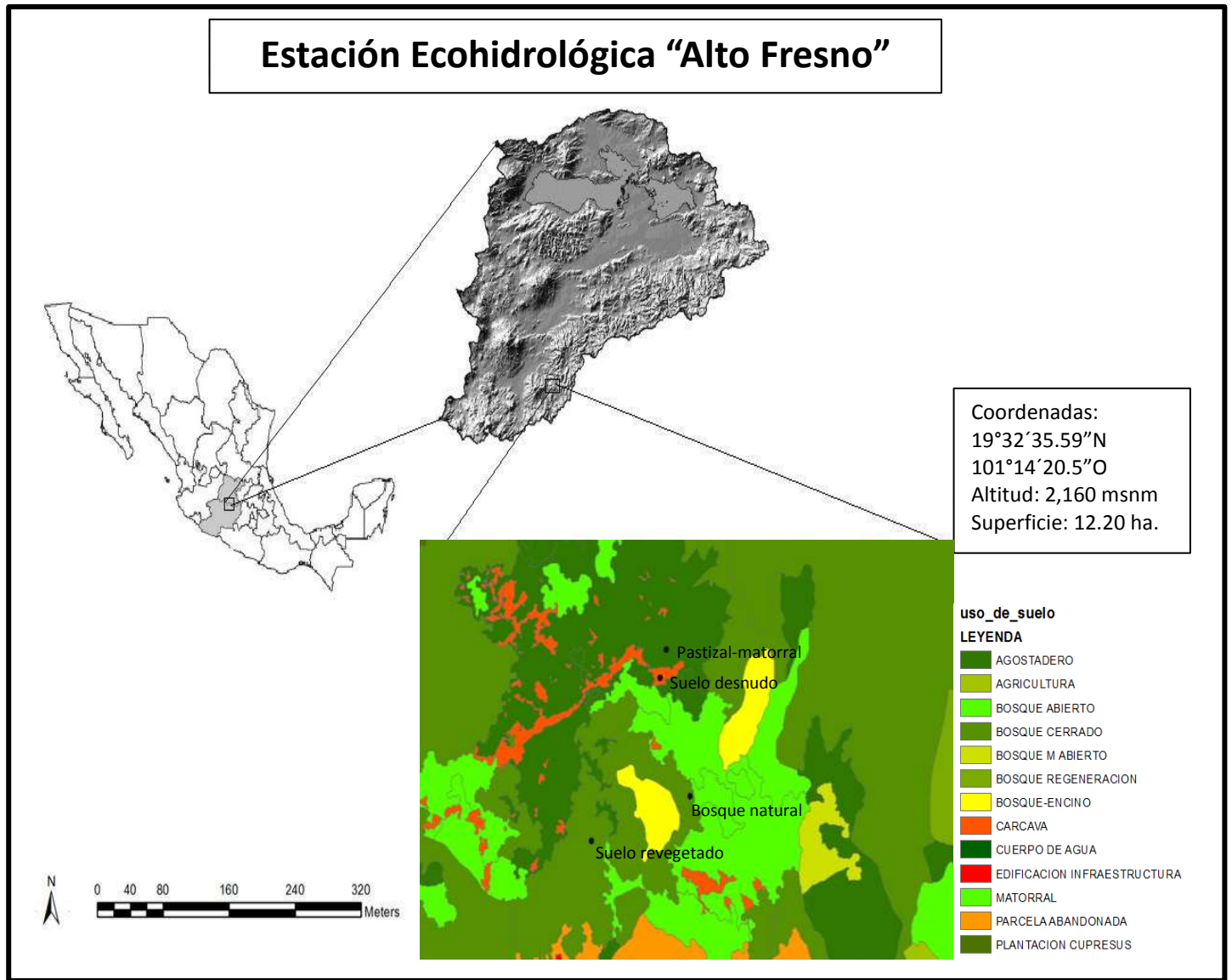


Figura 2. Ubicación del área de estudio y los sitios de muestreo dentro de la cuenca de Cuitzeo.

2.1 Ubicación

El área de estudio abarca la parte alta de la subcuenca de Umécuaro que es tributaria del Río Grande de Morelia en la parte sur de la cuenca del lago de Cuitzeo, al norte del estado de Michoacán y sur de la ciudad de Morelia.

2.2 Clima

El área se caracteriza por un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004). La precipitación promedio anual es de 974.22 mm mientras que la temperatura media anual es de alrededor de 17.3 °C según datos de la estación de San Miguel del Monte, Mpio. Morelia (SMN, 2014).

2.3 Geología, topografía y suelos

La litología reportada por la cartografía oficial nacional para esta zona está conformada por basaltos, depósitos de aluvión, rocas ígneas y brechas volcánicas (DETENAL, 1978a; DETENAL, 1978b) y data de los últimos procesos de formación del cinturón volcánico en el periodo cuaternario.

El terreno es montañoso y moderadamente disecado con pendientes medias entre 10° y 20° (INEGI, 1979). La zona es una geoforma que corresponde a un lomerío suavizado por cenizas volcánicas (Gómez-Tagle, 2008).

Los suelos presentes en el área son Acrisoles órticos y Andosoles crómicos en su mayoría (INEGI, 1979), aunque también hay presencia en menor proporción de Luvisoles y Gleysoles (DETENAL, 1979a; DETENAL, 1979b). Sin embargo se considera que la mayoría son suelos poligenéticos con un epipedón ándico y un endopedón lúvico (Servenay y Prat, 2003; Gómez-Tagle, 2008). Estos suelos están asentados sobre ignimbritas de la Cantera de Morelia (Bigioggero *et al.*, 2004; Gómez-Tagle, 2008). En general, son derivados de ceniza volcánica, materiales piroclásticos, procesos coluviales y material redistribuido por procesos erosivos. La capa de ceniza superficial con propiedades ándicas es de espesor muy variable y sepulta capas de horizontes de acumulación de arcilla poco permeables y rojizos, propios de Luvisoles y Acrisoles derivados de deposiciones anteriores a las cenizas. En este contexto, los Luvisoles sepultados son derivados también de ceniza volcánica y se forman por la deshidratación y cristalización de los alófanos presentes en la fase ándica. La diferenciación hacia un tipo de suelo u otro está relacionada con la edad de los materiales y las condiciones climáticas predominantes durante la pedogénesis (Sedov, *et al.*, 2003). Estas secuencias de suelos volcánicos superpuestos derivados de ceniza son comunes en el centro de México (Sedov, *et al.*, 2003; Servenay y Prat, 2003).

2.4 Caracterización de los horizontes

A grandes rasgos, el suelo dentro de la zona se caracteriza por poseer un horizonte orgánico compuesto por hojarasca con un espesor promedio de 7.8 cm, un horizonte A mineral derivado de cenizas volcánicas, con abundante materia orgánica, evidencia de bioturbación y propiedades ándicas. Un horizonte AB, un horizonte B_t rico en arcillas y altamente erodable al encontrarse en superficie. Un horizonte transicional BC donde ya no hay raíces y un horizonte IIC formado por ignimbrita intemperizada (Gómez-Tagle, 2008).

2.5 Hidrología

Desde el punto de vista hidrológico la zona se caracteriza por la presencia de red de drenaje que se encuentra moderadamente desarrollada debido a procesos de rejuvenecimiento del paisaje y depósitos de capas de ceniza volcánica. Predominan los escurrimientos temporales y efímeros de primer y segundo orden aunque también una de las cuencas instrumentadas presenta escurrimientos perennes (Gómez-Tagle R. com,pers). Por su condición geográfica, es una zona prioritaria de captación, abastecimiento y suministro de agua a gran parte de la ciudad de Morelia ($\geq 1, 500,000$ habitantes) (SAGARPA., 2004).

2.6 Descripción de los distintos ambientes e historia de uso de suelo

Los bosques de pino-encino en esta parte del territorio se encuentran entre los 1900 y 2650 msnm y son de segundo crecimiento con edades entre 50 y 80 años. En el sitio de estudio se puede observar una cronosecuencia bien marcada compuesta por: suelos desnudos, suelos en proceso de revegetación, matorrales pastizales y los bosques de *Pinus-Quercus* (Gómez-Tagle, 2008). La densidad promedio de árboles en la zona de estudio es de 663 ind/ha con dominancia del género *Pinus* en el estrato arbóreo con 66.6% (442.09 ind/ha), seguido por los *Quercus* 17.7% (117.9 ind/ha). Mientras que el 15.5% (103.0 ind/ha) restante comprende tres especies; tejocote (*Crataeus mexicana* Moc. Sessé), capulín o cereza negra (*Prunus serotina* var. *capuli* Cav.) y fresno (*Fraxinus udehi* (Wenz.) Ligelsh).

La altura de los árboles se ubica entre los 2.0 y los 28.0 m con una media de $12.19 \text{ m} \pm 7.15 \text{ m}$. El diámetro normal se encuentra entre los 3.2 y 75.8 cm con media de $21.2 \pm 17.4 \text{ cm}$. Por su parte, las superficies de copa están entre los 0.9 y 428.2 m² con una media de $46.1 \pm 93.3 \text{ m}^2$ (Gómez Tagle Chávez, sometido).

En la parte edáfica, el epipedón corresponde a un Cambisol, (horizonte diacrítico un cámbico), mientras que el endopedón corresponde a un suelo sepultado con un horizonte diacrítico argílico, que según la clasificación de la FAO (1999) se ubica como un Lixisol húmico (Gómez-Tagle, 2008). La caracterización edáfica detallada para dos perfiles de bosque natural y suelo desnudo (cárcava activa) se presentan en el Anexo A.

Bosque natural: El bosque de *Pinus-Quercus* se encuentra en una superficie cumbral con pendiente $< 10^\circ$. En el sitio la vegetación está representada por un estrato arbóreo compuesto de *Pinus leiophylla*, *P. devoniana*, *P. douglasiana*, *Quercus castanea*, *Q. laurina*, *Arbutus glandulosa*, *Clethra mexicana*, *Prunus serotina* var. *capuli*, *Fraxinus udehi* y *Carpinus caroliniana* principalmente y un estrato arbustivo donde destacan *Cornus excelsa*, *Crataegus pubescens* y *Bacharis heterophylla*. Presenta el suelo completo, con el epipedón y endopedón (Ver anexo A).

Matorral-pastizal: se encuentra al igual que el bosque natural en una superficie cumbral con pendiente $< 10^\circ$, la vegetación está compuesta por un estrato arbustivo dominado por tres géneros: *Crataegus*, *Bacharis* y *Mimosa*, además de un estrato rasante de gramíneas (*Cynodon dactylon*). El suelo tiene tanto el epipedón como el endopedón y corresponde al perfil del sitio de bosque (Anexo A).

Suelo desnudo: se encuentra al igual que los sitios previamente descritos, sobre una superficie cumbral con pendiente $< 10^\circ$ a escasos 80 m de distancia del sitio de matorral-pastizal y 150 m del sitio de bosque natural. El sitio presenta seria erosión remontante, laminar e incipiente en cárcavas. El suelo se encuentra decapitado y aflora el horizonte argílico (Anexo A). En cuanto a la vegetación se presentan plántulas de *Pinus sp.* y *Crataegus pubescens* principalmente con alturas menores a 15 cm.

Suelo revegetado: se encuentra en una ladera alta con una pendiente aproximada de 10° . El sitio corresponde a un sistema de cárcavas revegetadas. El suelo en forma similar al sitio de suelo desnudo, no presenta el epipedón y aflora el horizonte argílico. La vegetación arbórea consta de individuos del género *Pinus* y algunos del género *Fraxinus*. En el estrato arbustivo hay *Crataegus pubescens* e individuos jóvenes de *Pinus sp.*

En cuanto a los suelos, los sitios de Bosque natural y Matorral-pastizal el suelo se encuentra completo con epipedón y endopedón, la descripción general de estos dos sitios correspondería al perfil de Bosque en el Anexo A. Para los sitios de Suelo desnudo y Suelo

revegetado los suelos han sido decapitados por procesos erosivos y el endopedón se encuentra en superficie. La descripción general de estos dos sitios correspondería al perfil de Suelo desnudo en el Anexo A.

En la zona de estudio, las masas boscosas son en su mayoría de segundo crecimiento (< 50 años). Sin embargo existen remanentes importantes de bosque maduro (> 80 años) relativamente bien conservados en las partes con mayor dificultad de acceso, aunque es importante destacar que hace 9 años estuvieron sometidos a un incendio producto del descuido humano (Gómez-Tagle R. com. pers.). Además, debido a las condiciones socioeconómicas de la población local, áreas considerables de bosque fueron desmontadas con fines agropecuarios durante los últimos 50 años (Mendoza *et al.*, 2002; López *et al.*, 2006). Actualmente en la zona, los pinos son sometidos a la extracción de resina como una alternativa de sustento económico.

La zona se encuentra severamente amenazada por actividades humanas como la deforestación ilegal a diversas escalas, el pastoreo extensivo, la conversión de bosque a huertas de aguacate y los nuevos asentamientos campestres que son, entre otros, factores que están destruyendo la red hidrológica y comprometiendo la salud de los bosques restantes y cuerpos de agua (Delgado, 2009).

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Diseño de muestreo para la obtención de la infiltración insaturada superficial y el efecto de la copa de los árboles sobre ésta.

Los sitios de muestreo se eligieron empleando un mapa de uso del suelo/cubierta vegetal detallado (1:5,500). Se definieron los polígonos para cada una de las coberturas a estudiar: Bosque Natural, Suelo Revegetado naturalmente, Pastizal-Matorral y Suelo Desnudo. En cada uno de los sitios, se eligió un punto central a partir del cual mediante un sistema de coordenadas polares aleatorizando distancia y azimut en un radio de 13 m (530 m² aproximadamente), se seleccionaron 15 puntos dentro del suelo desnudo para llevar a cabo los ensayos de infiltración. En los sitios donde existe vegetación (Bosque natural, Suelo revegetado y Pastizal-Matorral) utilizando el mismo sistema de coordenadas polares, se muestrearon todos los árboles que estuvieron dentro del radio de 13 m y se llevaron a cabo ensayos de infiltración insaturada superficial como se describe más adelante.

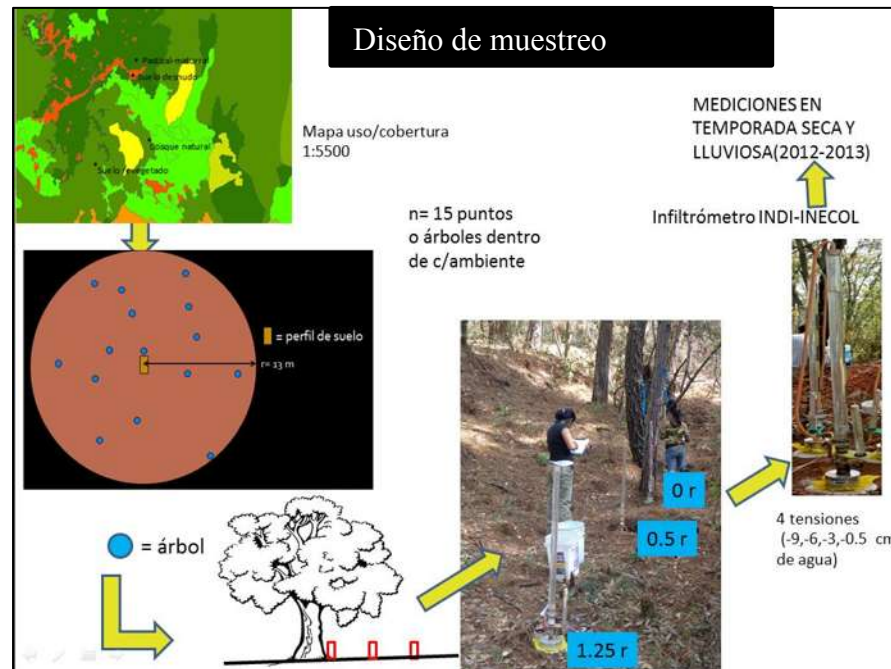


Figura 3. Diseño de muestreo de los ensayos de infiltración en campo.

El muestreo de infiltración insaturada superficial se llevó a cabo tras identificar los individuos elegidos. En estos individuos, se midieron los diámetros N-S y E-O de la copa y se calculó su radio. Las mediciones de infiltración se realizaron a 20 cm de distancia del tronco o

tallo, a 0.5 y 1.25 radios de copa. Dichas distancias se orientaron siguiendo un transecto lineal con azimut aleatorio, teniendo como punto de origen el tronco o tallo de la planta. Los ensayos de infiltración se realizaron con infiltrómetros de tensión automáticos tipo INDI-INECOL (Gómez-Tagle *et al.*, 2011) contruidos *ex profeso* en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA). Una vez contruidos, se automatizaron y calibraron previamente a los ensayos de infiltración en campo siguiendo el protocolo establecido por Guerra y Reyes (2010) y utilizando un datalogger CR1000 (Campbell-Scientific) y ocho transductores de presión diferencial MPX2010DP (Motorola-Free Scale, Inc.). Los ensayos de infiltración se llevaron a cabo en temporada seca y temporada lluviosa en los mismos sitios (Figura 3). Se utilizó ésta técnica debido a que estos instrumentos permiten identificar en términos cuantitativos la contribución relativa de algunos de los parámetros hidrodinámicos fundamentales de los que depende el caudal de agua infiltrada, seleccionando determinado rango de presión durante la aplicación de agua. Es una técnica no destructiva, que no modifica el suelo ni su porosidad y la medición es expeditiva, ya que el flujo en estado cuasi estacionario es alcanzado rápidamente. En este caso, la infiltración de agua en un suelo no saturado en condiciones de estado estacionario refleja las características de la red de poros, formada por yuxtaposición de partículas sólidas y elementos estructurales (Taboada Castro *et al.*, 1998). Permite cuantificar el tamaño, la distribución y la continuidad de la red de poros a partir de la conductividad hidráulica a saturación y en donde el flujo es no confinado y se elimina el disturbio estructural provocado por cilindros así como la posible modificación de la estructura superficial por el impacto de la gota de lluvia (Smettem y Clothier, 1989). A su vez estas propiedades son muy importantes en estudios de erosión, balance hídrico y producción vegetal (Aoki y Sereno, 2005). En este sentido, los infiltrómetros de disco a tensión proveen un mecanismo útil para discriminar el movimiento del agua a través de fisuras y poros biológicos del que ocurre a través de la matriz del suelo (Clothier y White, 1981; Perroux y White, 1988; Ankeny *et al.*, 1988). Además, los infiltrómetros de disco pueden ser usados para determinar en cuánto contribuyen distintos rangos de poros al flujo total de agua, comparando tasas de infiltración medidas a varios potenciales de aplicación de agua (Watson y Luxmoore, 1986; Jarvis *et al.*, 1987; Lin y McInnes, 1995). También son adecuados para estimar las propiedades hidráulicas requeridas como entradas para modelos de transporte de agua y solutos.

Debido a las irregularidades del terreno, se utilizó una superficie de contacto entre el infiltrómetro y el suelo, esta superficie cumple con las funciones de homogeneizar el flujo que pasa al suelo y debe ser de porosidad más alta que los suelos de estudio para no contrarrestar el flujo. En este caso se utilizó marmolina comercial tipo I (fina) de textura arenosa (90.84 % de arenas, 2.08 % de arcillas y 7.08 % de limos de acuerdo con la granulometría obtenida empleando el método del hidrómetro de Boyoucos (NOM-021).

En los ensayos de infiltración se emplearon cuatro tensiones: -0.5 cm H₂O (0.049 KPa), -3 cm H₂O (0.294 KPa), -6 cm H₂O (0.588 KPa) y -9 cm H₂O (0.882 KPa). Las tensiones se aplicaron en forma ascendente, es decir, de la mayor a la menor (-0.5 a -9.0 cm). Se aplicaron varias tensiones debido a que la aproximación de ajuste simultáneo no lineal de Logsdon y Jaynes (1993) que permite obtener los parámetros de la ecuación de Gardner (1958) requiere por lo menos de la aplicación de tres tensiones.



Figura 4. Uso de los infiltrómetros de disco-tensión automatizados para los ensayos de infiltración en campo en cada sitio.

Por otro lado, Bodhinayake y colaboradores (2004) mencionan que es recomendable la selección de tensiones *a priori* de acuerdo a los diferentes diámetros de poro que se deseen analizar. El diámetro de poro puede ser calculado empleando la siguiente ecuación:

$$D_p = 0.18516 + [1.66424 * e^{(h - 0.71958) / 3.31562}] \quad [1]$$

Donde D_p es el diámetro de poro, e corresponde a la base de los logaritmos naturales (2.71828) y h es la tensión aplicada en centímetros.

El flujo de infiltración insaturado en tensiones altas está determinado por la microporosidad y mesoporosidad del suelo, principalmente por la cantidad y conectividad de los mesoporos, mientras que para las tensiones bajas está determinado por la macroporosidad. Se midió el descenso de la columna de agua para cada tensión entre 45 y 90 minutos. Para la mayoría de los suelos, este tiempo es necesario para que el flujo alcance la condición estacionaria de campo.

Empleando los datos de tensión y flujo de infiltración en fase estacionaria se obtuvieron los parámetros K_s (conductividad hidráulica) y α (parámetro de proporcionalidad) empleando la aproximación de Longsdon y Jaynes (Eq. 4). La ecuación de Gardner (1958) relaciona la tensión y la conductividad hidráulica de la siguiente manera:

$$K(\psi) = K_s e^{(\alpha \Psi)} \quad [2]$$

Donde $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica como función de la tensión o potencial de humedad del suelo, K_s es la conductividad hidráulica saturada de campo y Ψ es el potencial de humedad del suelo. En términos del flujo en estado estacionario Q_∞ , puede escribirse como:

$$Q_\infty = \alpha \phi_0 + \left(\frac{4\phi_0}{\pi r_0} \right) \quad [3]$$

Donde ϕ_0 es el potencial de flujo matricial, π es una constante, α es el factor de proporcionalidad del modelo de Gardner (1958) y r_0 el radio del disco. Diversas soluciones han sido derivadas para estimar la conductividad hidráulica a partir de la solución de Wooding. En este estudio se utiliza el método de Longsdon y Jaynes (1993) por su simpleza y facilidad de implementación. Este método se basa en un ajuste simultáneo no lineal y requiere de los datos de infiltración no saturada en flujo estacionario para al menos tres tensiones. La ecuación que describe el flujo es:

$$Q_\infty(\Psi) = \left[1 + \left(\frac{4}{\alpha \pi r_0} \right) \right] * K_s e^{(\alpha \Psi)} \quad [4]$$

Donde $Q_\infty(\Psi)$ es el flujo de infiltración ($m \cdot s^{-1}$) en fase estable para la tensión ψ (kPa) y r_0 es el radio del disco (m).

El método requiere un ajuste simultáneo no lineal en donde se provee como datos de la variable independiente la tensión y para la variable dependiente la infiltración en estado

estacionario (pendiente de la recta). Se obtiene un gráfico con la relación de dependencia tensión (ψ) vs flujo de infiltración (Q). Se ajustó aplicando un método de mínimos cuadrados no lineales utilizando el ambiente de programación estadística R.

Diversos autores han planteado métodos para calcular el flujo para diferentes tensiones es decir, diferentes tamaños de poro y estimar el número de poros efectivos. En este estudio se empleó el método de Watson y Luxmoore (1986) que es el más simple de implementar y proporciona una base conceptual para realizar comparaciones entre condiciones del suelo, ya sea por prácticas de manejo, por cambio de uso del suelo, tipo de vegetación, etc.

De acuerdo con Watson y Luxmoore (1986) el radio de un poro (r) puede derivarse a partir de la ecuación de capilaridad:

$$r = \frac{-2\sigma \cos(\alpha)}{\rho \cdot gh} \approx \frac{-0.15}{h} \quad [5]$$

en donde σ corresponde a la tensión superficial del agua, α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro (se asume como 0), ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad y h es la presión o tensión en centímetros de agua.

Por otro lado, el número de poros en el suelo inmediatamente por debajo del infiltrómetro está definido por:

$$N = 8\mu K_i / \pi \rho g (r)^2 \quad [6]$$

en donde N es el número de poros, μ corresponde a la viscosidad del agua, K_i es la conductividad hidráulica para un cierto intervalo de tamaño de poro. Esta conductividad hidráulica se calcula como la diferencia de conductividad ΔK_i entre los límites superior (a) e inferior (b) del intervalo en estudio:

$$\Delta K_i = K(h_a) - K(h_b) \quad [7]$$

Donde:

$$\begin{aligned} K(h_a) &= K_s e^{(ah_a)} \\ K(h_b) &= K_s e^{(ah_b)} \end{aligned} \quad [8]$$

y h_a , h_b son las tensiones específicas para tamaños de poro con radios a y b . Una vez conocida la cantidad de poros para un intervalo definido, se puede calcular la superficie correspondiente, esto se hace multiplicando el número de poros por la superficie de la sección cruzada del poro:

$$\Theta_m = N\pi r^2 \quad [9]$$

En donde Θ_m corresponde a la superficie de los poros que se encuentran conduciendo agua debajo del infiltrómetro, N es el número de poros, π es una constante (3.1416) y r corresponde al radio del límite inferior del intervalo.

Con los datos obtenidos, se procedió a realizar el cálculo de la conductividad hidráulica de cada uno de los puntos empleando la solución de Logsdon y Jaynes (1993) (Eq. 4). Esta solución requiere de las pendientes o tasas de infiltración en flujo estacionario que se obtuvieron a partir de los datos de Kh para cada una de las tensiones aplicadas, realiza un ajuste simultáneo no lineal mediante mínimos cuadrados y se obtienen los parámetros de α y K_s del modelo de Gardner (1958) para estimar la K_s . También se calculó el número de poros efectivos para diferentes diámetros aparentes de acuerdo con la técnica de Watson y Luxmoore (1986) previamente descrita (Eq. 5,6,7,8,9).

Para calcular la proporción de los flujos de infiltración asociados a cada tamaño de poro primero se calculó la $K(h)$ para los distintos diámetros de poro utilizando los parámetros de la ecuación de Gardner (1958) como a continuación se describe:

$$K(\psi) = K_s e^{(\alpha \Psi)} \quad [10]$$

Donde $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica insaturada para cada una de las tensiones aplicadas, K_s es la conductividad hidráulica mediante el ajuste de Longsdon y Jaynes (1993) en m/s, e corresponde a la base de los logaritmos naturales (2.71828), α es el factor de proporcionalidad del modelo de Gardner (1958) en m^{-1} y Ψ es la tensión aplicada en kPa (-0.015 kPa= poros con diámetro > 1 mm, -0.049 kPa = poros con diámetro $\Delta 1.0 - 0.3$ mm y -1.471 kPa= poros con diámetro $\Delta 0.3-0.01$ mm).

Posteriormente, se calcularon las diferencias de $K(\psi)$ para cada tamaño de poro utilizando la ecuación 7 y 8. Después se calculó el número de poros bajo el disco del infiltrómetro (0.1 m) utilizando las ecuaciones 6 y 9 para cada diámetro aparente de poro (> 1.0 mm= macroporos, $\Delta 1.0 - 0.3$ mm = mesoporos grandes, $\Delta 0.3-0.01$ mm = mesoporos pequeños y <0.01 mm= microporos). Conociendo lo anterior, se extrapola el número de poros de cada diámetro aparente a número de poros por metro cuadrado.

Finalmente el cálculo del porcentaje del flujo de infiltración para cada diámetro aparente de poro se obtuvo a partir de la siguiente relación:

$$\% \text{ flujo} = \Delta K_i * 100 / K_s \quad [11]$$

Donde ΔK_i es la conductividad hidráulica insaturada para cada intervalo de diámetro de poro (macroporos, mesoporos grandes, mesoporos pequeños) obtenida por la diferencia de $K_s - K_i$, K_s es la conductividad hidráulica estimada por el ajuste simultáneo no lineal de Longsdon y Jaynes (1993) en m/s. El porcentaje de flujo para los microporos se obtuvo por diferencia:

$$\% \text{ flujo microporos} = 100 - \% \text{ macroporos} + \% \text{ mesoporos grandes} + \% \text{ mesoporos pequeños} \quad [12]$$

Una vez obtenidos los cálculos anteriores, se comparó la condición del espacio poroso conducente del suelo bajo los distintos usos/coberturas de la disturbosecuencia y para explorar la variación temporal, se muestreó durante la temporada lluviosa (hacia el final de esta por cuestiones logísticas) y durante la temporada seca.

3.1.1 Relación de la intensidad de las precipitaciones y la K_s en la zona de estudio

Para poder determinar las intensidades de precipitación en la zona de estudio y relacionarlas con la capacidad de infiltración del suelo, se analizaron los registros de precipitación de la estación meteorológica con registros cada 10 minutos ubicada en la zona de estudio y se extrajeron los eventos ocurridos entre 1 de Mayo del 2012 y el 1 de Mayo del 2013. Se contabilizaron como eventos separados aquellos que tuvieron un lapso superior a tres horas sin registro de lluvia y se calculó la I_{10} (Intensidad de las lluvias a los 10 minutos), I_{30} (Intensidad de las lluvias a los 30 minutos) e I_t (Intensidad total de los eventos de lluvia) (Ruíz-Díaz, en proceso). Posteriormente se calcularon los porcentajes de los eventos de precipitación que sobrepasaron la K_s promedio de cada uno de los sitios en temporada seca y lluviosa.

3.2 Caracterización edáfica de la disturbosecuencia

Se tomaron 30 muestras de suelo superficial en los sitios con vegetación y 15 en el suelo desnudo para análisis fisicoquímicos que incluyeron: granulometría de la fracción fina (método de hidrómetro de Boyoucos), contenido de materia orgánica (método de combustión húmeda de Walkley y Black), densidad aparente (método del cilindro), color en seco y húmedo (Tablas Munsell), pH (potenciómetro de bulbo húmedo) de acuerdo con las técnicas de la Norma Oficial Mexicana REC-NAT 021 (DOF, 2002). En campo se midió el espesor de la hojarasca en

cada punto de infiltración, la humedad volumétrica para el suelo superficial empleando un sistema TDR (Reflectometría de Dominio de Tiempo por sus siglas en inglés) portátil modelo ML2x de la marca DeltaT. La unidad TDR fue calibrada empleando lecturas de campo y determinaciones de humedad mediante método gravimétrico y datos de densidad aparente obtenidos de las muestras colectadas en anillos metálicos de 7 x 5 cm siguiendo el protocolo recomendado por el fabricante.

3.3 Determinación de la repelencia real y potencial y valores críticos de humedad

La severidad de la repelencia real se determinó tanto en temporada seca como en temporada lluviosa en cada uno de los puntos donde se hicieron los ensayos de infiltración para los cuatro sitios. Para medir la severidad de la repelencia, se aplicó la prueba de la molaridad del etanol (MED) que consiste en aplicar una gota de una serie de soluciones de etanol y determinar aquella que se infiltra en el suelo antes de los 5 segundos. Las concentraciones fueron al 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,15,16, 18, 20, 22, 25, 30 y 35 % de etanol siguiendo los lineamientos propuestos por Roy y McGill (2002) (Figura 5a).

Para determinar la repelencia potencial en cada uno de los puntos de ensayos de infiltración de cada sitio, se extrajo un núcleo de suelo sin alterar de 85 cm³ de volumen (r = 3 cm, h = 3 cm) y se transportaron al laboratorio (N= 105). Los núcleos se colocaron en cajas Petri, se saturaron con agua y se realizaron pruebas de severidad y persistencia de la repelencia para diferentes contenidos de humedad. Para esto las muestras fueron saturadas y se dejaron secar a temperatura ambiente en laboratorio durante un periodo de 20 días hasta llegar a pesos estables (sin pérdida de agua a temperatura ambiente). Durante este periodo se realizaron pruebas de severidad y persistencia cada 12 horas. Posteriormente las muestras fueron secadas primero a 65 °C y luego a 105 °C por 48 horas y se practicaron pruebas de hidrofobicidad tras la deshidratación forzada (Figura 5b).

Las pruebas de hidrofobicidad se realizaron de dos formas: la severidad de la repelencia mediante la técnica del MED y la persistencia de la repelencia con la prueba del WDPT (Tiempo de Penetración de la Gota de Agua por sus siglas en inglés) siguiendo el protocolo de Dekker y Ritsema (1994) que consiste en medir el tiempo medio que tardan en infiltrar 3 gotas de agua destilada en la superficie de la muestra de suelo. Este procedimiento se realizó cada 12

horas hasta encontrar pesos estables en los núcleos de suelo, es decir, hasta que ya no se detectó pérdida de humedad a temperatura ambiente.

Para determinar los valores críticos de humedad, con los datos del peso, se calculó la humedad gravimétrica que expresa la relación de gramos de agua en gramos de suelo (Figura 5c) con la siguiente fórmula:

$$w = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_2 - m_3)} \times 100 = \frac{m_4}{m_5} \times 100 \quad [13]$$

Donde:

w= humedad gravimétrica (%)
m₁= masa de la tara y suelo húmedo (g)
m₂= masa de la tara y suelos sueco (g)
m₃= masa de la tara (g)
m₄= masa de agua (g)
m₅= masa de las partículas sólidas (g)

Posteriormente se calculó la humedad volumétrica con la relación:

$$\theta v = w * D. A \quad [14]$$

Donde:

θv = Humedad volumétrica (cm³/cm³)
w= humedad gravimétrica (g/g)
D. A= Densidad aparente de la muestra (g/cm³)



Figura 5. Determinación de la repelencia real (a), potencial (b) y contenido de humedad gravimétrico (c).

3.4 Análisis de datos y procesamiento estadístico

Como se mencionó anteriormente, los datos de infiltración insaturada se emplearon para calcular los parámetros de la ecuación de Gardner (1958) mediante el método de ajuste

simultáneo no lineal de Logsdon y Jaynes (1993). Posteriormente se calcularon los porcentajes de flujo de infiltración, la cantidad de poros conducentes por metro cuadrado y la superficie de porosidad conducente para poros con diámetros aparentes > 1.0 mm= macroporos, $\Delta 1.0 - 0.3$ mm = mesoporos grandes, $\Delta 0.3-0.01$ mm = mesoporos pequeños y <0.01 mm= microporos).

Los datos se sometieron a pruebas de normalidad aplicándoles la prueba de Shapiro-Wilk. Una vez conociendo su distribución, se aplicaron análisis de correlaciones entre variables edáficas e hidrofísicas. Se formularon pruebas de Tukey para comparar si existe diferencia estadística significativa entre las propiedades hidrofísicas antes mencionadas en función del tipo de cobertura. También se exploró la dependencia de éstas y la distancia al tronco o tallo para cada uno de los sitios mediante análisis de varianza (ANOVA), así como comparación de medias paramétricas de diferencia honesta significativa de Tukey.

Al final, se aplicó un análisis de covarianza (ANCOVA) para obtener qué factores son los que tienen mayor peso en la modulación de la capacidad de infiltración en la disturbosecuencia de estudio.

Se obtuvieron los valores críticos de humedad para cada sitio relacionando la variación de la repelencia en función de los contenidos de humedad calculados.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA K_s EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO DEL SUR DE LA CUENCA DE CUITZEO

4.1.1 K_s y α superficial en temporada seca y lluviosa en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino

Se realizaron en total 198 ensayos de infiltración insaturada en campo, 99 para la temporada seca y 99 para la temporada lluviosa.

Durante la temporada seca se obtuvo que la K_s del sitio pastizal-matorral (46.27 ± 27.56 mm/h) es significativamente mayor que los sitios del suelo revegetado (13.25 ± 5.52 mm/h) y suelo desnudo (6.51 ± 3.67 mm/h). De la misma manera, la K_s del suelo revegetado es significativamente mayor que la del suelo desnudo. Contrario a lo esperado, en el bosque natural no se registró flujo de infiltración alguno, se observó que toda el agua fue repelida por el suelo lo cual originó escorrentía.

Sin embargo, durante la temporada lluviosa la K_s fue significativamente mayor en el suelo desnudo (91.17 ± 35.11 mm/h) seguido del pastizal-matorral (86.29 ± 52.71 mm/h) sin diferencias significativas entre estos dos sitios. El suelo revegetado tuvo la K_s más baja (18.01 ± 7.07 mm/h). Y finalmente, en el bosque natural se pudo registrar flujo de infiltración con una K_s de 37.69 ± 28.96 mm/h que fue mayor al suelo revegetado de los cuales se esperaba que tuvieran la K_s más alta durante la temporada lluviosa de acuerdo con la hipótesis de mayor cobertura vegetal, mayor capacidad de infiltración (Cuadro 1).

El valor de α es igual al inverso de lambda ($\alpha = 1/\lambda$) (Elrick y Reynolds, 1992) e indica el inverso de la longitud capilar promedio de los poros del suelo. Resultó tener el valor más alto en el suelo revegetado (1.51 ± 1.26 m⁻¹) durante la temporada seca. Por otro lado, en el pastizal-matorral se obtuvieron valores menores a uno (0.91 ± 0.83 m⁻¹) (Cuadro 1). En cambio, en la temporada lluviosa se obtuvo que los valores de α disminuyeron significativamente ($p = 0.0234$) en todos los sitios que fueron muestreados en la temporada seca con valores menores a uno, excepto para el suelo revegetado.

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 1. Resumen estadístico de los parámetros K_s y α para cada uno de los sitios muestreados en temporada seca y lluviosa. Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticas entre uso/cobertura de suelo.

Uso/cobertura	K_s media \pm d.e (mm/hr)	α media \pm d.e (m^{-1})	Mediciones de infiltración (n)
Temporada seca			
Suelo desnudo	6.51 \pm 3.67 c	1.14 \pm 0.48 a	15
Suelo revegetado	13.25 \pm 5.52 b	1.51 \pm 1.26 a	24
Pastizal-matorral	46.27 \pm 27.56 a	0.91 \pm 0.83 b	30
Bosque natural	0.0 \pm 0.00 d	---	30
Temporada lluviosa			
Suelo desnudo	91.17 \pm 35.11 a	0.82 \pm 0.60 b	15
Suelo revegetado	18.01 \pm 7.07 c	1.04 \pm 0.56 ab	24
Pastizal-matorral	86.29 \pm 52.71 a	0.63 \pm 0.41 b	30
Bosque natural	37.69 \pm 28.96 b	1.51 \pm 0.57 a	30

Dado el registro de flujo de infiltración en el bosque natural y con base en la ecuación de Gardner (1958) se pudo calcular el parámetro α que fue mayor que en todos los demás sitios ($1.51 \pm 0.57 m^{-1}$), seguido del suelo revegetado ($1.04 \pm 0.56 m^{-1}$) después el suelo desnudo ($0.82 \pm 0.60 m^{-1}$) y finalmente el pastizal-matorral ($0.63 \pm 0.41 m^{-1}$). (Cuadro 1). De acuerdo con Elrick y Reynolds (1992) todos los valores de α calculados tanto para temporada seca como lluviosa corresponden a suelos con texturas finas (arcillosas) y bien estructurados (Cuadro 2).

Cuadro 2. Categorías por textura/estructura del suelo para valores estimados de α (Tomado de Elrick y Reynolds, 1992).

Categoría por estructura/textura del suelo	Valor de α (m^{-1})
Compactado, poco estructurado, materiales arcillosos tales como sedimentos marinos, lacustres o de vertederos.	1
Suelos con texturas finas (arcillosas) y bien estructurados	4
Muchos suelos estructurados desde arcillosos a limosos; también incluyen arenas finas y medias bien estructuradas. La primera selección para muchos suelos.	12
Cuarzos y gravas arenosas; puede también incluir algunos suelos ligeramente estructurados con grandes grietas y/o macroporos	36

En la figura 6 se observan los gráficos de caja y bigotes y la prueba de Diferencia Honesta Significativa de Tukey (HSD por sus siglas en inglés) (Miller, 1981) que muestran claramente como existe una mayor variación en la K_s en el sitio de pastizal-matorral tanto en temporada seca como en temporada lluviosa con valores en la primer temporada entre 0.0 y 100 mm/h y en

la segunda obteniendo valores por arriba de los 0.0 y hasta mayores de los 200 mm/h. El suelo desnudo obtuvo una menor variación en su K_s durante las dos temporadas lo cual puede estar relacionado con la homogeneidad del suelo.

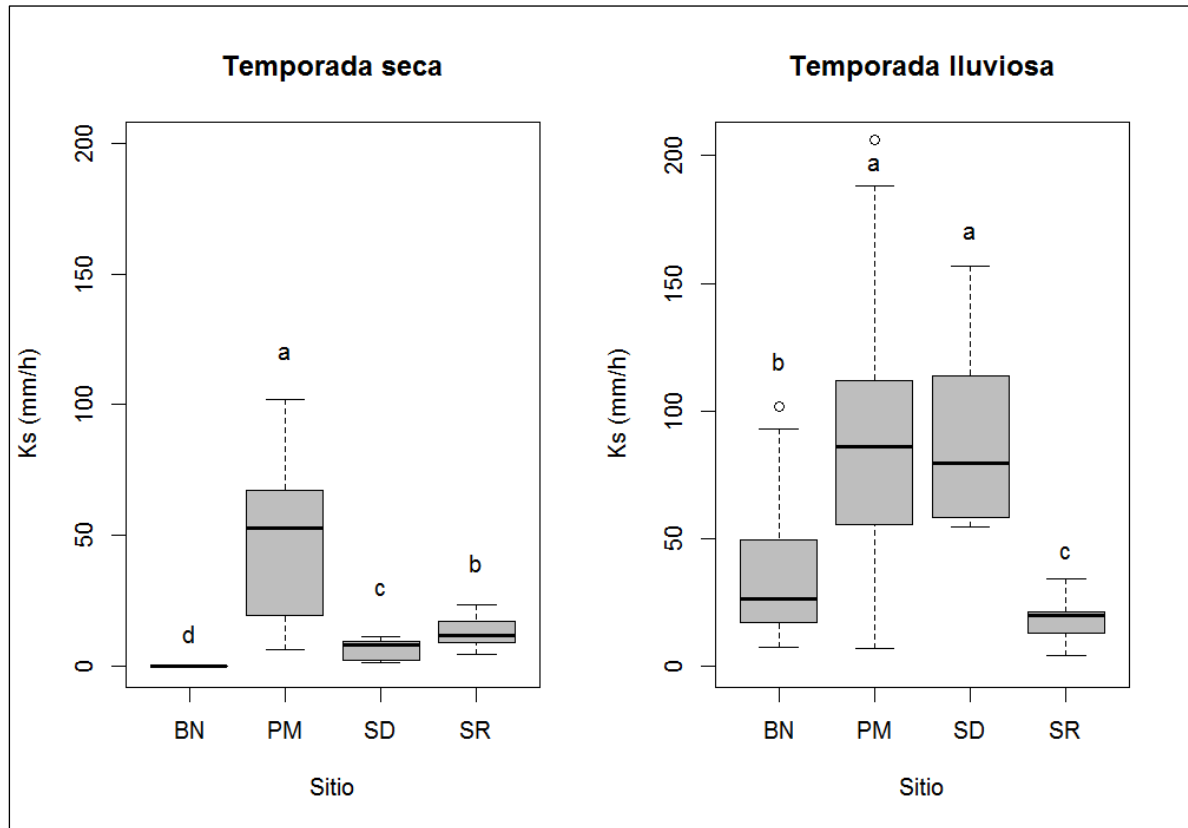


Figura 6. Gráficas de caja y bigotes que muestran los resultados de la prueba de TukeyHSD para la K_s superficial en temporada seca y lluviosa entre sitios, $p < 0.05$. BN= Bosque Natural, PM=Pastizal-Matorral, SD= Suelo Desnudo y SR= Suelo Revegetado. Letras iguales indican que no existe diferencia estadística entre uso/cobertura de suelo.

En la figura 5 se puede observar claramente como los sitios arbolados (BM y CR) tienen los valores más altos de α tanto en la temporada seca como en la lluviosa, en cambio, los sitios de suelo desnudo y pastizal-matorral tienen valores más pequeños. Otro aspecto que es muy notorio es que la dispersión de los datos son mayores en la temporada seca lo cual está asociado a los poros que existen cerca de los árboles/arbustos o al exterior de sus copas.

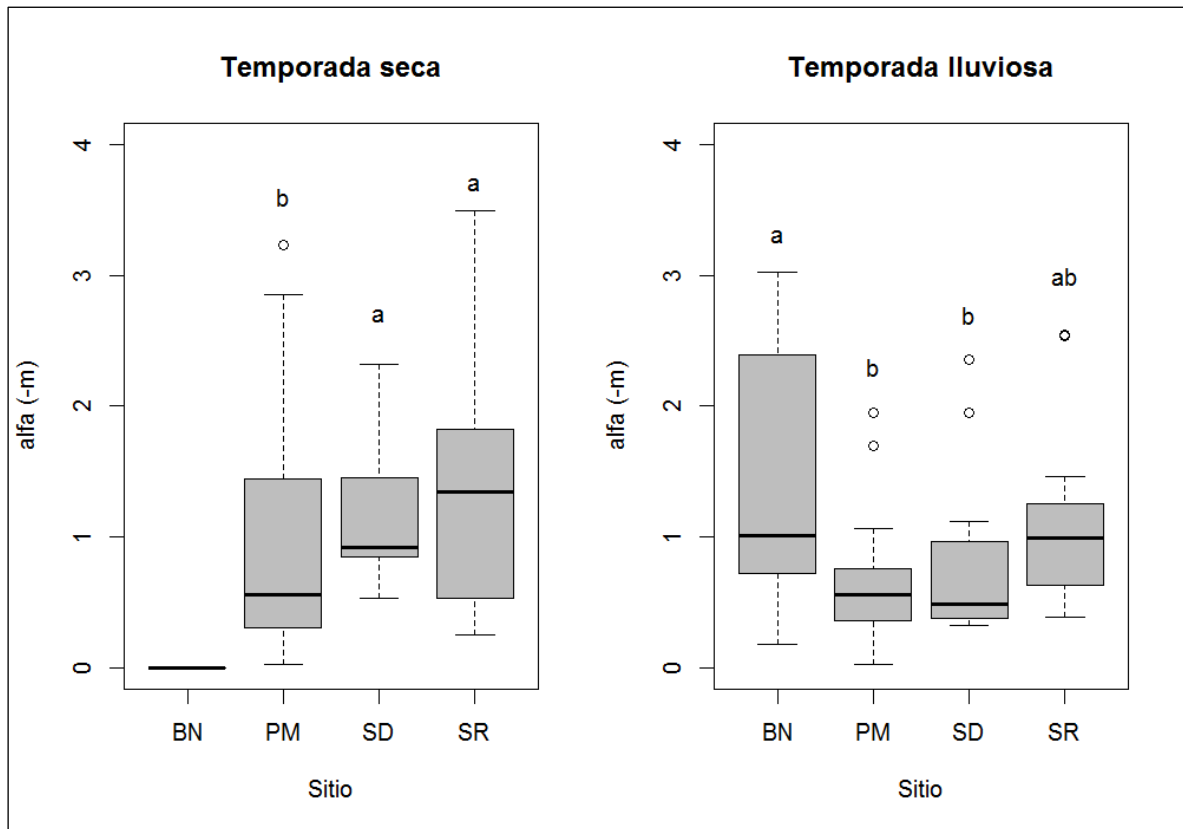


Figura 7. Gráfica de caja y bigotes que muestran los resultados de la prueba de TukeyHSD para el valor de α superficial en temporada seca y lluviosa entre sitios, $p < 0.05$. BN= Bosque Natural, PM=Pastizal-Matorral, SD= Suelo Desnudo y SR= Suelo Revegetado. Letras iguales indican que no existe diferencia estadística entre uso/cobertura de suelo.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (Heiberger, 1992) de dos vías donde se obtuvo que existe un efecto significativo de la temporada y el sitio sobre la K_s al igual que su interacción. Es decir, la capacidad de infiltración que tienen los suelos de la disturbosecuencia en estudio depende tanto de la temporada del año en que se mida como del sitio en particular, dado que se confieren propiedades fisicoquímicas y de humedad específicas al suelo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen estadístico del ANOVA de dos vías para probar el efecto de la temporada y el sitio sobre la K_s .

Factor	g.l	Valor de F	Valor de p
Temporada	1	90.59	<0.001
Sitio	3	42.19	<0.001
Temporada x Sitio	3	12.84	<0.001

4.1.2 Porosidad efectiva y proporciones del flujo de infiltración superficial en la disturboscuencia de estudio en una escala temporal

Durante la temporada seca el número de poros y superficie efectiva de poros estimada mediante el método de Watson y Luxmoore (1986) mostró un patrón claro de la partición del flujo de infiltración superficial en la disturboscuencia. El mayor porcentaje del flujo de infiltración ocurrió por mesoporos pequeños en todos los ambientes siendo más notorio aún en el suelo revegetado. Este flujo representó el 86 ± 39.26 , 80.8 ± 47.32 y 80.3 ± 28.61 % del flujo total en el suelo revegetado, pastizal-matorral y suelo desnudo respectivamente. En el bosque natural no se determinó debido a la nula infiltración. También se pudo observar que los macroporos son los que ocupan el menor porcentaje de flujo en todos los ambientes oscilando entre 1.7 y 3.4 % con promedio de aproximadamente 2.5 %. Por tanto, los aportes al flujo total de infiltración son en mayor medida flujos matriciales y muy bajos los flujos preferenciales (Cuadro 4).

En la temporada lluviosa en la que se pudo cuantificar la K_s y α en el bosque natural, se observó el mismo patrón en los porcentajes de flujo al igual que en la temporada seca, nuevamente los mesoporos pequeños ocuparon el mayor porcentaje del flujo total de infiltración siendo mayor en el bosque natural ($82 \pm 26.48\%$), seguido del suelo revegetado ($73.3 \pm 19.23\%$), el suelo desnudo con un $65.8 \pm 15.33\%$ y finalmente el pastizal-matorral con un $57.5 \pm 31.87\%$ del flujo total. El análisis de varianza (ANOVA) entre temporadas para la disturboscuencia arrojó que existe una diferencia significativa ($p= 0.0026$) de los flujos de infiltración en temporada seca y lluviosa, siendo mayor en la lluviosa dado que los flujos a través de microporos (< 0.01 mm) resultaron ser significativamente más altos en la temporada lluviosa que en la temporada seca en todos los sitios. En el sitio de suelo desnudo es importante destacar como el número de mesoporos pequeños / m^2 de la temporada seca (9434012) a la temporada lluviosa (114514052) aumentan hasta en dos órdenes de magnitud, por lo tanto, la funcionalidad de los mesoporos pequeños y microporos en la temporada lluviosa es muy alta (Cuadro 4).

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 4. Porosidad efectiva y proporción de los flujos de infiltración en cada ambiente. NP= No presentó o no se pudieron estimar debido a la nula tasa de infiltración registrada. Números en negrita= flujo por mesoporos pequeños.

Uso/cobertura	Diam. aparente de poro (mm)	Poros/m² (secas)	Poros/m² (lluvias)	% flujo (secas)	% flujo (lluvias)
Suelo desnudo	> 1	21	207	1.7	1.2
	0.3-1	5802	58373	3.8	2.7
	0.3-0.01	9434012	114514052	80.3	65.8
	< 0.01	----	----	14.2	30.3
Suelo revegetado	> 1	26	52	3.4	1.5
	0.3-1	7194	14612	7.6	3.4
	0.3-0.01	6623386	25186966	86	73.3
	< 0.01	----	----	3	21.8
Pastizal-matorral	> 1	81	152	2.1	1.3
	0.3-1	22452	43244	4.6	2.1
	0.3-0.01	31675978	94673187	80.8	57.3
	< 0.01	----	----	12.5	39.2
Bosque natural	> 1	NP	158	NP	2.2
	0.3-1	NP	43789	NP	4.9
	0.3-0.01	NP	58958508	NP	82
	< 0.01	NP	----	NP	10.9

El cuadro 5 muestra el resumen de los parámetros fisicoquímicos del suelo para los distintos usos del suelo. Los resultados mostraron que la densidad aparente en el suelo desnudo y el suelo revegetado no difieren estadísticamente (1.14 ± 0.09 y 1.15 ± 0.26 g/cm³ respectivamente). Por otro lado, el bosque natural y el pastizal-matorral presentaron una densidad aparente menor (0.75 ± 0.11 y 0.88 ± 0.18 g/cm³ respectivamente). Esta se asocia a texturas medias (franco-limosas y algunas franco-arcillosas). El porcentaje de materia orgánica fue significativamente mayor en el bosque natural ($7.04 \pm 1.84\%$), siendo estadísticamente similares en el pastizal-matorral y el suelo revegetado (5.99 ± 1.33 y 5.42 ± 1.58 % respectivamente) y muy bajo en el suelo desnudo (2.67 ± 0.33 %) por estar libre de vegetación. El espesor de la hojarasca fue significativamente mayor en el bosque natural como era de esperarse (14.41 ± 4.19 cm) y nulo en el suelo desnudo.

El color en seco que se determinó para el suelo desnudo fue un rojo amarillento (5 YR 4/6), para el suelo revegetado un café (7.5 YR 4/4), para el pastizal-matorral un café oscuro (7.5 YR 3/4) y muy oscuro (7.5 YR 2.5/2) y finalmente para el bosque natural se

obtuvieron tres colores predominantes: café oscuro (7.5 YR 3/4), café amarillento oscuro (10 YR 4/4) y café muy oscuro (10 YR 2.5/2). Dicha variación puede estar respondiendo a las muestras que fueron tomadas a distintos radios de copa en donde la materia orgánica juega un papel importante y ocurre el proceso de humificación. Los porcentajes de arcilla en los suelos desnudo y revegetado fueron altos (62.13 ± 19.13 y 53.83 ± 15.77 % respectivamente) sin una diferencia significativa entre ellos. Por su parte, el bosque natural tuvo un porcentaje de arcillas significativamente menor a los demás sitios (6.02 ± 1.05 %). En cuanto a los porcentajes de limos, el bosque natural y el pastizal-matorral tuvieron los mayores porcentajes (53.4 ± 13.1 y 52.4 ± 11.1 %) sin diferencia significativa entre ellos. El porcentaje de arena fue mayor en el bosque natural (41.5 ± 11.1 %) seguido del suelo desnudo (35.9 ± 15.4 %) sin diferencias significativas entre los dos y el suelo revegetado tuvo el porcentaje más bajo de arenas (13.1 ± 8.6 %). Los valores bajos de K_s en temporada seca para el suelo desnudo y revegetado podrían estar relacionados con los altos porcentajes de arcilla que contienen y los valores más altos registrados en el pastizal-matorral podrían estar relacionados con los altos porcentajes de limos y arenas que podrían generar poros que resultan funcionales tanto en temporada seca como lluviosa.

En cuanto al pH determinado en agua, fue significativamente mayor en el suelo revegetado (6.07 ± 0.50) y menor en el bosque natural (5.48 ± 1.57) lo cual podría estar en función de la materia orgánica y los ácidos orgánicos de cada sitio. La humedad del suelo en la temporada seca osciló entre 0.10 (bosque natural) y $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (suelo revegetado), en cambio, durante la temporada lluviosa osciló entre $0.29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (suelo desnudo) y $0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (suelo revegetado) (Cuadro 5).

4.1.3 Resumen estadístico de las propiedades edáficas determinadas en campo y laboratorio.

Cuadro 5. Promedio y desviación estándar de las propiedades edáficas medidas en los diferentes sitios y pruebas de TukeyHSD para distintas variables fisicoquímicas entre ambientes ($p < 0.05$). Letras iguales indican que no existe diferencia estadística entre uso/cobertura de suelo para la variable indicada. Para la clase textural, color en seco y húmedo se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Uso/cobertura del suelo	Densidad aparente (g/cm ³)	Materia Orgánica (%)	Espesor de hojarasca (cm)	Clase textural	% arcillas	% limos	% arenas
Suelo desnudo	1.14 ± 0.09 a	2.67 ± 0.33 a	0.00 ± 0.00 a	Arcillosa	62.13 ± 19.13 a	19.16 ± 6.18 a	18.13 ± 14.37 a
Suelo revegetado	1.15 ± 0.26 a	5.43 ± 1.58 b	7.79 ± 3.32 b	Arcillosa	53.83 ± 15.77 a	33.04 ± 12.64 b	13.13 ± 8.61 b
Pastizal-matorral	0.88 ± 0.17 b	5.99 ± 1.33 b	1.75 ± 1.29 a	Franco Limosa	17.66 ± 14.01 b	53.42 ± 13.18 c	28.9 ± 9.9 c
Bosque natural	0.75 ± 0.10 c	7.04 ± 1.84 c	14.42 ± 4.19 c	Franco Limosa	6.02 ± 1.05 c	52.4 ± 11.15 c	41.58 ± 11.14 a

continuación...

Uso/cobertura del suelo	Color seco	Color húmedo	pH en agua	Hum. Vol. T. Seca (cm ³ /cm ³)	Hum. Vol. T. Lluviosa (cm ³ /cm ³)	N
Suelo desnudo	5 YR 4/6 (Rojo amarillento)	2.5 YR 2.5/4 (Café rojizo oscuro)	6.06 ± 0.32 b	0.13 ± .02	0.29 ± .02	15
Suelo revegetado	7.5 YR 4/4 (Café)	7.5 YR 3/3 (Café oscuro), 5YR 3/4 (Café rojizo oscuro)	6.07 ± 0.50 a	0.18 ± .01	0.46 ± .012	24
Pastizal-matorral	7.5 YR 3/4 (Café oscuro), 7.5 YR 2.5/2 (Café muy oscuro)	7.5 YR 2.5/2 (Café muy oscuro), 2.5 YR 2.5/2 (Negro rojizo)	5.91 ± 0.31 ca	0.14 ± .01	0.35 ± .015	30
Bosque natural	7.5 YR 3/4 (Café oscuro), 10 YR 4/4 (Café oscuro amarillento), 10 YR 2.5/2 (Café muy oscuro)	10 YR 2/2 (Café muy oscuro), 10 YR 5/3 (Café)	5.48 ± 1.57 d	.10 ± .01	0.36 ± .014	30

4.1.4 Relación de la K_s con las variables fisicoquímicas del suelo

Al explorar qué relación hay entre la K_s y las variables fisicoquímicas del suelo se observó que existe un efecto diferencial de éstas con la temporalidad. Contrario a lo esperado, en la temporada seca, la K_s en el suelo revegetado tuvo una correlación significativa con el porcentaje de arcillas ($r= 0.4426$, $p= 0.0446$), es decir, a mayores porcentajes de arcillas incrementa la K_s . También en el mismo sitio, la K_s tiene una correlación significativa con el porcentaje de limos en el suelo aunque en este caso es negativa ($r= -0.4846$, $p= 0.0163$), es decir, a mayores porcentajes de limos la K_s disminuye (Cuadro 6).

Para el pastizal-matorral se encontró una correlación significativa de la K_s con la densidad aparente del suelo ($r= 0.3526$, $p= 0.0492$), es decir, a medida que aumenta la densidad aparente también lo hace la K_s , lo que también resulta contrario a lo esperado (Cuadro 6).

En los sitios de bosque natural y suelo desnudo no se encontró ninguna correlación de la K_s con las propiedades edáficas determinadas en temporada seca. En temporada lluviosa, ningún sitio mostró correlación de la K_s con las propiedades edáficas determinadas. Sin embargo, varias propiedades edáficas sí muestran una correlación significativa entre ellas (Cuadro 6). En el caso del suelo desnudo, existe una fuerte correlación negativa ($r= -0.9715$, $p < 0.001$) entre los porcentajes de arena y arcilla, a medida que aumenta una disminuye la otra. En el suelo revegetado, a medida que aumentan los porcentajes de arcillas, aumenta la densidad aparente del suelo ($r= 0.5276$, $p= 0.008$) y disminuyen los porcentajes de arenas ($r= -0.6006$, $p= 0.0019$). En el pastizal-matorral, cuando aumenta el porcentaje de materia orgánica la densidad aparente disminuye ($r= -0.7158$, $p < 0.001$). De esta manera, cuando el espesor de la hojarasca aumenta también lo hace el porcentaje de materia orgánica ($r= 0.6919$, $p < 0.001$). Por su parte, el pH del suelo muestra las mismas correlaciones que guarda la materia orgánica con otras propiedades, de tal manera que el pH está en función del contenido de materia orgánica, cuando aumenta una lo hace la otra ($r= 0.5298$, $p= 0.0026$). En este mismo sitio se observó que a medida que los porcentajes de arcillas aumentan, disminuyen los porcentajes de arenas ($r= -0.4352$, $p= 0.0162$) (Cuadro 6). Es importante destacar que el bosque natural no mostró ninguna correlación significativa con la K_s en temporada seca ni en temporada lluviosa, inclusive entre otras propiedades edáficas lo cual puede estar ligado a la alta heterogeneidad que presentan las propiedades del suelo en este sitio.

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 6. Correlaciones significativas entre el $\ln K_S$ en temporada seca y lluviosa con las propiedades del suelo en cada ambiente.

Uso/cobertura del suelo	Variable	r	Valor de p
K_S en temporada seca			
Suelo revegetado	K_S vs % de arcillas	0.4426	0.0446
	K_S vs % de limos	-0.4846	0.0163
Pastizal-matorral	K_S vs D.A (g/cm ³)	0.3526	0.0492
Otras propiedades edáficas			
Suelo desnudo	% arcillas vs % arenas	-0.9715	< 0.001
Suelo revegetado	D.A (g/cm ³) vs % de arcillas	0.5276	0.0080
	% arcillas vs % arenas	-0.6006	0.0019
Pastizal-matorral	D.A (g/cm ³) vs % M.O	-0.7158	< 0.001
	% M.O vs Hojarasca (cm)	0.6919	< 0.001
	% arcillas vs % arenas	-0.4352	0.0162
	D.A (g/cm ³) vs pH	-0.5933	0.0005
	% M.O vs pH	0.5298	0.0026
	Hojarasca vs pH	0.4509	0.0123

4.1.5 Relación de la intensidad de las precipitaciones y la K_S en la zona de estudio

Un factor determinante en la infiltración de un área, además de la K_S del suelo es la intensidad de las precipitaciones. De esta manera, la capacidad de infiltración varía dependiendo de la K_S del suelo y las intensidades de las precipitaciones (Ziegler, 2004). Con base en los datos registrados por la estación meteorológica de la zona de estudio, Ruíz-Díaz (en proceso) analizó 76 eventos de precipitación entre el 1 de mayo del 2012 y el 1 de mayo del 2013. La intensidad promedio a los 10 minutos fue de 13.34 mm/h, a los 30 minutos fue de 5.23 mm/h y la intensidad total promedio de las precipitaciones fue de 1.19 mm/h. El Cuadro 7 muestra la estadística descriptiva para las intensidades de precipitación en la zona de estudio. Sin embargo, como puede apreciarse claramente en la Figura 6, las distribuciones probabilísticas son fuertemente asimétricas.

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 7. Parámetros estadísticos de las intensidades de los eventos de precipitación de la zona entre 1 mayo 2012- 1 mayo 2013 a los 10 y 30 minutos e intensidad total del evento (mm/h).

	Min.	1st.Qu.	Mediana	Media	3rd. Qu.	Max.
I₁₀	2.5	5.0	8.75	13.34	16.25	68.75
I₃₀	0.8	1.6	3.4	5.23	6.4	27.2
It	0.13	0.49	1.01	1.19	1.72	3.93

El mayor número de eventos de precipitación (59.21%) tuvieron intensidades entre 0-10 mm/h a los 10 minutos, a los 30 minutos el mayor número de eventos (64.47 %) tuvieron intensidades entre 0-10 mm/h. De la misma manera, las mayores frecuencias de las intensidades totales se encuentran entre 0-1.5 mm/h (Figura 8).

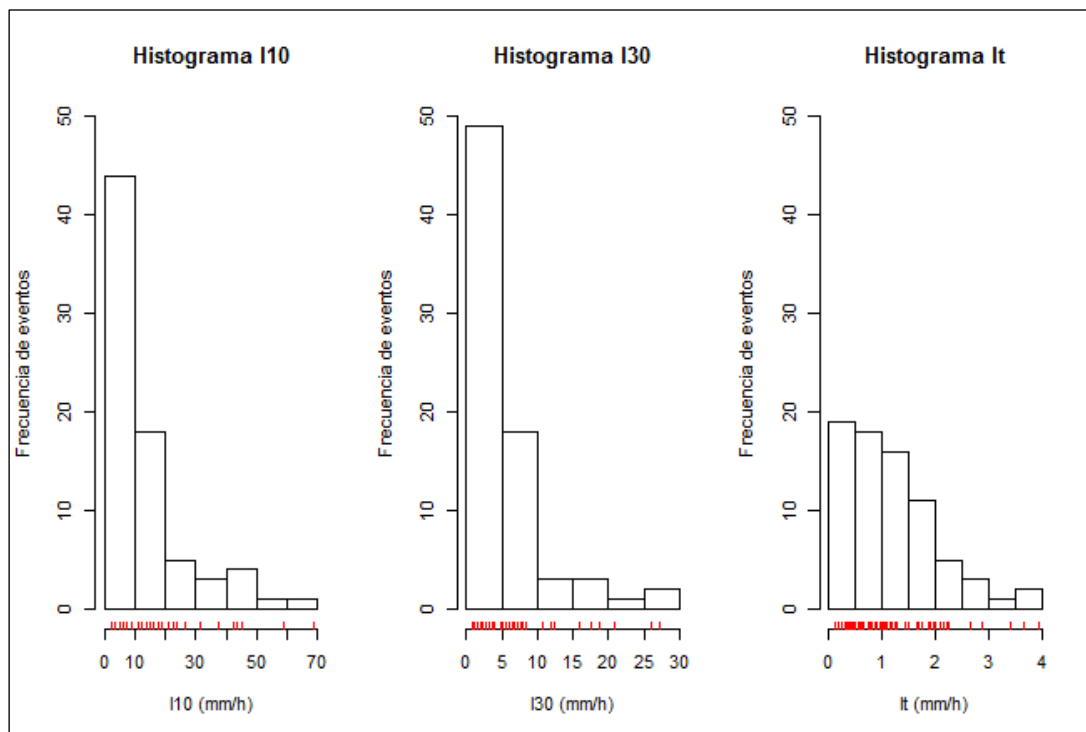


Figura 8. Frecuencias de los eventos de precipitación determinados a los 10 y 30 minutos de intensidad y la intensidad total de los eventos.

Al comparar las conductividades hidráulicas con las intensidades de precipitación en la zona, para la temporada seca en el suelo desnudo el 61.8 % de los eventos de precipitación sobrepasan la K_s media (6.51 mm/h), en el suelo revegetado el 31.6 % de los eventos sobrepasan la K_s media (13.25 mm/h), en el pastizal-matorral el 2.6 % de los eventos sobrepasan la K_s

media (46.27 mm/h) y en el bosque natural el 100 % de los eventos sobrepasan la K_s media (0.0 mm/h). Hay que recordar que en la temporada seca, el sitio de bosque natural no presentó infiltración. Este análisis permite inferir que es posible que se presente escorrentía por exceso en todos los sitios durante los primeros eventos de lluvia. Los resultados indican que la escorrentía sería mayor en el bosque natural y menor en el pastizal-matorral.

Sin embargo, durante la temporada lluviosa, ninguno de los eventos de precipitación (I_{10}) sobrepasan la K_s media del suelo desnudo (91.17 mm/h) o del pastizal-matorral (86.29 mm/h), para el suelo revegetado el 21% de los eventos sobrepasan la K_s media (18.01 mm/h) y en el bosque natural el 8 % de los eventos sobrepasan la K_s media (37.69 mm/h). La Figura 9 ilustra la relación entre la frecuencia de las intensidades (I_{10}) y la K_s media para los diferentes usos/coberturas en las dos temporadas muestreadas.

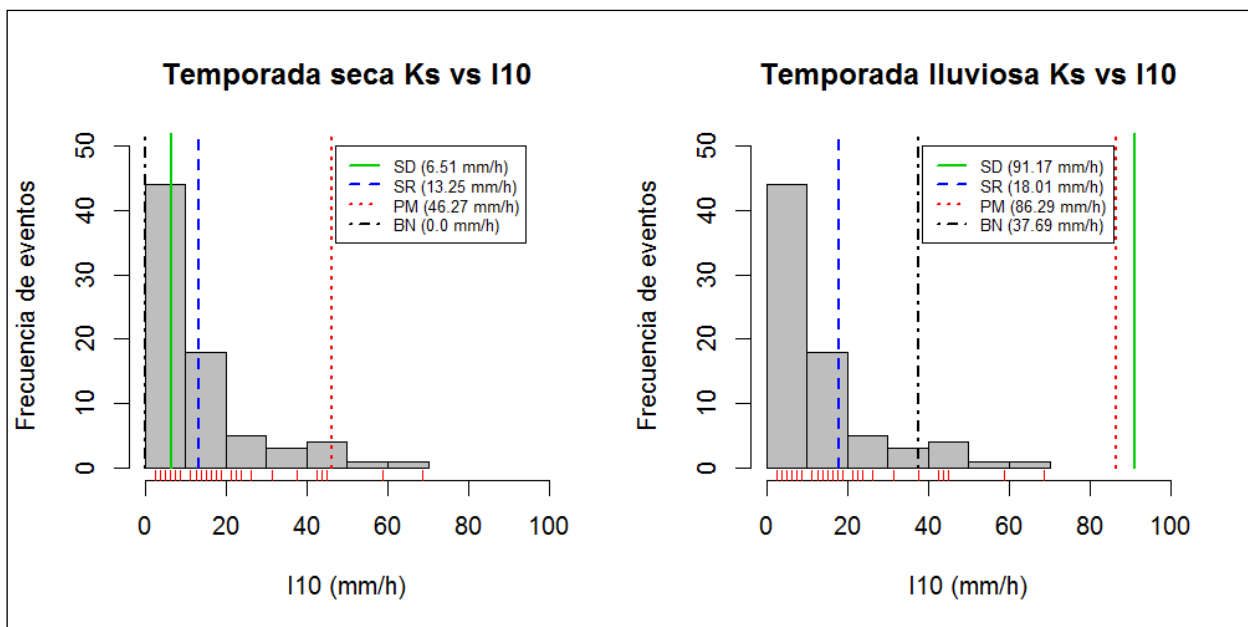


Figura 9. Frecuencias de los eventos de precipitación determinados a los 10 minutos de intensidad y el promedio de K_s obtenido en cada sitio durante la temporada seca y lluviosa.

Con base en los gráficos de caja y bigotes de la Figura 10, se observó que la intensidad máxima de las precipitaciones en la zona de estudio ocurren a los 10 minutos (eventos convectivos). También se observó que durante la temporada seca el promedio de ésta intensidad (13.3 mm/h) es menor que las K_s registradas al menos en 50% de los puntos de infiltración en el suelo

revegetado y 75 % del pastizal-matorral. Los sitios de bosque natural y suelo desnudo tienen K_s menores a la intensidad promedio de los eventos. Solo el pastizal-matorral tiene K_s mayores a la intensidad máxima de los eventos (68.8 mm/h) en un 25% de sus puntos de infiltración.

En cambio, durante la temporada lluviosa más del 75% de los puntos de infiltración en el bosque natural tienen K_s que sobrepasa la intensidad promedio de las precipitaciones (13.3 mm/h), en el suelo desnudo todo el sitio tiene una K_s mayor a la intensidad promedio de las precipitaciones. En el suelo revegetado, el 75% de los puntos de infiltración tienen una K_s mayor a la intensidad promedio de las precipitaciones y en el pastizal-matorral cerca del 95% de los puntos de infiltración tienen K_s mayor que la intensidad de las precipitaciones. Alrededor del 65% de los puntos de infiltración en el suelo desnudo y pastizal-matorral tienen una K_s mayor a la intensidad máxima de las precipitaciones (68.8 mm/h) (Figura 10).

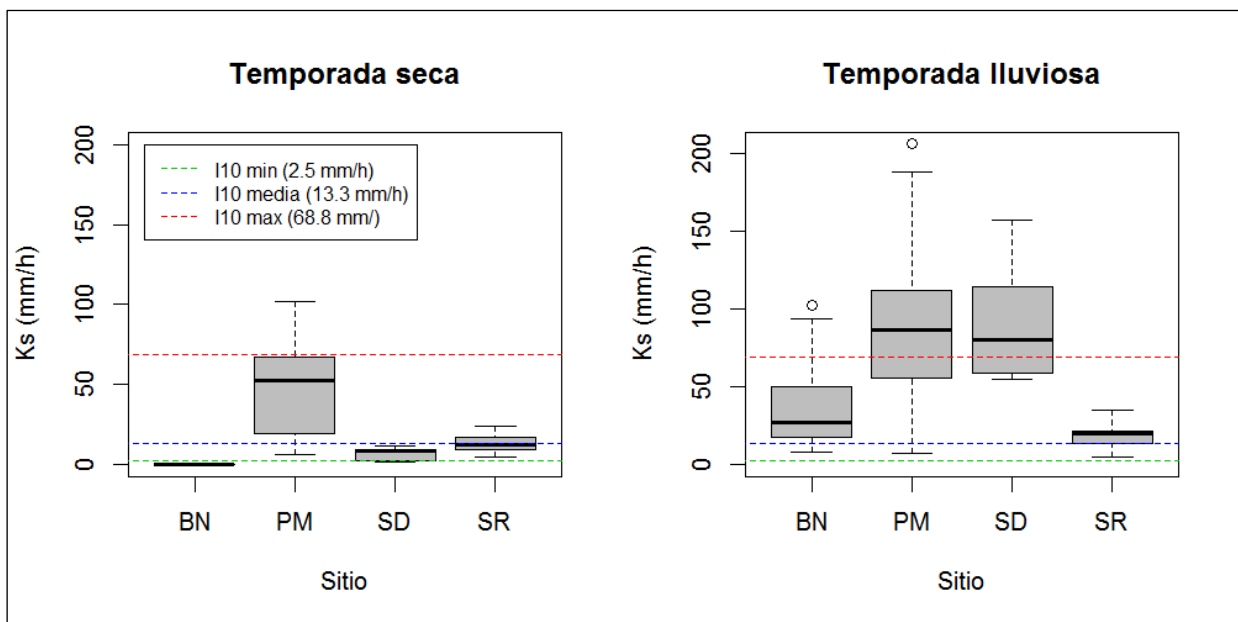


Figura 10. Comparación de las K_s registradas en cada sitio y los valores medio, máximo y mínimo de las intensidades de las precipitaciones a los 10 minutos en temporada seca y lluviosa.

Los resultados de este apartado rechazan la hipótesis 1a. “Si la capacidad de infiltración superficial de un suelo en términos generales depende directamente de la cobertura vegetal y la humedad edáfica, se espera que exista un gradiente de mayor a menor en el siguiente orden: bosque natural, suelo revegetado naturalmente, pastizal-matorral y suelo desnudo siendo mayor

en temporada lluviosa que en temporada seca”. El sitio con mayor cobertura vegetal (bosque natural), mayor contenido de materia orgánica y al mismo tiempo la humedad edáfica más baja tuvo nula capacidad de infiltración debido a la repelencia del agua por el suelo. La capacidad de infiltración en los cuatro sitios aumenta significativamente en temporada lluviosa, resultando mayor en el suelo desnudo. Estos resultados implican que la humedad edáfica y los contenidos de materia orgánica modifican la capacidad de infiltración del suelo. Sin embargo, esto será retomado posteriormente en la sección de discusión.

Por otro lado, la hipótesis 1b. “Dado que los flujos preferenciales dependen de la macroporosidad asociada a la bioturbación vegetal y animal y los flujos matriciales directamente de la matriz del suelo, se espera que exista mayor flujo preferencial en el bosque natural y mayor flujo matricial en el suelo desnudo que en los otros sitios”. Para la temporada seca esta hipótesis se rechazó, sin embargo, sí se pudo observar que el suelo revegetado tuvo mayor flujo preferencial y el suelo desnudo mayor flujo matricial. En la temporada lluviosa, la hipótesis resultó correcta, el bosque natural tuvo mayor flujo preferencial y el suelo desnudo mayor flujo matricial. Se trata de los sitios con mayor (bosque natural) y menor (suelo desnudo) contenido de materia orgánica. Esto será retomado en la sección de discusión.

4.2 EFECTO DE LA COPA DE LOS ARBOLES SOBRE LA K_s DEL SUELO EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO EN TEMPORADA SECA Y LLUVIOSA

4.2.1 Efecto de la copa de los árboles sobre la K_s del suelo en la disturboscuencia de estudio

Durante la temporada seca el efecto de la copa de los árboles pudo ser determinado en dos sitios: en el suelo revegetado y el pastizal-matorral. En el bosque natural no se pudo determinar debido a que no se registró infiltración y el suelo desnudo estuvo desprovisto de vegetación.

Cuadro 8. K_s y α promedio para cada una de los radios de copa de los árboles/arbustos en la disturboscuencia de estudio en temporada seca y lluviosa. Letras iguales indican que no existe diferencia estadística entre los radios de copa en cada uno de los uso/cobertura de suelo (Pruebas de TukeyHSD, $p < 0.05$).

Uso/cobertura del suelo	Radios de copa de árbol	K_s media \pm d.e (mm/h) (T. Seca)	α media \pm d.e (m^{-1}) (T. Seca)	K_s media \pm d.e (mm/h) (T. Lluviosa)	α media \pm d.e (m^{-1}) (T. Lluviosa)
Suelo revegetado	0.0	14.91 \pm 6.36 a	1.31 \pm 0.95 a	18.65 \pm 9.38 a	1.13 \pm 0.63 a
	0.5	12.11 \pm 4.71 a	1.40 \pm 0.98 a	20.93 \pm 3.18 a	0.75 \pm 0.26 a
	1.25	12.73 \pm 5.70 a	1.83 \pm 1.77 a	14.45 \pm 6.43 a	1.22 \pm 0.64 a
Pastizal-matorral	0.0	33.79 \pm 28.23 a	1.11 \pm 0.90 a	121.47 \pm 62.33 a	0.47 \pm 0.30 a
	0.5	45.88 \pm 23.80 a	1.17 \pm 0.96 a	77.64 \pm 41.8 a	0.58 \pm 0.27 a
	1.25	59.15 \pm 26.64 a	0.42 \pm 0.31 ab	59.77 \pm 32.88 ab	0.83 \pm 0.55 a
Bosque natural	0.0	NP	NP	28.77 \pm 26.07 a	1.38 \pm 0.89 a
	0.5	NP	NP	32.72 \pm 30.07 a	1.21 \pm 0.90 a
	1.25	NP	NP	51.58 \pm 28.08 a	1.93 \pm 1.05 a

Los análisis de varianza indicaron que a lo largo de la disturboscuencia y en la temporada seca no existen diferencias significativas de la K_s entre los tres radios de copa en los que se realizaron los ensayos de infiltración ($p = 0.4699$, 0.1151 y 0.7298 respectivamente), es decir, no se detectaron islas de infiltración.

Sin embargo, en la temporada lluviosa se encontró diferencia significativa entre la K_s registrada cerca del tronco de los árboles (0.0 radios de copa) y la registrada fuera de la copa de los árboles ($p = 0.0493$), lo cual indica que sí existen islas de infiltración y que hay un efecto de la copa de los árboles/arbustos sobre la capacidad de infiltración que tiene el suelo debajo de sus copas. Por otra parte, la K_s cerca del tronco de los árboles y a la mitad de la copa de los árboles no mostraron diferencias, pero sí una tendencia ($p = 0.0679$) que se puede apreciar en la Figura

11. Sin embargo, la K_s resultó muy semejante a la mitad de la copa de los árboles y fuera de estas ($p=0.9917$).

En la temporada seca, en el suelo revegetado la K_s es mayor cerca del tronco de los árboles que a la mitad y fuera de sus copas, es decir, sí hay un efecto de isla de infiltración aunque no significativo. Contrario a lo esperado, para el pastizal-matorral, la K_s fue mayor fuera de la copa de los arbustos y menor junto al tallo. Cabe señalar que se obtuvo un gradiente en la capacidad de infiltración, los valores de K_s aumentan a medida que se aleja del tallo de los arbustos. Este ambiente resultó contrario a lo esperado por lo que se esperaba mayor K_s cerca del tallo de los árboles y por tanto, no existen islas de infiltración (Cuadro 8, Figura 11).

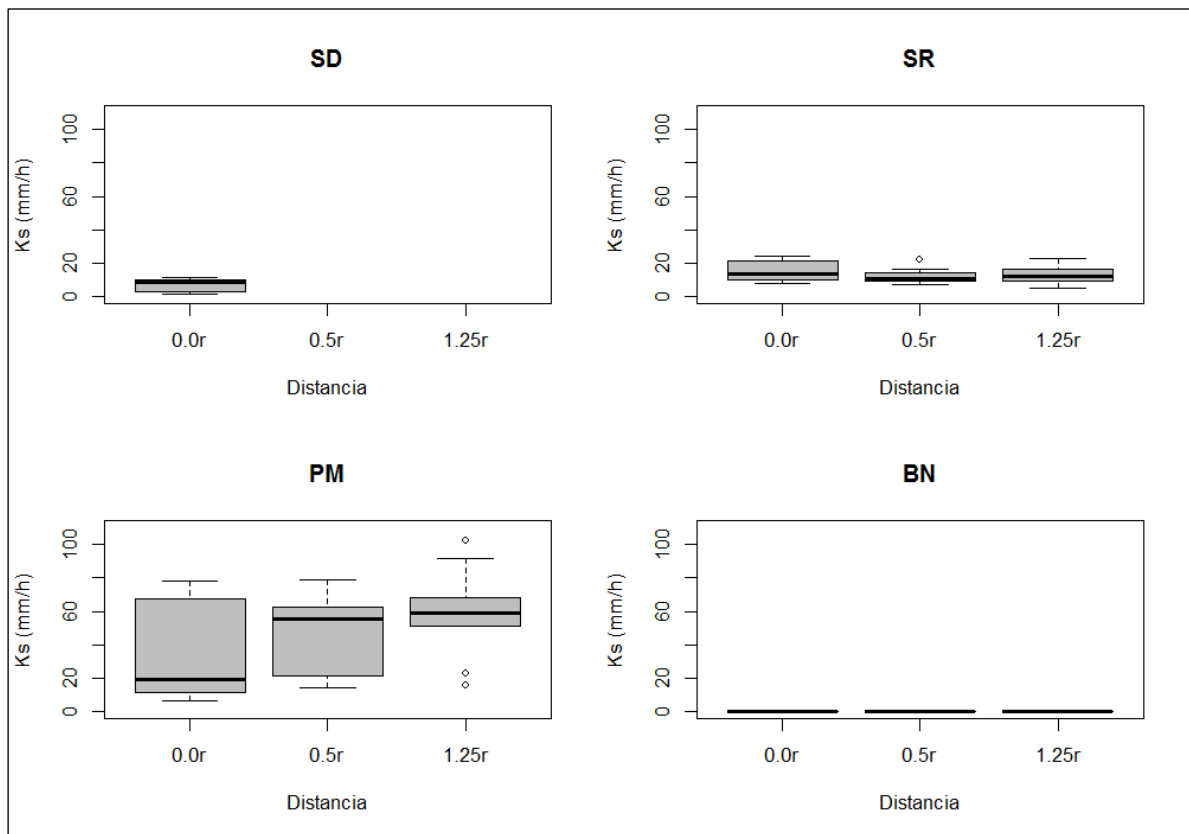


Figura 11. Gráfica de caja y bigotes que muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la K_s en la disturbosecuencia en temporada seca.

Para el caso de la temporada lluviosa, el efecto de islas de infiltración se encontró en el suelo revegetado, pastizal-matorral y el bosque natural. Dentro del suelo revegetado, la K_s fue mayor a la mitad de la copa de los árboles (20.93 ± 3.18 mm/h) enseguida junto al tronco (18.65 ± 9.38 mm/h) y menor fuera de las copa de los árboles (14.45 ± 6.43 mm/h) (Figura 12), sin diferencias

estadísticas entre ellas lo cual sugiere la presencia de islas de infiltración aun cuando la relación no fue significativa (Cuadro 12). Para el caso del pastizal-matorral ocurre totalmente lo contrario a lo registrado en la temporada seca, existe un efecto muy marcado de islas de infiltración en donde la K_s junto al tallo de los arbustos fue significativamente mayor (121.47 ± 62.33 mm/h) seguido de los valores registrados bajo la copa (77.64 ± 41.8 mm/h) y con los valores más bajos fuera de la copa de los arbustos (59.77 ± 32.88 mm/h) (Cuadro 8).

En las Figuras 11 y 12 (PM) se observa la existencia de gradientes inversos dependiendo de la temporada muestreada.

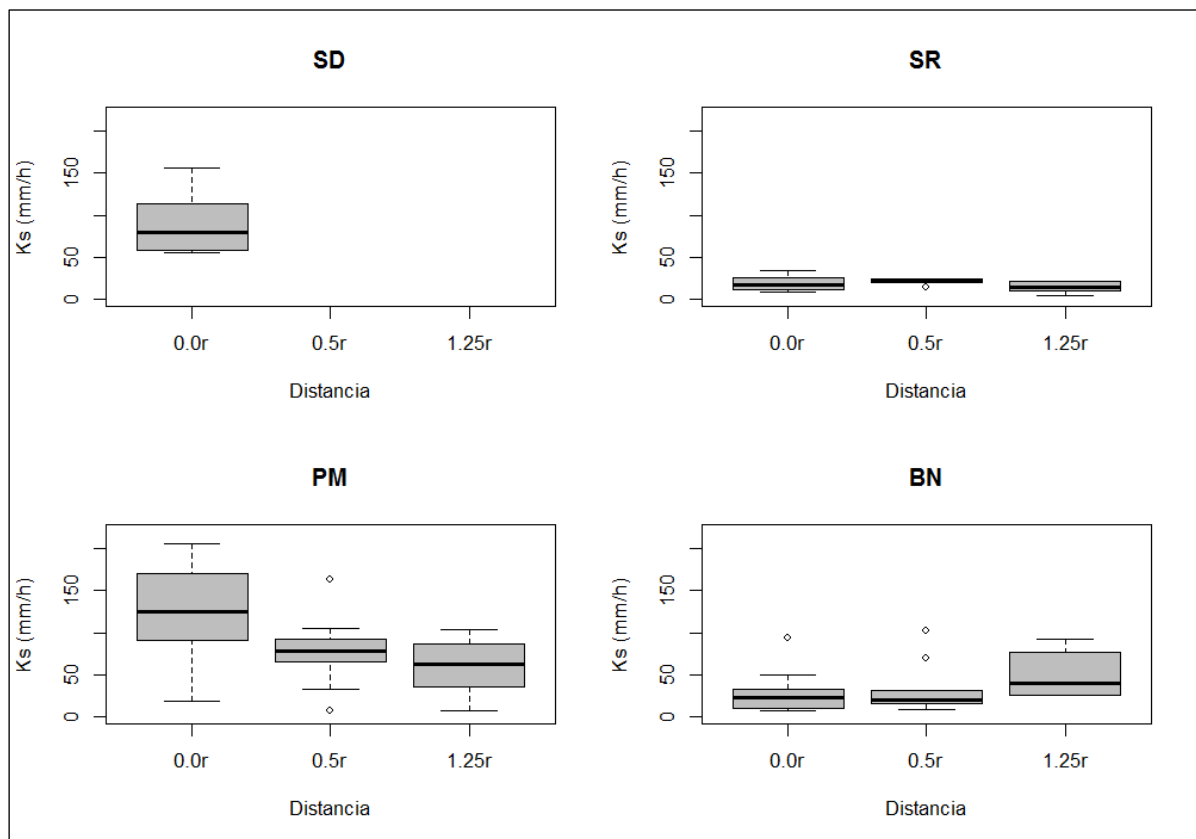


Figura 12. Gráfica de caja y bigotes que muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la K_s en la disturbosecuencia en temporada lluviosa.

En cuanto a los valores de α se puede observar que para la temporada seca dentro del suelo revegetado el inverso de la longitud capilar de los poros del suelo es mayor fuera de la copa de los árboles (1.83 ± 1.77 m⁻¹) después junto al tronco y menor a la mitad de la copa de los árboles (1.31 ± 0.95 y 1.40 ± 0.98 m⁻¹ respectivamente) sin diferencias significativas entre ellas. Por su parte, en el pastizal-matorral fue significativamente mayor a la mitad de la copa de los

arbustos y junto al tallo (1.11 ± 0.90 y $1.17 \pm 0.96 \text{ m}^{-1}$ respectivamente) sin diferencias significativas entre ellas y significativamente menor fuera de la copa de los arbustos ($0.42 \pm 0.31 \text{ m}^{-1}$) (Cuadro 8). De acuerdo con Elrick y Reynolds (1992) los valores de α junto al tallo y a la mitad de las copas corresponden a suelos con texturas finas (arcillosas) y bien estructurados y los valores fuera de la copa de los arbustos corresponde a suelos compactados, poco estructurados y arcillosos (Cuadro 2).

En la temporada lluviosa, los valores de α en el suelo revegetado fueron mayores fuera de la copa, después junto al tronco de los árboles (1.22 ± 0.64 y $1.13 \pm 0.63 \text{ m}^{-1}$ respectivamente) y menor a la mitad de la copa de los árboles ($0.75 \pm 0.26 \text{ m}^{-1}$), sin diferencias significativas entre ambas distancias. La longitud capilar promedio de los poros del suelo corresponden a las mismas texturas/estructuras mostradas en el pastizal-matorral para cada uno de los radios de árbol muestreados (Cuadro 2). En el caso del pastizal-matorral, el inverso de la longitud capilar de los poros fue mayor fuera de la copa de los arbustos ($0.83 \pm 0.55 \text{ m}^{-1}$) y menor junto al tallo y a la mitad de la copa de los arbustos (0.47 ± 0.30 y $0.58 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$ respectivamente) sin diferencias significativas entre las distancias (Cuadro 8). Los valores obtenidos de α indican un suelo compactado, poco estructurado y arcilloso (Cuadro 2).

Por su parte, la longitud de los poros en el bosque natural fueron mayores fuera de la copa de los árboles ($1.93 \pm 1.05 \text{ m}^{-1}$) y menor junto al tronco de los árboles ($1.38 \pm 0.89 \text{ m}^{-1}$) y aún más pequeños a la mitad de la copa ($1.21 \pm 0.90 \text{ m}^{-1}$) sin diferencias significativas entre ellos. Estos valores corresponden a un suelo con textura fina (arcillosa) y bien estructurado (Cuadro 2).

4.2.2 Efecto de la copa de los árboles/arbustos sobre la variación de algunas propiedades edáficas en la disturbosecuencia de estudio

Se exploró la relación que guardan algunas de las propiedades edáficas sobre los distintos radios de copa. En cuanto a la densidad aparente, para el suelo revegetado se obtuvo que es significativamente menor junto al tronco de los árboles ($0.95 \pm 0.17 \text{ g/cm}^3$, $p=0.023$) y aumenta a medida que se aleja de éste, no encontrando diferencias significativas entre las densidades obtenidas a la mitad de las copas como fuera de ellas (1.18 ± 0.14 , $p=0.183$ y $1.31 \pm 0.32 \text{ g/cm}^3$, $p=0.245$ respectivamente). Probablemente la adición de materia orgánica cerca de los troncos disminuye la densidad aparente, en cambio, donde existen menores aportes de materia orgánica

como lo es al exterior de la copa de los árboles, sobre un horizonte arcilloso o con paso de ganado esporádicamente, es de esperarse que se tengan mayores densidades aparentes. En el pastizal-matorral, se obtuvo el mismo patrón en los valores de densidad, menor junto al tronco de los arbustos ($0.76 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$) y significativamente mayor fuera de sus copas ($0.97 \pm 0.13 \text{ g/cm}^3$, $p= 0.0187$), en este caso, el pisoteo por ganado ocasiona compactación del suelo en las áreas abiertas con pastos. En el caso del bosque natural, no existe un efecto significativo de la copa sobre la densidad aparente, es muy similar en todo el sitio (Cuadro 9, Figura 13).

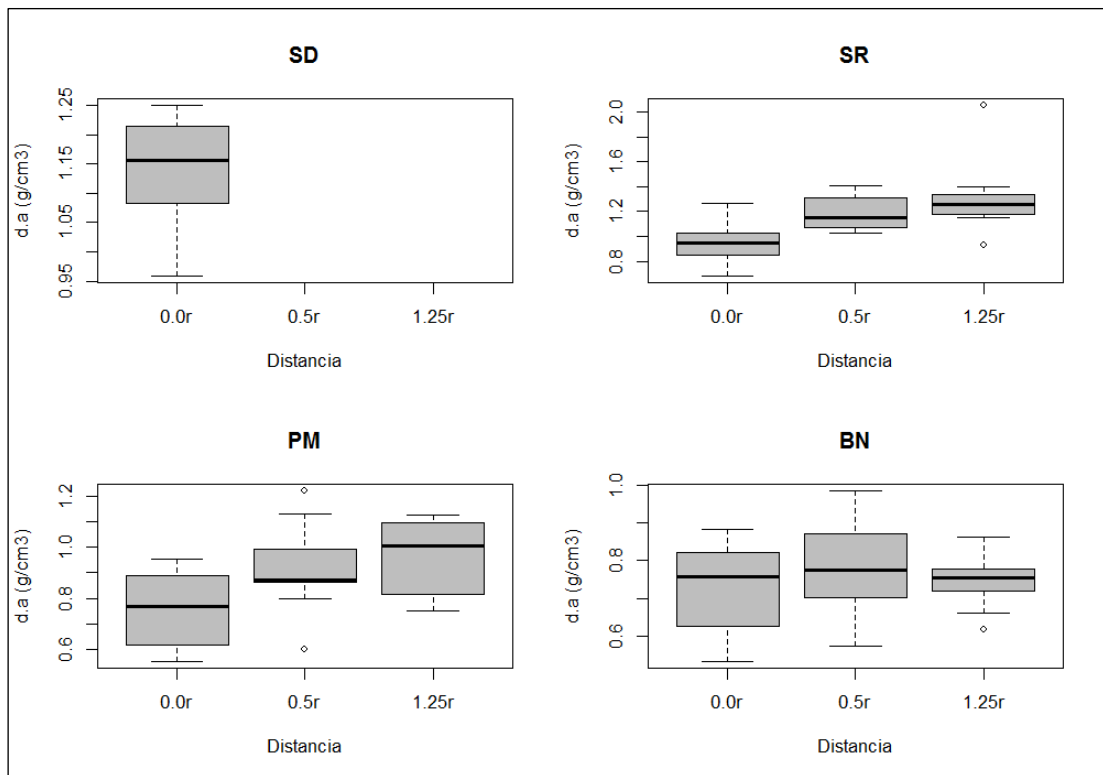


Figura 13. Se muestra el efecto de la copa de los árboles sobre la densidad aparente en la disturbosecuencia.

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 9. Promedios y d.e de algunas propiedades edáficas para cada uno de los radios de copa de los árboles/arbustos en la disturbosecuencia de estudio. Letras iguales indican que no existe diferencia estadística entre los radios de copa en cada uno de los uso/cobertura de suelo (Pruebas de TukeyHSD, $p < 0.05$).

Uso/cobertura del suelo	Radios de copa de árbol	D.A (g/cm ³)	M.O (%)	% arcillas	pH
Suelo revegetado	0.0	0.95 ±0.17 a	5.67 ±1.76 a	46.59 ±18.19 a	5.98 ±0.59 a
	0.5	1.18 ±0.14 b	5.04 ±1.96 a	57.92 ±9.41 a	6.29 ±0.41 a
	1.25	1.31 ±0.32 b	5.56 ±0.98 a	57.09 ±17.47 a	5.96 ±0.46 a
Pastizal-matorral	0.0	0.76 ±0.15 a	7.04 ±1.5 a	24.46 ±13.14 a	6.03 ±0.35 a
	0.5	0.91 ±0.17 a	5.64 ±1.01 bc	10.26 ±11.25 b	5.98 ±0.21 bc
	1.25	0.97 ±0.13 ab	5.29 ±0.74 c	18.27 ±14.87 b	5.72 ±0.28 c
Bosque natural	0.0	0.73 ±0.11 a	7.11 ±2.08 a	5.86 ±1.28 a	5.59 ±0.45 a
	0.5	0.74 ±0.12 a	7.05 ±1.62 a	6.0 ±0.68 a	5.36 ±0.44 a
	1.25	0.77 ±0.07 a	6.95 ±1.98 a	6.18 ±1.17 a	5.49 ±0.44 a

El contenido de materia orgánica (%) en el suelo revegetado no mostró un efecto significativo de la copa de los árboles, aunque sí ligeramente mayor cerca del tronco de los árboles. En el pastizal-matorral sí existe un efecto significativo de la copa de los arbustos siendo significativamente mayor el contenido de materia orgánica junto a los tallos (7.04 ±1.5 %) sin diferencias significativas a la mitad de las copas y fuera de ellas (5.64 ±1.01 y 5.29 ±0.74 % respectivamente) y nuevamente en el bosque natural no existe un efecto significativo de la copa sobre el contenido de materia orgánica lo cual puede corresponder con los aportes de hojarasca en el sitio (Cuadro 9, Figura 14).

En cuanto al espesor de la hojarasca que tiene una relación con los contenidos de materia orgánica que posee el suelo (Cuadro 6), se pudo determinar que en el suelo revegetado es mayor junto al tronco de los árboles (10.11 ±3.66 cm) y disminuye conforme se aleja del tronco. En el pastizal-matorral no existe un efecto de la copa de los arbustos sobre el espesor de hojarasca, pero sí una tendencia donde el espesor fue mayor cerca del tallo (2.08 ±0.89 cm) luego bajo la copa (1.67 ±0.74 cm) y menor fuera de la copa (1.51 ±0.67 cm). En el bosque natural no existe un efecto significativo de la copa sobre el espesor de la hojarasca, los pinos guardan distancias relativamente cercanas que ocasionan un bosque con cubierta cerrada aportando hojarasca que se acumula en forma homogénea en el suelo (Figura 15).

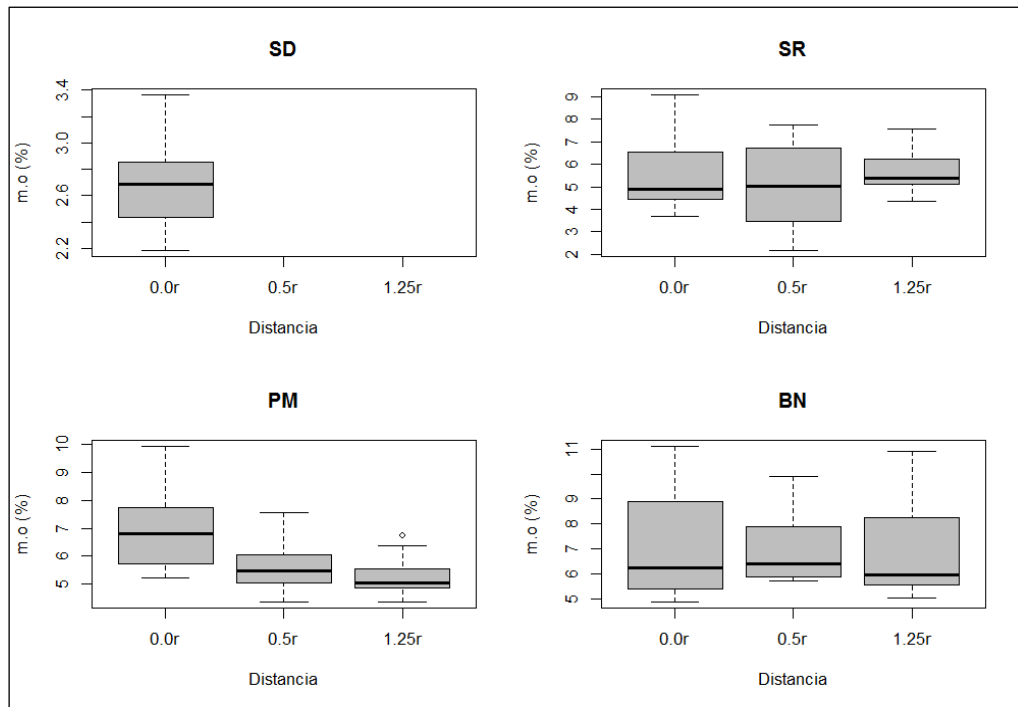


Figura 14. Efecto de la copa de los árboles sobre la cantidad de materia orgánica edáfica en la disturbosecuencia.

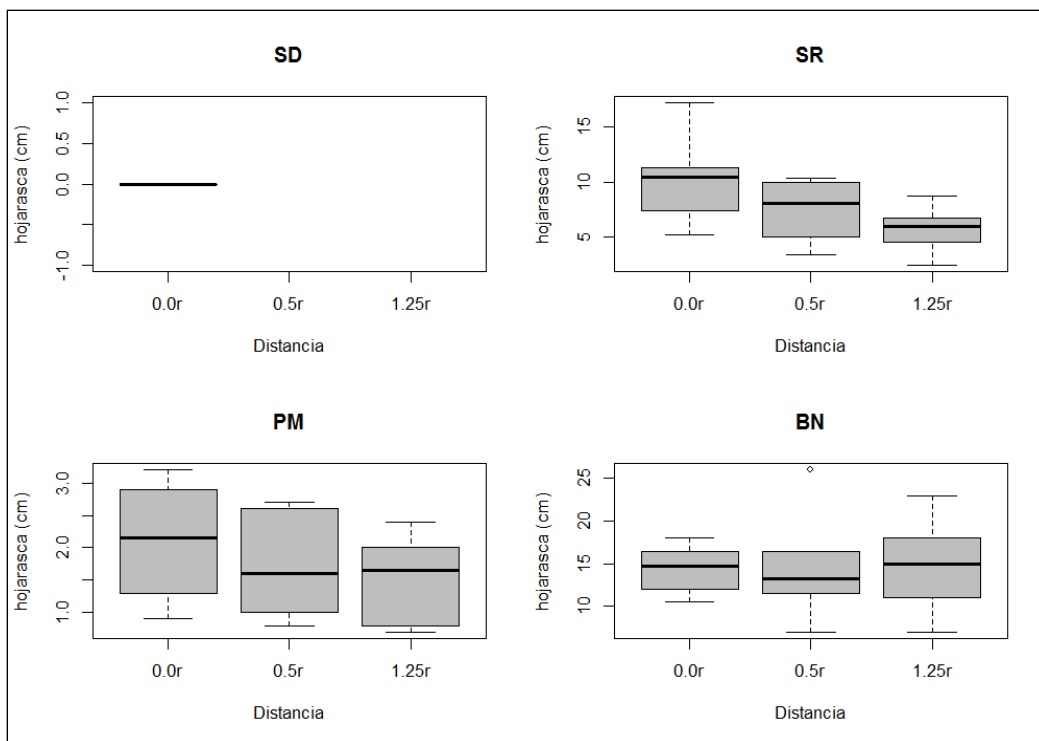


Figura 15. Efecto de la copa de los árboles sobre el espesor de hojarasca en la disturbosecuencia.

Respecto al pH, se encontró que no existe un efecto significativo de la copa de los árboles sobre el pH en el suelo revegetado ni en el bosque natural, sin embargo, en el pastizal-matorral el pH resultó ser significativamente más alto junto al tronco de los arbustos y menor fuera de la copa, lo que podría estar asociado a los mayores contenidos de materia orgánica cerca de los troncos (Cuadro 9, Figura 16).

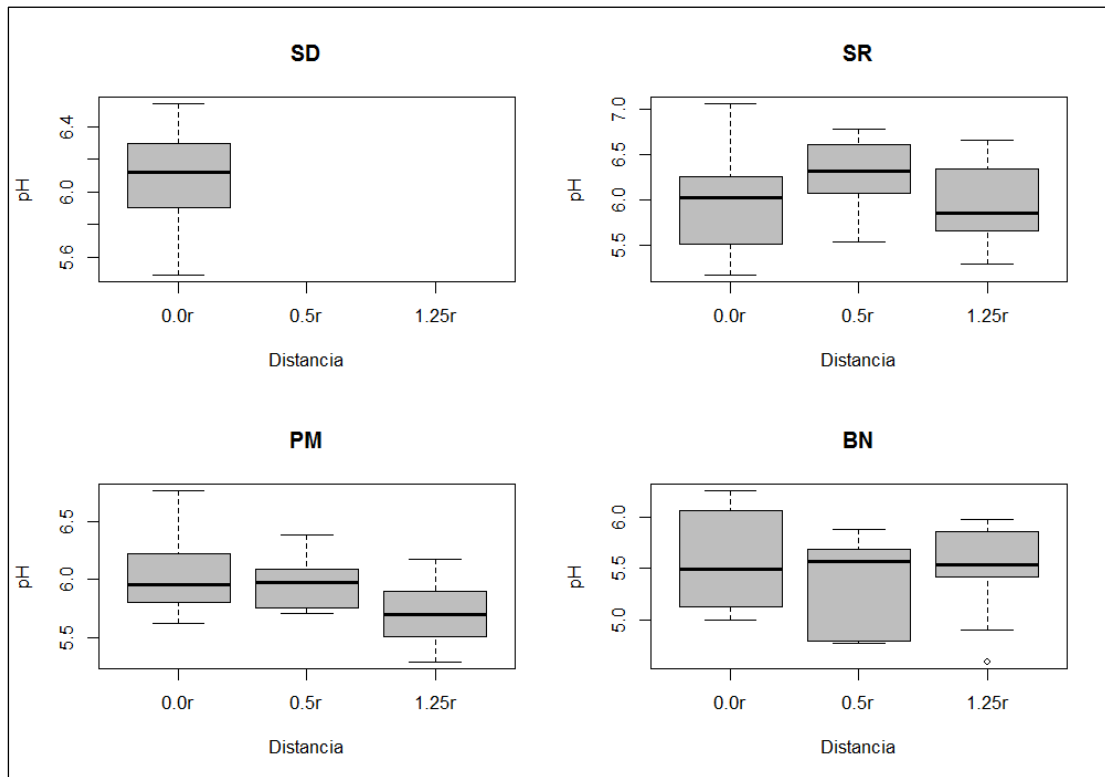


Figura 16. Efecto de la copa de los árboles sobre el pH en la disturbosecuencia.

De acuerdo a la hipótesis 2. “Debido a la adición de materia orgánica que generan las copas de los árboles y la bioturbación por raíces cercanas a los tallos modificando las propiedades físicas del suelo, se espera que exista una mayor capacidad de infiltración cerca de los tallos de los árboles/arbustos que fuera de sus copas en temporada lluviosa siendo más visible en el pastizal-matorral”. Los resultados indican la ocurrencia de islas de infiltración y el efecto a escala de individuo de arbusto/árbol sobre las propiedades edáficas, tal como se hipotetizó. Estas islas de infiltración son más visibles en el pastizal-matorral. Sin embargo, se encontró una variación dependiente de a) la temporalidad y b) cobertura. De forma que la temporalidad genera cambios en la humedad edáfica y la cobertura distintos contenidos de materia orgánica a nivel de individuo. Esto será retomado posteriormente en la sección de discusión.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA REPELENCIA REAL Y POTENCIAL EN LA DISTURBOSECUENCIA Y SUS VALORES CRÍTICOS DE HUMEDAD ASOCIADOS

Debido a la nula infiltración registrada en el bosque natural surgió la inquietud de explorar a profundidad el fenómeno de repelencia al agua y su efecto en la capacidad de infiltración. Ya que los mismos sitios de muestreo mostraron un comportamiento diferenciado entre las épocas seca y lluviosa. Se infirió que la hidrofobicidad en los ambientes estudiados tiene un carácter reversible. Por lo tanto, se determinó la relación entre hidrofobicidad y contenido de humedad con el fin de conocer el grado de humedad con el que se revierte la hidrofobicidad en los suelos analizados en este trabajo.

4.3.1 Repelencia real con MED y humedad volumétrica en temporada seca y lluviosa

La repelencia real medida como severidad (MED) que se presentó en la temporada seca fue significativamente mayor en el bosque natural (28.5 ± 4.47 % etanol) mostrando una repelencia extrema (Dekker & Ritsema, 1994) seguido del suelo revegetado (22 ± 8.62 % etanol) también con una repelencia extrema. El pastizal-matorral presentó una repelencia moderada (5.3 ± 4.7 % etanol) y el suelo desnudo se mostró totalmente hidrofílico (figura 17). Los valores de humedad registrados oscilaron entre 0.1 y $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Durante la temporada lluviosa la hidrofobicidad de los sitios con cubiertas vegetales fue significativamente menor que en la temporada seca ($p=0.0148$) donde el suelo revegetado tuvo una repelencia fuerte (9.58 ± 18.9 % etanol) sin diferencias con el bosque natural que tuvo una repelencia moderada (6.97 ± 9.59 % etanol), el pastizal-matorral continuó con una repelencia ligera (2.93 ± 1.76 % etanol) y el suelo desnudo nuevamente mostró ser totalmente hidrofílico (Figura 17).

El análisis de correlación mostró que en la temporada seca existe un efecto altamente significativo ($r=0.5386$, $p<0.001$) del aumento de la hidrofobicidad conforme incrementan los contenidos de materia orgánica en los suelos de la disturbosecuencia de estudio. Sin embargo, esta correlación no es significativa durante la temporada lluviosa ($r=0.1376$, $p=0.1742$) (Figura 18). Durante la temporada seca, en el pastizal-matorral se obtuvieron correlaciones positivas de la repelencia con el contenido de materia orgánica ($r=0.8224$, $p<0.001$) y el pH ($r=0.4272$, $p=0.0185$) que al parecer, esta última está en función de la materia orgánica (Cuadro 6).

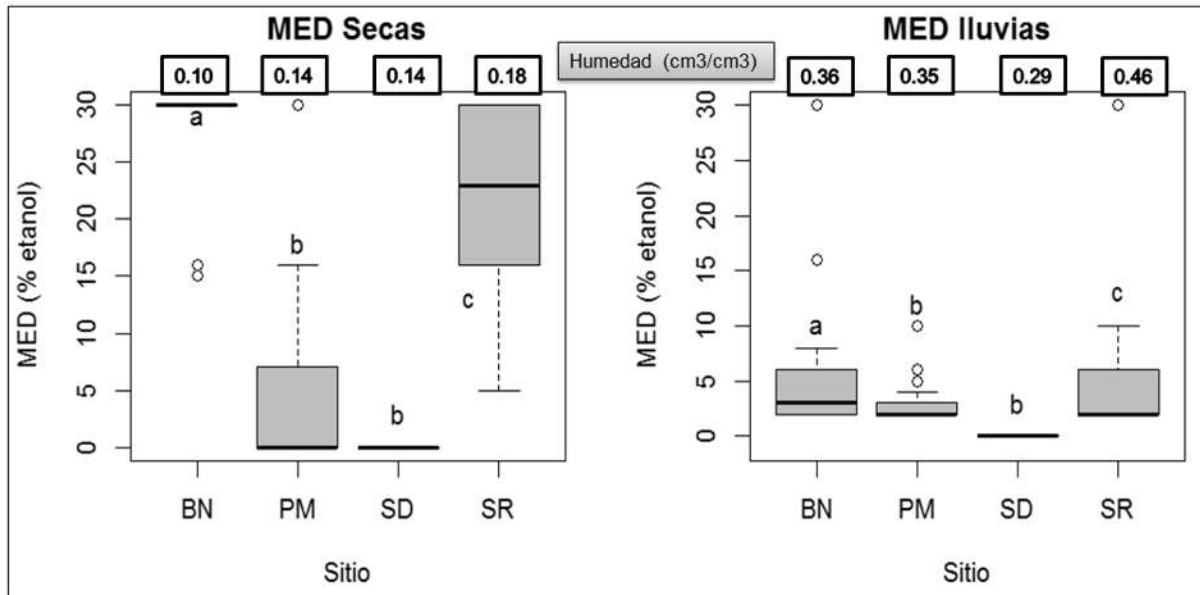


Figura 17. Concentraciones de etanol y humedades registradas en campo en cada uno de los sitios durante la temporada seca y lluviosa. Letras iguales indican que no existe diferencia significativa entre sitios (TukeyHSD, $p < 0.05$).

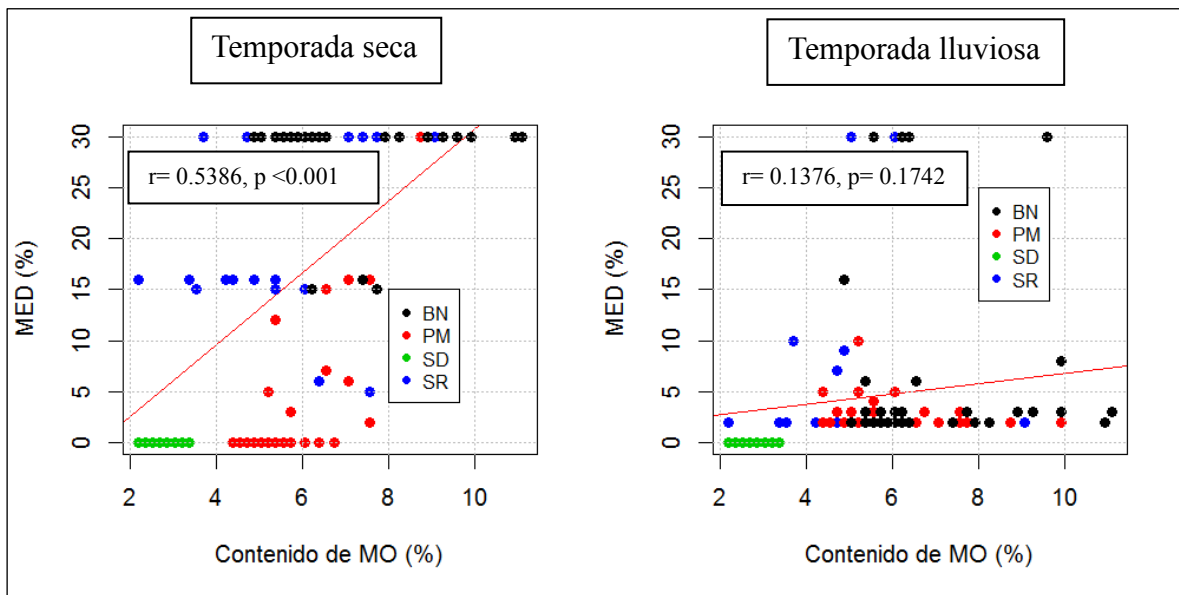


Figura 18. Correlación entre la hidrofobicidad y el contenido de materia orgánica de los sitios en temporada seca y lluviosa.

Respecto al efecto de la copa del árbol sobre la repelencia, se puede mencionar que en la temporada seca, el grado de repelencia en el suelo revegetado mostró ser significativamente mayor cerca del tronco de los árboles seguido de los valores a la mitad de la copa (28.25 ± 4.94

y 24.62 ± 7.4 % etanol respectivamente) sin diferencias significativas entre ellas y menor fuera de la copa de los árboles (13.12 ± 4.73 % etanol). Esto sugiere la existencia de “islas de hidrofobicidad” dentro del sitio.

Para el caso del pastizal-matorral también se pudieron apreciar “islas de hidrofobicidad”. Estas muy marcadas en donde los porcentajes de etanol son significativamente mayores cerca del tallo de los arbustos (13.4 ± 10.16 % etanol) y nulo fuera de la copa de los arbustos (0.0 % etanol) es decir, la materia orgánica aportada por las copas de los arbustos del sitio está asociada a la hidrofobicidad. Los resultados indican que los pastos al exterior de la copa poseen materia orgánica que permite al suelo ser hidrofílico. El bosque natural no mostró un efecto de la copa de los árboles sobre la hidrofobicidad, es decir, la alta hidrofobicidad que presentó el sitio no presentó un patrón asociado con la distancia al tronco. Esto fue interpretado como la ocurrencia de mayor homogeneidad en este ambiente (Cuadro 9).

En la temporada lluviosa la severidad de la repelencia disminuyó drásticamente. En el suelo revegetado fue mayor cerca del tronco de los árboles seguido de los valores a la mitad de la copa (14.37 ± 20.74 y 11.12 ± 25.8 % etanol respectivamente) y menor fuera de la copa de los árboles (3.25 ± 2.54 % etanol) sin diferencias significativas entre las tres distancias. Sin embargo, aún en temporada lluviosa se corrobora la existencia de “islas de hidrofobicidad” dentro del sitio aunque en menor grado de repelencia.

En el caso del pastizal-matorral no se pudieron apreciar “islas de hidrofobicidad” al contrario, la repelencia al agua fue menor junto al tronco de los arbustos (2.3 ± 0.96 % etanol) y un poco mayor a la mitad y fuera de la copa de los arbustos sin diferencias significativas entre estas dos distancias (3.3 ± 1.56 y 3.1 ± 2.46 % etanol). Esto sugiere que el tipo de materia orgánica que poseen los arbustos del pastizal-matorral es fácilmente reversible a la hidrofobicidad cuando pasa de la temporada seca ($0.14 \pm .01$ cm³/cm³ de humedad) a la temporada lluviosa (0.35 ± 0.15 cm³/cm³ de humedad). El bosque natural mostró un patrón muy similar al existente en el suelo revegetado, donde aún en temporada lluviosa se corroboró la existencia de “islas de hidrofobicidad” dentro del sitio, aunque en menor grado de repelencia que el suelo revegetado (Cuadro 10).

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturboscuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Cuadro 10. Efecto de la copa de los árboles sobre la severidad de la repelencia real en los sitios con cobertura vegetal en temporada seca y lluviosa.

Uso/cobertura del suelo	Radios de copa de árbol	MED (%) (T. Seca)	Clase de repelencia (Dekker & Ritsema 1994) (T. Seca)	MED (%) (T. Lluviosa)	Clase de repelencia (Dekker & Ritsema 1994) (T. Lluviosa)
Suelo revegetado	0.0	28.25 ±4.94 a	extrema	14.37 ±20.74 a	fuerte
	0.5	24.62 ±7.4 ab	extrema	11.12 ±25.8 a	fuerte
	1.25	13.12 ±4.73 c	fuerte	3.25 ±2.54 a	ligera
Pastizal matorral	0.0	13.4 ±10.16 a	fuerte	2.3 ±0.96 a	ligera
	0.5	2.3 ±5.07 b	ligera	3.3 ±1.56 a	ligera
	1.25	0.0 ±0.0 bc	no repelente	3.1 ±2.46 a	ligera
Bosque natural	0.0	27.1 ±6.11 a	extrema	9.4 ±11.64 a	fuerte
	0.5	30.0 ±0.00 a	extrema	6.0 ±8.67 a	moderada
	1.25	28.5 ±4.74 a	extrema	5.5 ±8.69 a	moderada

4.3.2 Relación entre contenido de humedad y repelencia potencial en la disturboscuencia

Los resultados obtenidos de la prueba del MED (% etanol) y humedad volumétrica (cm^3/cm^3) desde saturación hasta el secado a 105 °C mostraron que no existe una correlación significativa entre el grado de hidrofobicidad del suelo y el porcentaje de humedad que tienen en ese momento ($r = -0.0012$, $p = 0.49$). Tampoco existe correlación significativa si se toman solo los valores determinados a temperatura ambiente ($r = -0.0287$, $p = 0.1325$).

La Figura 19 muestra un incremento en la hidrofobicidad cuando los suelos tienen una humedad volumétrica entre 0.2 y 0.28 cm^3/cm^3 .

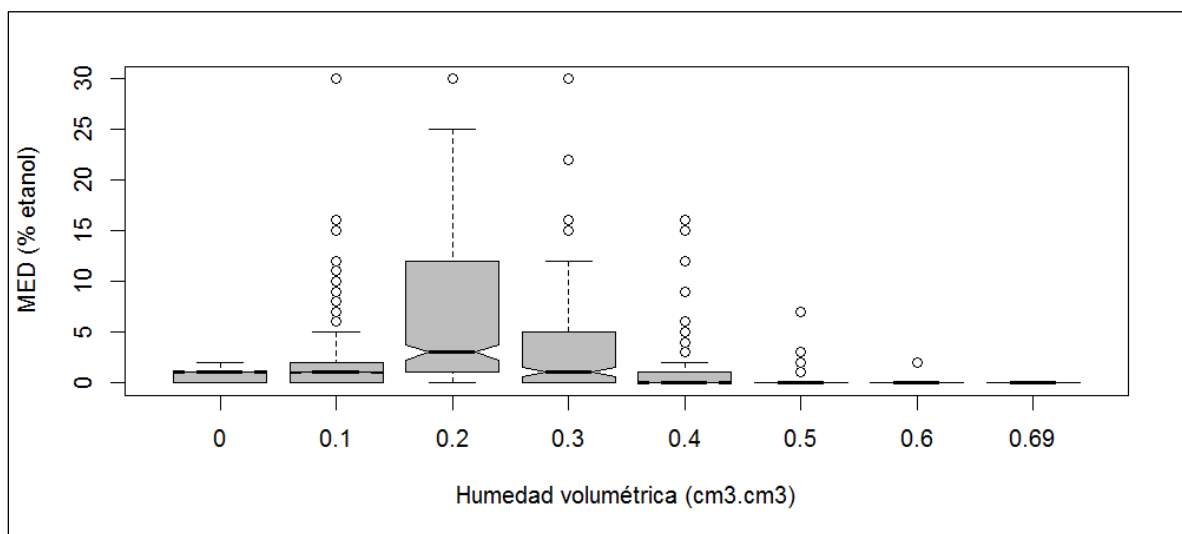


Figura 19. Gráfica de caja y bigotes que muestra el cambio de la repelencia del suelo con respecto a la humedad volumétrica desde saturación hasta el secado de las muestras expresado en intervalos de 0.04 cm^3/cm^3 se incluyen los datos de todos los sitios.

Haciendo un análisis por sitio, en el bosque natural el valor crítico de humedad se presentó a los $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ con porcentajes de etanol promedio del 19 % y disminuye drásticamente cuando se alcanza una humedad de $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. El suelo revegetado presentó el mismo valor crítico de humedad con un 7 % de etanol promedio y una disminución marcada de la hidrofobicidad a los $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Figura 20).

De la misma manera, el valor crítico de humedad en el pastizal-matorral se registró a los $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de humedad volumétrica a una repelencia promedio de 1.5 % etanol. Cuando la humedad aumenta a $0.48 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y hasta saturación el suelo permanece hidrofílico. El suelo desnudo siempre se mostró hidrofílico desde saturación de las muestras hasta el secado a 105°C (Figura 20).



Figura 20. Comportamiento de la hidrofobicidad expresado en concentraciones de etanol (%) a través del cambio del contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3) expresado en clases para cada uno de los sitios.

Los resultados anteriores, sugieren que los suelos del área de estudio revierten su hidrofobicidad cuando se encuentran aproximadamente a la mitad de su capacidad de saturación, excepto el suelo desnudo que siempre se mostró hidrofílico. Además, contrario a lo esperado, la capacidad de infiltración del suelo en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino en la zona de estudio parece ser una función del grado de hidrofobicidad del suelo. A su vez asociada al tipo y cantidad de materia orgánica así como al contenido de humedad que confiere la temporalidad.

Los resultados obtenidos de la prueba del WDPT (Tiempo de penetración de una gota de agua, seg) desde saturación hasta el secado a 105 °C mostraron que no existe una correlación significativa entre el grado de hidrofobicidad del suelo y el porcentaje de humedad que tienen en ese momento ($r = -0.0091$, $p = 0.6185$). Sin embargo, sí existe una correlación si se toman solo los valores determinados a temperatura ambiente sin el secado ($r = -0.1259$, $p = 0.0024$). Esta condición se asume como la más similar a lo que ocurre naturalmente en condiciones de campo.

El análisis por sitio mostró que el bosque natural presentó su valor crítico de humedad a los $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ con tiempos promedio de persistencia de 15 segundos (ligeramente repelente según Dekker & Jungerius (1990)). Para el suelo revegetado el valor crítico de humedad es igual que el bosque natural, este se encuentra a una persistencia promedio de 6.5 segundos (ligeramente repelente). En el pastizal-matorral también el valor crítico de humedad fue a los $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a persistencias promedio 3.7 segundos (No repelente). El suelo desnudo siempre se mostró hidrofílico desde saturación de las muestras hasta el secado a 105 °C (Figura 21).

En general se pudo observar que las pruebas del MED (% etanol) y WDPT (seg.) permiten obtener los mismos resultados en cuanto a los valores críticos de humedad.

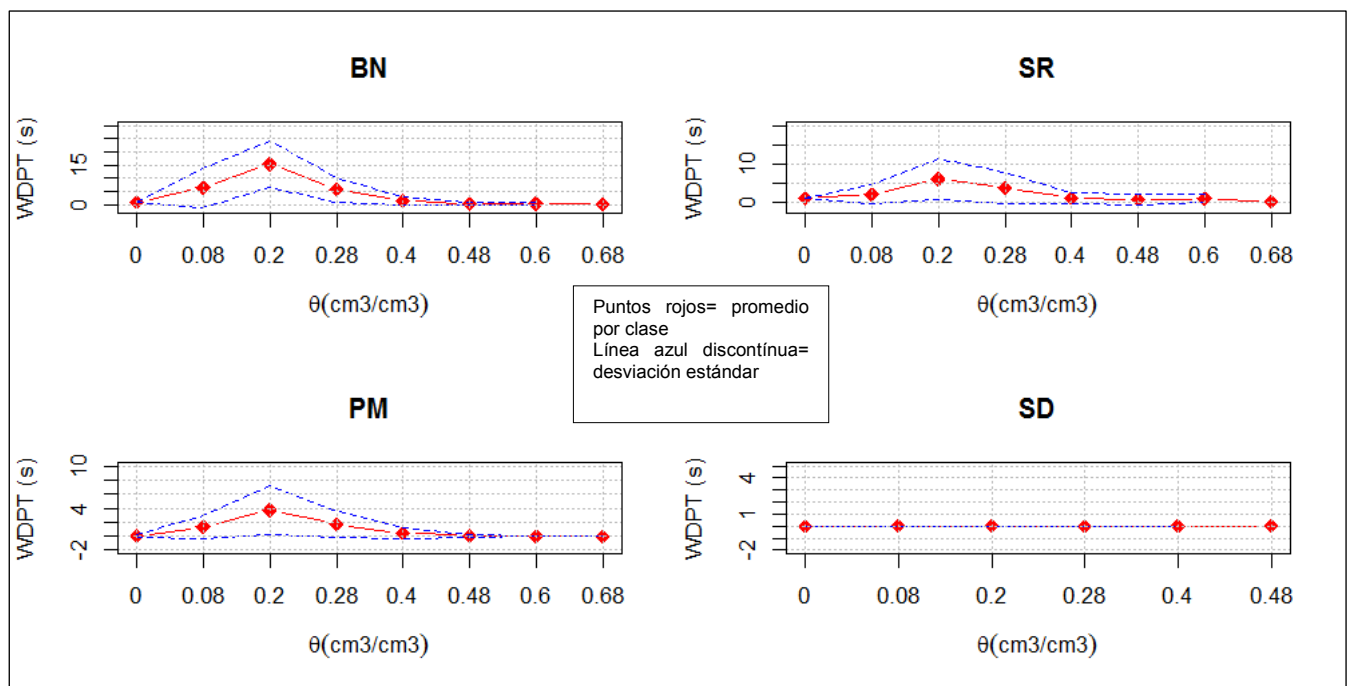


Figura 21. Comportamiento de la hidrofobicidad expresado en persistencia (WDPT, seg) a través del cambio del contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3) expresado en clases para cada uno de los sitios.

De acuerdo a la hipótesis 3. “Se espera que durante la temporada seca exista mayor hidrofobicidad en el suelo relacionada con los contenidos de humedad y materia orgánica en cada uno de los sitios siendo mayor en el bosque natural y menor en el suelo desnudo”. Los resultados mostraron que la hipótesis fue correcta. Efectivamente la hidrofobicidad es significativamente mayor en temporada seca y está asociada a bajos contenidos de humedad y correlacionada con los contenidos de materia orgánica de cada sitio. En este caso el bosque natural con nula infiltración tuvo una repelencia extrema. Sin embargo, durante la temporada lluviosa la hidrofobicidad se revirtió aunque no en su totalidad, excepto en el suelo desnudo que siempre fue hidrofílico. Los suelos de este estudio requieren aproximadamente de la mitad de su saturación para revertir su hidrofobicidad. Por lo tanto, la K_s parece ser una función de la hidrofobicidad asociada al tipo y contenido de materia orgánica de cada sitio en una escala temporal. Esto será retomado posteriormente en la sección de discusión.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA K_s EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO DEL SUR DE LA CUENCA DE CUITZEO

En el presente apartado se tomaron los valores de K_s como descriptores de la capacidad de infiltración del suelo. En términos generales, este apartado discute el por qué la hidrofobicidad determinada en campo y laboratorio repercute en la variación temporal de la capacidad de infiltración del suelo de acuerdo a los resultados obtenidos. Por tal motivo, en este mismo apartado se discuten simultáneamente las hipótesis 1a y 3.

En la **hipótesis 1a** se planteó que si la capacidad de infiltración superficial de un suelo en términos generales depende directamente de la cobertura vegetal y la humedad edáfica, se esperaría un gradiente de mayor a menor en el orden: bosque natural, suelo revegetado naturalmente, pastizal-matorral y suelo desnudo siendo mayor en temporada lluviosa que en temporada seca. De acuerdo a los resultados, la hipótesis se rechazó. El bosque natural con mayor cobertura vegetal tuvo nula infiltración y el pastizal-matorral resultó mayor en la temporada seca, sin embargo en temporada lluviosa, la capacidad de infiltración fue mayor en el suelo desnudo, hecho que también resultó contrario a lo esperado. La capacidad de infiltración en los suelos de la disturbosecuencia aumenta significativamente en lluvias. Estos resultados ponen de manifiesto que si bien existe una relación entre la cobertura y la capacidad de infiltración, esta relación no es directa o lineal.

Con base en lo anterior, los resultados mostraron que el factor que explica la capacidad de infiltración en los sitios de estudio es el grado de hidrofobicidad asociado a la humedad edáfica (como función de la temporalidad) y el contenido de materia orgánica (como función de la cobertura vegetal). Lo mencionado anteriormente apoya la **hipótesis 3** donde se planteó que durante la temporada seca existiera alta hidrofobicidad en el suelo relacionada con los contenidos de humedad y materia orgánica en cada uno de los sitios siendo mayor en el bosque natural y menor en el suelo desnudo. En este estudio no identificamos una influencia directa de la textura o la densidad aparente sobre la K_s , como comúnmente se reporta en la literatura (Reynolds y Elrick, 1992).

El bosque natural tuvo una K_s nula debido a que se registró una humedad baja ($0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) y asociada a esta una alta repelencia al agua, similar a lo encontrado en suelos de

Colombia y Nueva Zelanda con repelencias extremas durante la temporada seca (Jaramillo, 2006; Wallis et al., 1990). En campo se observó el encharcamiento y el flujo superficial del agua en este sitio. De Bano (2000) considera a la materia orgánica aportada por los pinos como generadora de hidrofobicidad en el suelo. La repelencia general identificada en temporada seca en el sitio de bosque natural probablemente se origine por el tipo de compuestos orgánicos aportados por los pinos y los altos espesores de hojarasca del suelo (Cerdà y Doerr, 2005; 2007; Doerr et al., 2000; De Bano, 2000). La homogeneidad detectada se explica por el traslape de las copas de los árboles. Inclusive, Doerr et al. (2000) y Lozano et al. (2013) sugieren que la repelencia es un mecanismo que las plantas utilizan para conservar el agua en el suelo de manera más eficiente, aumentando el agua disponible para su consumo.

De forma que en el bosque natural la K_s no está determinada ni por la densidad aparente aun siendo baja ($0.75 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$) ni por la textura (franco-limosa) que fue igual a la determinada para el pastizal-matorral. Inicialmente se esperaba que el bosque natural presentara los valores más altos de K_s como lo reportado en otros trabajos para bosques conservados (Tobón et al. 2004; Zimmerman, 2006). Sin embargo, cuando aumenta el contenido de humedad en el suelo la hidrofobicidad disminuye aunque en este caso la humedad registrada no alcanzó a revertir totalmente la hidrofobicidad y persiste mínimamente. Debido a esto, se ha observado que la repelencia en sitios de pinos puede modificar el comportamiento hidrológico de una cuenca (Guevara-Escobar et al., 2007; Keith et al., 2010a,b).

La capacidad de infiltración de los bosques naturales o bien conservados del área de estudio están siendo afectados por el factor de la temporalidad e hidrofobicidad, por lo cual ahora podríamos cuestionarnos ¿realmente bajo qué condiciones de humedad edáfica, precipitaciones y propiedades fisicoquímicas podemos tener un bosque templado con las características ideales de capacidad de infiltración que se manejan en la literatura? Y además si agregamos el factor de historia de uso de suelo, ¿Cómo sería el escenario final? El bosque natural que se muestreó tuvo un incendio hace 9 años (Gómez-Tagle R., coms. pers.). La literatura menciona que los incendios generan alta hidrofobicidad (Robichaud y Hungerfordb, 2000 ; De Bano, 2000) debido a que el más importante y significativo efecto del fuego en bosques, matorrales y pastizales es la transferencia del calor desde la biomasa encendida hacia el suelo (DeBano *et al.* 1998) y la cantidad y duración de esa transferencia de calor determina la severidad de la repelencia (Neary *et al.* 1999, 2005).

Sin embargo, los valores de K_s obtenidos en el bosque natural durante la temporada lluviosa rebasan inclusive lo obtenido para un bosque mesófilo maduro (18 mm/h) en Veracruz (Gómez-Tagle, 2011). En este estudio no se puede separar el posible efecto del incendio de condiciones sin incendio por lo que es importante determinar la K_s en un sitio de bosque natural donde no se hayan producido incendios y compararlo con los datos del presente estudio.

De la misma manera el factor que está determinando la alta K_s en el pastizal-matorral durante la temporada seca y lluviosa es la hidrofobicidad baja que presenta asociada a la vegetación de los géneros *Crataegus* y *Baccharis* además de los pastos anuales que se encuentran entre los parches de arbustos que de acuerdo con De Bano (2000) son géneros que no se encuentran dentro de la lista de especies generadoras de hidrofobicidad. Inclusive en los pastos que están entre los parches de arbustos al ser anuales y morir generan pequeños canales de raíces que en la siguiente temporada de lluvias pueden funcionar como pequeñas vías preferenciales pero numerosas.

Por su parte, el sitio de suelo desnudo de textura arcillosa y densidad aparente alta concuerda con lo encontrado en otros estudios (Simunek y van Genuchten, 1996; Reynolds y Elrick, 1991 (Cuadro 11) donde se reportan K_s muy bajas asociadas a la microporosidad. En este caso particular, durante la temporada seca cuando el sitio presentó humedad y contenido de materia orgánica bajos, sin aportes de hojarasca, mostró un comportamiento hidrofílico en temporada seca y lluviosa. Sin embargo, durante la temporada lluviosa este sitio fue quien presentó la K_s más alta con una humedad previa de $0.29 \pm 0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. De acuerdo con lo reportado en la literatura, no se esperaría que un suelo arcilloso tuviera altos valores de K_s , sin embargo, existen otros factores que podrían estar incidiendo. Por un lado el comportamiento hidrofílico y probablemente la generación de micro y mesoagregados que generan pseudolimos y pseudoarenas por procesos de floculación de las arcillas (Porta, 1999). Este tipo de agregados podrían incrementar la cantidad de mesoporos que a su vez aumentan los flujos de infiltración en el suelo. Durante el trabajo de campo en la época lluviosa, se observó que en el sitio de suelo desnudo no se generó escorrentía superficial en un evento de 6.8 mm con una intensidad de 11.3 mm/h. La intensidad de dicho evento es similar a la I_{10} media reportada para la zona (Ruíz-Díaz, en proceso). Sin embargo, es necesario realizar estudios micromorfológicos y de granulometría para sustentar esta hipótesis.

El sitio de suelo revegetado tuvo una K_s baja y la humedad más alta en las dos temporadas. Pero dadas las condiciones de la vegetación de pinos, también presentó una alta hidrofobicidad aunque no tan severa como en el bosque natural, debido probablemente a que la humedad edáfica favoreció. El contenido de materia orgánica (5.43 ± 1.58 %) aun siendo más bajo que en el pastizal-matorral (5.99 ± 1.33 %) demuestra que la hidrofobicidad depende no tanto de la cantidad sino del tipo de materia orgánica, en este caso la asociada a los pinos (Cuevas, 2006). Estos resultados concuerdan con lo encontrado para otros suelos arcillosos (Reynolds y Elrick, 1991) (Cuadro 11). En el caso de que solamente la textura del suelo estuviera controlando la K_s , se esperarían para este sitio resultados muy similares a los del suelo desnudo puesto que en ambos sitios el suelo superficial corresponde a un horizonte Bt. Sin embargo, aún con altos contenidos de humedad, la hidrofobicidad del suelo no desaparece totalmente en la temporada lluviosa y persiste como en el caso del bosque natural.

De esta manera, los contenidos críticos de humedad determinados en laboratorio para los sitios de estudio están a los $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de humedad en el suelo. La persistencia de la repelencia (WDPT) mostró que cuando aumenta la humedad volumétrica, disminuye el grado de hidrofobicidad en el suelo. Traducido a campo, las lluvias que incrementan la humedad edáfica ocasionan disminución de la hidrofobicidad. Por el contrario, en suelos de Holanda, Dekker & Ritsema (2000) encontraron contenidos críticos de humedad volumétrica variables desde $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y hasta de $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ entre 35 y 40 cm de profundidad en un Psammaquent. Por su parte, Aguilar-Orea (2013) encontró un amplio rango de contenidos críticos de humedad superficial asociados a distintos usos/coberturas vegetales y distribución del muestreo en toposecuencias de andosoles y cambisoles de Veracruz, México. En los pastizales, desde $0.53 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en la parte alta de la vertiente hasta $0.88 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en la parte media y en los sitios de bosque de pino desde $0.51 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en la parte media hasta $0.75 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en la parte baja de la vertiente. Esto sugiere que la capacidad de humectación del suelo en la disturbosecuencia de estudio (clima templado) es relativamente homogénea en comparación con ambientes de climas templados húmedos. Este trabajo pone de manifiesto que se requieren estudios de análisis químicos detallados para conocer con precisión los tipos de compuestos químicos que están originando la hidrofobicidad en estos suelos.

La complejidad de los procesos expuestos anteriormente responden a que la zona insaturada es muy dinámica, con grandes cambios a intervalos de tiempo y espacios cortos

siendo más notorios en la superficie del suelo. Debido a que la humectación es un proceso determinante en la formación y características de los suelos, si se adicionan los factores clima, vegetación, topografía y material parental, las propiedades hidrofísicas, serán determinadas (Hopmans y Schoups, 2005).

El Cuadro 11 presenta una relación de estudios que empleando infiltrometría de tensión exploran la conductividad hidráulica bajo distintos usos del suelo y cobertura vegetal.

En un estudio realizado por Tobón et al., (2004) (Cuadro 11) en distintas coberturas vegetales del norte de Costa Rica con suelo de origen volcánico, encontraron valores mayores de K_s en un bosque mesófilo (15.45 mm/hr) que en un pastizal (7.37 mm/h), lo cual es contrario a lo que se encontró en este estudio en temporada lluviosa donde el bosque (37.69 ± 28.96 mm/h) no fue quien tuvo mayor K_s sino el suelo desnudo (91.17 ± 35.11 mm/h). Por su parte, el pastizal-matorral en el presente estudio mostró una K_s de 86.29 ± 52.71 mm/h lo cual puede considerarse elevado con respecto a lo encontrado por Tobón y colaboradores. Simunek y van Genutchen (1996) (Cuadro 11) determinaron la K_s en un suelo arcilloso, uno limoso y otro arenoso y encontraron que el suelo arenoso tiene una K_s significativamente mayor (36.36 mm/h) que el suelo arcilloso (12.96 mm/h) lo cual también es contrario a los resultados de este estudio. Si se excluye el bosque natural que no infiltró en la temporada seca, se tiene que el suelo desnudo de textura arcillosa fue quien tuvo la K_s más baja. De esta manera concuerda con lo obtenido por Simunek y van Genutchen (1996).

Ziegler et al., (2004) (Cuadro 11) reportan para un suelo franco-arcillo-arenoso del norte de Vietnam K_s más alta en un pastizal (93.0 mm/h), seguido de un suelo con vegetación secundaria intermedia (67.0 mm/h), después el bosque tropical (62.0 mm/h) y la K_s menor la registró un suelo compactado (7.0 mm/h). Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el presente estudio durante la temporada lluviosa (ver Cuadro 1). De acuerdo con Ziegler y colaboradores (2004), la disminución de los valores de K_s pueden deberse a la compactación del suelo durante el mantenimiento y cosecha y/o al relleno de los poros superficiales por arenas finas durante la temporada lluviosa y el subsecuente sellado y encostramiento en la temporada seca después del tiempo de cosecha. A pesar de los beneficios hidrológicos que tienen los pastizales de tener una alta K_s , son considerados como negativos para este rubro. No obstante, los pastizales juegan un rol importante en la mitigación de los procesos hidrológicos

dentro de un paisaje fragmentado por ejemplo, inician una recuperación más rápida de la K_s superficial y actúan como moduladores de vertiente cuando se generan escurrimientos pendiente abajo.

En un andosol taptohídrico del estado de Veracruz, México, Gómez-Tagle y colaboradores (2011) (Cuadro 11) utilizaron la misma técnica que en este estudio y encontraron que la cobertura con valor de K_s promedio más alta fue un pastizal conservado (30.78 mm/h) seguido del bosque de *Pinus-Abies* (28.44 mm/h), después el bosque de niebla revegetado (27.7 mm/h), matorral de *Baccharis* (27.7 mm/h), bosque mesófilo maduro (18 mm/h), siendo el pastizal degradado el de menor K_s (6.78 mm/h). Los resultados de Gómez-Tagle et al (2011) muestran una tendencia similar a lo encontrado en el presente estudio. En ambos trabajos los pastizales tienen una K_s más alta que los mismos bosques mesófilos maduros o inclusive el bosque natural (presente estudio). Estos tipos de bosque son reconocidos por su capacidad de “generar” agua (Bruijnzeel, et al 2005. Encyclopedia of hydrological sciences).

En otro estudio realizado en andosoles taptohídricos y bajo una cubierta de bosque mesófilo maduro en Veracruz, Guerra y Reyes (2011) (Cuadro 10) reportan una K_s de 70.32 mm/h utilizando también un infiltrómetro de disco a tensión. El valor de Guerra y Reyes (2011) es aproximadamente el doble del encontrado en el bosque natural del presente trabajo (37.69 mm/h), pero se encuentra dentro del mismo orden de magnitud.

Reynolds y Elrick (1991) (Cuadro 11) utilizaron infiltrómetros de disco a tensión y encontraron un gradiente muy marcado donde la K_s fue muy alta en un suelo arenoso bien estructurado (339.84 mm/h) y muy baja en un suelo arcilloso (0.44 mm/h) siendo de 180.0 mm/h en un suelo con buena estructura. Dichos resultados son similares a los encontrados en el presente estudio durante la temporada seca, donde el suelo desnudo (6.51 mm/h) y revegetado (13.25 mm/h) con texturas arcillosas tienen una K_s baja. Por el contrario, el pastizal-matorral con textura franco-limosa tiene una K_s mayor que los otros ambientes (46.27 mm/h). Sin embargo y contrario a lo esperado la mayor K_s se encontró en el suelo desnudo con textura arcillosa durante la época de lluvias (91.17 mm/h).

En otro estudio realizado con infiltrómetros de disco a tensión en dos granjas de Canadá en suelos franco-limosos (Molisol), Si y Bodhinayaque (2005) (Cuadro 11) encontraron que una pradera tuvo una K_s de 18.32 mm/h mientras que una tierra con cultivo de *Triticum*

aestivum L. tiene 5.44 mm/h, atribuyen la diferencia a la densidad aparente, altos contenidos de materia orgánica y más canales de raíces en la pradera que en el suelo de cultivo a pesar de que la pradera haya tenido mayor porcentaje de arcillas. Este último argumento concuerda con lo encontrado en el suelo desnudo, aunque se encontraron altos contenidos de arcillas, la K_s resultó ser mayor que en los demás sitios durante la temporada lluviosa. Sin embargo, no se puede hacer una comparación efectiva por las diferencias entre grupos de suelo y usos/coberturas que aquí se han evaluado.

Ponce (2013) (Cuadro 11) empleó la misma técnica sobre un andosol compactado en el cual se destruyó su estructura para homogeneizar el efecto de la bioturbación por raíces de haba y lombrices en un experimento de laboratorio donde obtuvo que el tratamiento control tuvo la K_s más alta (30.6 mm/h) y el tratamiento con lombrices la más baja (20.31mm/h), siendo intermedio el de raíces de haba (21.84 mm/h) sin diferencias significativas. Aunque es un acercamiento experimental, las K_s reportadas están dentro del mismo orden de magnitud que las encontradas en los suelos volcánicos de estudio durante la temporada seca, inclusive el valor obtenido en el control es muy semejante a lo encontrado para el bosque natural (37.69 mm/h) sobre cambisoles en temporada lluviosa.

Como se mostró anteriormente, son diversos los estudios que incorporan la modificación de la K_s en distintos usos/coberturas de suelo, sin embargo, son pocos aquellos donde se evalúa la modificación de la K_s asociada a un efecto de la temporalidad. En este sentido, Hu et al., (2012) (Cuadro 11) encontraron que el contenido de humedad afecta significativamente a la K_s y densidad aparente en cuatro sitios de la región de la Meseta de Loess de China guardando una relación inversa, cuando la densidad aparente disminuye, la K_s aumenta, de manera similar a lo encontrado en el presente estudio, donde se determinó que a mayor humedad volumétrica en el suelo dada durante la temporada lluviosa, mayor es la K_s en todos los sitios de muestreo, sin embargo la relación con la densidad aparente fue al contrario.

Aoki y Sereno (2005) en un Haplustol típico de la región central de la provincia de Córdoba, Argentina encontraron una K_s promedio de 8.64 mm/h en un bosque nativo, 7.42 mm/h en un suelo con cultivo de *Glycine max* (L.) Merr de alta humedad y 9.37 mm/h en uno de baja humedad. Encontraron que a mayor contenido de humedad en el suelo, mayor K_s en el bosque nativo. Esto concuerda con lo encontrado en el bosque natural de estudio, que en

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

temporada seca ($0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) tuvo una K_s inclusive nula y durante la temporada lluviosa ($0.36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) se determinaron valores altos de K_s .

En un estudio reciente, Zhao et al., (2014) (Cuadro 11) encontraron que la K_s de un Inceptisol de la Meseta de Loess, China en la temporada lluviosa ($0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) fue ligeramente más alta que en la temporada seca ($0.12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). De manera similar, en el presente estudio se encontró que la K_s fue significativamente mayor en la temporada lluviosa ($0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) que en la temporada seca ($0.14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) en todos los sitios de muestreo, sin embargo, las condiciones distintas de uso/cobertura y humedad del suelo no permiten hacer inferencias precisas con el estudio de Zhao et al., (2014).

Cuadro 11. K_s media en distintos usos/coberturas de suelo reportadas en estudios donde se utilizó la técnica de infiltrómetros de disco a tensión.

Autor (es) y año	Uso/cobertura del suelo	K_s media superficial (mm/h)	Características del suelo	Técnica	Método de cálculo
Tobón et al. 2004	Bosque mesófilo de montaña	15.4	Suelo volcánico	Infiltrómetro de disco a tensión	
	Pastizal	7.3			
	Veredas de vacas	1.3			
Simunek y Genutchen, 1996		36.3	Arenas	Infiltrómetro de disco a tensión	Solución inversa de Richard's
		26.2	Limos		
		12.9	Arcillas		
Ziegler, et al., 2004	Pastizal	93.0	Franco arcillo arenoso	Infiltrómetro de disco a tensión	Solución de White (1988)
	Vegetación secundaria joven	32.0			
	Vegetación secundaria intermedia	67.0			
	Bosque tropical	63.0			
	Suelo compactado	7.0			
Gómez-Tagle et al. 2011	Matorral <i>Baccharis</i>	9.7	Andosoles taptohidricos Franco y Franco-arcillosos	Infiltrómetros de disco a tensión	Longsdon y Jaynes (1993)
	Matorral <i>Baccharis</i> zona alta	26.6			
	Plantación de café	9.7			
	Bosque de niebla revegetado	27.7			
	Achual de cafetal	16.9			
	Bosque mesófilo maduro	18.0			
	Pastizal conservado	30.7			
	Pastizal degradado	6.84			
	Bosque de <i>Pinus-Abies</i>	28.4			
	Bosque secundario	12.4			

Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán

Guerra y Reyes, 2010	Bosque mesófilo de montaña	70.3	Andosoles	Infiltrómetros de disco a tensión	Longsdon y Jaynes (1993)
Reynolds y Elrick, 1991	Arcilloso	0.4		Infiltrómetros de disco a tensión	Solución modificada de Wooding (1968)
	Suelo estructurado	180.0			
	Arenoso estructurado	339.8			
Si y Bodhinayaque, 2005	Pradera	18.3	Haplustolls (Molisol), Franco limoso	Infiltrómetros de disco a tensión	Regresión lineal tipo fuzzy
	Tierra de cultivo	5.4			
Zhao et al., 2014	T. Seca: Tierra de cultivo activa	19.5	Inceptisoles (Franco-limoso)	Infiltrómetro de tensión portátil de mini-disco	
	Tierra de cultivo abandonada (16 años)	11.2			
	Pastizal 30-35 años	13.2			
	T. Lluviosa: Tierra de cultivo activa	20.5			
	Tierra de cultivo abandonada (16 años)	11.3			
	Pastizal 30-35 años	13.7			
Ponce, 2013	Control	30.6	Andosol re-compactado (Franco-limoso)	Infiltrómetro de disco a tensión	Solución de Longsdon y Jaynes (1993)
	Suelo con plantas de haba	21.8			
	Suelo con lombrices	20.3			
	Plantas de haba-lombrices	24.4			

En la **hipótesis 1b** se planteó que los flujos preferenciales dependerían de la macroporosidad asociada a la bioturbación vegetal y animal y los flujos matriciales directamente de la matriz del suelo, de esta manera se esperaría mayor flujo preferencial en el bosque natural y mayor flujo matricial en el suelo desnudo que en los otros sitios. Esta hipótesis resultó parcialmente correcta durante la temporada seca donde el suelo desnudo tuvo el mayor flujo matricial y el suelo revegetado el mayor flujo preferencial. No se registró infiltración en el bosque natural. Sin embargo, durante las lluvias la hipótesis resultó correcta, el suelo desnudo tuvo mayor flujo matricial y el bosque, mayor flujo preferencial. Aun así, los porcentajes de flujo matricial en todos los sitios fueron mayores al 97% del total y los flujos preferenciales menores al 2.2% del total en las dos temporadas. Los flujos por microporos aumentaron significativamente durante la temporada lluviosa.

Esto puede deberse a que el suelo desnudo está desprovisto de vegetación y aflora un horizonte Bt en el cual la yuxtaposición de los poros depende directamente del espacio poroso entre las arcillas y limos principalmente, que en volumen representan un espacio mayor al generado por un suelo arenoso (Porta et al., 1999).

Ponce (2013) en un experimento de laboratorio sobre andosoles recompactados, obtuvo un 8.8 % de flujo preferencial para el tratamiento con raíces de haba y el menor fue para el tratamiento con lombriz (3.04%). En cuanto al flujo matricial, el mayor porcentaje se obtuvo en el tratamiento control (96.31%) y el menor en el tratamiento con raíces de plantas de haba (91.11 %). De manera similar al presente estudio los mayores porcentajes de flujo matricial están asociados a los mesoporos que son pequeños, largos y continuos y que permiten determinar altas conductividades por su acción capilar.

Caso contrario a lo expuesto aquí, Aoki y Sereno (2005) en un suelo Haplustol típico de la Región Central de la provincia de Córdoba, Argentina encontraron que los poros mayores a 0.75 mm (flujo preferencial) conducen el 90, 45 y 56% del flujo total de agua en los sitios de bosque natural, cultivo de soya con alta humedad y cultivo de soya con baja humedad, respectivamente. Los altos valores de flujo preferencial encontrados en el bosque están asociados a los canales hechos por raíces al igual que en los cultivos de soya, aunque éstos últimos son de menor magnitud. Los autores concluyen que la K_s asociada a cada tamaño de poro son sensibles y sirven como indicadores de calidad de suelo. Watson y Luxmoore (1986) reportan también que la mayor parte del flujo de infiltración (73%) ocurre a través de macroporos en un suelo de bosque de *Quercus sp.* y *Liriodendron tulipifera* ubica en Tennessee, E.U.

En el presente estudio, durante la temporada seca en el suelo desnudo se pierde un 0.5% de flujo preferencial, un 14.5% de flujo matricial a través de mesoporos pequeños y un 16.1 % de flujo a través de microporos. Por su parte el Suelo revegetado durante temporada seca aumenta 1.9 % el flujo preferencial, disminuye 12.7 % de flujo matricial a través de mesoporos pequeños y 18.8 % a través de microporos. En el pastizal-matorral, aumenta 1.2% el flujo preferencial, pero disminuye el flujo matricial por mesoporos pequeños un 23.3 % y por microporos un 26.9 %. En el bosque natural, debido a que no se pudo determinar la K_s en temporada seca, no se establecen comparaciones. Esto podría estar asociado a las intensidades de las precipitaciones donde muchas de ellas no alcanzan a humectar suficientemente al suelo para que funcione la matriz porosa, proceso mejor observado en el pastizal-matorral al tener mayores aumentos de flujo por microporos durante la temporada lluviosa (ver Cuadro 4).

De manera similar a lo encontrado, Wilson y Luxmoore (1988), reportaron que los mesoporos contribuyen más a la rápida infiltración cuando la precipitación es insuficiente para

iniciar el flujo preferencial a través de los macroporos, mientras que es suficiente para llenar los mesoporos, los cuales bajo estas condiciones pueden infiltrar una mayor cantidad de agua al suelo.

5.1.1 Relación de la K_s con la intensidad de las precipitaciones

Para la zona de estudio, fueron pocos los eventos de precipitación que sobrepasaron la K_s , lo cual sugiere que durante la temporada seca, las precipitaciones que alcanzan el suelo no lo humectan de tal manera que la K_s aumente significativamente, inclusive en el bosque natural todas las lluvias que alcanzaran el suelo generarían escorrentía dado que el suelo es completamente hidrofóbico. Por el contrario, durante la temporada lluviosa en que el suelo tiene mayor contenido de humedad, la K_s en el suelo desnudo y pastizal-matorral rebasan la intensidad de las precipitaciones, es decir, toda el agua de lluvia que alcanza el suelo en estos sitios es infiltrada (Figura 9). Ziegler et al., (2007) en el norte de Vietnam donde registraron en 3 meses, 11 eventos de precipitación con intensidades máximas al primer minuto, encontraron que los valores de K_s en pastizales y campos de tierras altas fueron mayores a las intensidades de lluvias y sitios como bosque, vegetación secundaria y campos abandonados que tienen K_s menores a las intensidades, por lo cual generaron escorrentía.

Lo anterior puede ser explicado en el sentido de que el bosque natural y suelo revegetado requieren de altos contenidos de humedad edáfica (0.48 y $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivamente) (ver Figuras 9 y 20) para revertir totalmente la hidrofobicidad y permitir los flujos de infiltración libremente. Por tal motivo, se sigue observando la persistencia de hidrofobicidad en la temporada lluviosa siendo más marcada junto al tronco de los árboles que fuera de sus copas como se menciona en el siguiente apartado.

5.2 EFECTO DE LA COPA DE LOS ARBOLES SOBRE LA K_s DEL SUELO EN UNA DISTURBOSECUENCIA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO EN TEMPORADA SECA Y LLUVIOSA

En la **hipótesis 2** se planteó que debido a la adición de materia orgánica que generan las copas de los árboles y la bioturbación por raíces cercanas a los tallos modificando las propiedades físicas del suelo, se esperaría una mayor capacidad de infiltración cerca de los tallos de los árboles/arbustos que fuera de sus copas en temporada lluviosa siendo más visible en el pastizal-matorral. Por tal motivo en este trabajo se emplea el término “islas de infiltración” para referirnos a un aumento diferencial de la K_s desde el tronco de los árboles hacia fuera de sus copas.

Si bien las islas de infiltración pudieron ser corroboradas en el pastizal-matorral durante la temporada lluviosa, se encontró evidencia de su existencia en el suelo revegetado durante la temporada seca y lluviosa. Sin embargo en este segundo sitio no fueron significativas. De manera similar a lo encontrado, Zapata y Manzano (2008) reportan un decremento en la capacidad de infiltración conforme aumenta la distancia al árbol en bosques de *Pinus halepensis*.

En el bosque natural no se detectaron islas de infiltración, se observó algo totalmente contrario, los valores bajos de K_s se asociaron a altas repelencias cerca del tronco de los árboles. Estableciendo un gradiente de mayor a menor hidrofobicidad a partir del tronco, por lo cual se hace referencia a “islas de hidrofobicidad” aun durante temporada lluviosa.

Las islas de infiltración que presenta el pastizal-matorral son similares a las que se reportan también en ambientes semiáridos de arbustos xerófitos (Lyford y Qashu, 1969) y también se ha comprobado que árboles y arbustos de zonas áridas modifican la distribución de humedad en el perfil después de una precipitación, tendiendo a acumular agua en las proximidades de sus sistemas radiculares. Tradicionalmente se ha explicado este efecto como consecuencia de la redistribución de la precipitación hacia el centro de la planta forzada por la arquitectura de las ramas. Sin embargo este fenómeno no parece estar suficientemente documentado (Glover *et al.*, 1962; Xiao-Yan Li *et al.*, 2009). En el mismo sentido, Johnson y Gordon (1988) indican que la velocidad de infiltración bajo arbustos es superior a la registrada sobre cubierta herbácea o suelo desnudo debido al flujo preferencial inducido por raíces. De acuerdo con lo mencionado por Gile *et al.*, (1998), los arbustos del pastizal-matorral modifican

las propiedades del suelo, principalmente los contenidos de materia orgánica que favorecen la estructura del suelo y la estabilidad de agregados de tal forma que se favorecen los flujos de infiltración.

De acuerdo con Thompson et al., (2009) que evaluaron la capacidad de infiltración en un gradiente climático con diferentes ambientes, encontraron que la capacidad de infiltración incrementa como función de la biomasa vegetal en ambientes limitados por agua (ambientes semiáridos) pero esta correlación no fue significativa en ambientes de climas húmedos. A través del gradiente climático xérico a húmedo, el poder de la relación entre biomasa vegetal y capacidad de infiltración disminuyó. Lo cual coincide con lo encontrado en el pastizal-matorral que desde la perspectiva de Thompson y colaboradores, podría estarse comportando como un ambiente semiárido.

Finalmente, la pregunta 1a. ¿Cómo se modifica la capacidad de infiltración superficial del suelo a través de una disturbosecuencia bosque natural de pino-encino, suelo revegetado, pastizal-matorral y un suelo desnudo en una escala temporal? Se pudo responder adecuadamente. Durante la temporada seca el gradiente de capacidad de infiltración de mayor a menor fue: PM>SR>SD>BN y durante la temporada lluviosa: SD>PM>BN>SR. La capacidad de infiltración del suelo estuvo en función del grado de hidrofobicidad y humedad de cada sitio. En temporada lluviosa, la alta hidrofobicidad registrada en la temporada seca se revierte y aumenta significativamente la capacidad de infiltración del suelo, aunque esta reversión no es total en los sitios con pinos.

También la pregunta 1b. ¿Cómo se modifica la partición de la infiltración (matricial vs preferencial) superficial a través de una disturbosecuencia bosque natural de pino-encino, suelo revegetado, pastizal-matorral y un suelo desnudo en una escala temporal? Se pudo responder satisfactoriamente. En temporada seca el gradiente de mayor a menor flujo matricial fue: SD>PM>SR y en flujo preferencial: SR>PM>SD. En temporada lluviosa el gradiente de mayor a menor en flujo matricial fue: SD>PM>SR>BN y en flujo preferencial: BN>SR>PM>SD.

Para la pregunta 2. ¿Existe un efecto local de los individuos vegetales (árboles y arbustos) análogo a las islas de fertilidad pero en términos de capacidad de infiltración en una escala temporal? Se encontró que si existen islas de infiltración en el suelo revegetado en temporada seca y lluviosa (aunque no fueron significativas). Sin embargo, en el pastizal-

matorral la islas de infiltración fueron muy marcadas pero solamente en temporada lluviosa. Los demás sitios no mostraron islas de infiltración, al contrario, el bosque natural mostró “islas de hidrofobicidad”.

La pregunta 3. ¿Qué efecto tienen la materia orgánica y la humedad sobre la hidrofobicidad del suelo en cada uno de los sitios de estudio en una escala temporal? Los altos grados de hidrofobicidad en temporada seca (BN>SR>PM>SD) disminuyeron drásticamente en temporada lluviosa (SR>BN>PM>SD). La hidrofobicidad estuvo en función de la cobertura vegetal (contenido y tipo de materia orgánica) y la temporalidad (contenido de humedad edáfica). Los sitios con bosques de pinos mostraron altas repelencias y requieren de altos contenidos de humedad para revertir su hidrofobicidad completamente. El suelo desnudo fue hidrofílico en temporada seca y lluviosa.

El conocimiento global, actual y de hace varias décadas nos ha venido enseñando que los bosques son sitios de prioridad para la infiltración del agua hacia los acuíferos, sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, la presente tesis refuta al menos para la zona de estudio, el paradigma actual en el área de conocimiento. La capacidad de infiltración del suelo no es una función directa de la cobertura vegetal.

Por lo anterior, este trabajo propone nuevos paradigmas en el área de conocimiento y establece nuevas líneas de investigación con enfoque hidropedológico que actualmente están ayudando a entender de manera más precisa el comportamiento de los flujos de agua en el suelo, especialmente en ambientes no dedicados a la agricultura. Con esta perspectiva, sería de gran interés llevar a cabo estudios similares en zonas específicas de la República Mexicana que se tienen contempladas como buenas “generadoras” de agua para las poblaciones humanas. Y en este sentido, se podría refutar totalmente el paradigma actual o de lo contrario, apoyarlo. Esto encaminado a una propuesta donde los resultados obtenidos, ayuden a valorar amplia y precisamente los servicios ambientales hidrológicos en un sentido de seguridad hídrica para las poblaciones humanas en el país a futuro.

5.3 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo planteado en la hipótesis 1a:

- En temporada seca el gradiente de capacidad de infiltración superficial propuesto de acuerdo a +cobertura = + capacidad de infiltración fue contrario a lo esperado: PM>SR>SD>BN. En temporada lluviosa el gradiente de infiltración fue SD>PM>BN>SR.
- La capacidad de infiltración de los suelos de la disturbosecuencia es significativamente mayor en temporada lluviosa que en temporada seca.
- Existe un efecto significativo del sitio y la temporalidad sobre la capacidad de infiltración de los suelos en la disturbosecuencia.
- En temporada seca, los eventos de precipitación que sobrepasan la capacidad de infiltración tienen el gradiente: BN>SD>SR>PM pudiendo generar escorrentía en ese orden. En temporada lluviosa, ningún evento sobrepasó la capacidad de infiltración en SD y PM, en cambio, pocos lo hicieron sobre el SR y BN generando escorrentía.

De acuerdo a lo planteado en la hipótesis 1b:

- Más del 97% del flujo total de infiltración en el suelo está asociado a flujo matricial siendo mayor en los mesoporos pequeños durante las dos temporadas. El flujo preferencial fue mayor en el bosque natural (macroporos).
- En la temporada seca, la K_s tiene una relación mayor con la textura y la densidad aparente. La K_s en lluvias no tiene correlación con ninguna propiedad del suelo medida.

De acuerdo a lo planteado en la hipótesis 2:

- En temporada seca, no hay evidencia significativa de la presencia de islas de infiltración. Fuera de la copa de los árboles existe mayor capacidad de infiltración en el pastizal-matorral y suelo revegetado.
- En temporada lluviosa, las islas de infiltración son significativas en el pastizal-matorral y con ligera presencia en el suelo revegetado, en el bosque natural no se presentaron.
- El bosque natural presenta “islas de hidrofobicidad” asociadas a la materia orgánica de los pinos.

De acuerdo a lo planteado en la hipótesis 3:

- En campo, la alta repelencia del suelo en temporada seca ($0.14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de humedad) se revierte aunque no en su totalidad durante la temporada lluviosa en todos los sitios con vegetación ($0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de humedad). El suelo desnudo siempre se mostró hidrofílico.
- Los sitios con bosques de pinos (BN, SR) fueron extremadamente repelentes en temporada seca.
- En laboratorio, se demostró que los valores críticos de humedad en todos los ambientes ocurre a una humedad de $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y se requieren $0.48 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de humedad en el suelo para que se revierta totalmente la hidrofobicidad.

RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

- Recomendaciones

Algunas de las recomendaciones que se sugieren para corroborar ciertas hipótesis y tener una conceptualización más amplia de los procesos y factores que imperan sobre la capacidad de infiltración en la disturbosecuencia de estudio son:

- 1.- Determinar la permeabilidad superficial en cada uno de los sitios. Permitirá cuantificar el flujo saturado que no registraron los infiltrómetros de tensión en este estudio, ya que solo se cuantificaron los flujos cercanos a la saturación.
- 2.- Obtener perfiles de K_s en cada ambiente. Ayudará a determinar cómo repercuten las propiedades de los horizontes sobre la K_s del suelo y su impacto en la percolación hasta la roca madre.
- 3.- Determinar y cuantificar los compuestos orgánicos que están originando hidrofobicidad en los suelos. Se podrá discernir el compuesto químico responsable del origen de la hidrofobicidad en cada uno de los sitios e inclusive identificar la especie de planta que origina ese compuesto.
- 4.- Realizar mediciones de infiltración en un bosque no incendiado. Permitirá establecer comparaciones con respecto a los demás ambientes tomándolo como un sitio control.

- Perspectivas

- a) Desarrollar trabajos simultáneos en otros ambientes forestales con suelos de origen volcánico en el país y realizar cartografía sobre su capacidad de infiltración.
- b) Incursionar en las políticas nacionales que regulan la valoración de los servicios ambientales hidrológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Orea, G. F. 2013. Variación de la repelencia al agua de los suelos en función de la profundidad, del contenido de humedad, de la posición topográfica y de la cobertura vegetal, en la cuenca del río Los Gavilanes, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. México. 75pp.
- Amoozegar, A. 1992. Compact Constant Head Permeameter: A convenient Device for measuring hydraulic conductivity. In G.C. Topp, W.D. Reynolds, and R.E Green, editors. *Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Inc.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:893-896.
- Aoki A. M. y R. Sereno. 2005. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. *Agricultura Técnica*, Vol. 65, No. 3, pp. 295-305.
- Bigioggero, B., Corona-Chávez, P., Garduño Monroy, V.H., Carrara, E., Lanza, L. 2004. La "Piedra de Cantera" de Morelia desarrollo entre la tradición y la cultura: un acercamiento geológico y una alternativa. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México, pp. 14-42.
- Blum, W. 2004. UNAM, UMSNH, CSIC, Diplomado internacional de Edafología Nicolás Aguilera: Las funciones del suelo en la Naturaleza. Morelia.
- Bodhinayake, W., and B. C. Si. 2004. Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. *Hydrological Processes* 18:2835-2850.
- Bond, B.J., Meinzer, F.C., Brooks, J.R., 2007. How Trees Influence the Hydrological Cycle in Forest Ecosystems 7-35.
- Brantley, S.L., White, A.F., White, T.S., Sparks, D., Richter D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., Anderson S. 2006. *Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by National Science Foundation (NSF)*, October 24-24, 2005, Newark, DE, 30p.
- Bruijnzeel, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104, 185-228.
- Buckzo, U., O.Bens y R.F. Hüttl. 2006. Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine-beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology* 331, 383-395.
- Buttle, J. M., and D. A. House. 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *J. Hydrol.* 203: 127-142.
- Campos-Aranda, D. 1987. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Carlón-Allende, T. y M. E. Mendoza. 2007. Cartografía geopedológica aplicada al cálculo de la infiltración. *Ciencia Nicolaita*. 47: 103-118.
- Cerdà A, Doerr SH (2005) Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*.14: 423-437.
- Cheng, J., Zhang, H., Zhang, Y., Shi, Y., He, F., Qi, S., Sun, Y., 2007. Affecting factors of preferential flow in the forest of the Three Gorges area, Yangtze River. *Front. Forest. China* 2, 436-442.

- Clothier, B.E., and I. White. 1981. Measurement of sorptivity and soil diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 117:311-314.
- Colloff, M.J., Pullen, K.R., Cunningham, S.A., 2010. Restoration of an Ecosystem Function to Revegetation Communities: The Role of Invertebrate Macropores in Enhancing Soil Water Infiltration. *Restoration Ecology* 18, 65-72.
- Constanz, J., y F. Murphy. 1988. An automated technique for flow measurement from Mariotte reservoirs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 252:254.
- De Bano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state - of - the -art. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW - 46. California. 21p.
- De Bano, L.F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* 231-232: 4-32.
- DeBano L y Krammes. 1966. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull.* 2:14-19.
- Dekker L. 1998. Moisture variability resulting from water resulting in Dutch soils. Tesis doctoral. Wagenengen Agricultural University, The Netherlands. En: Jaramillo D. 2002. Repelencia al agua en suelos. Facultad de ciencias. Universidad nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 36-37. 45-46.
- Dekker, L. W. & C. J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30 (9): 2507-2517.
- Dekker, L. W. & C. J. Ritsema. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *J. Hydrol.* 231-232: 148-164.
- Delgado, T.S., 2009. Evaluación de sustentabilidad de los sistemas de producción rural entre comunidades de la microcuenca Umécuaro-Loma Caliente, Michoacán (Maestría).
- Descroix, L., D. Viramontes, J. Estrada, J.-L. Gonzalez Barrios y J. Asseline. 2007. Investigating the spatial and temporal boundaries of Hortonian and Hewlettian runoff in Northern Mexico. *Journal of Hydrology.* 346: 144-158.
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, J. L. González Barrios y M. Esteves. 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *CATENA.* 43: 115-135.
- Detenal. 1979 A. Carta Edafológica E14A23, Morelia.
- Detenal. 1979 B. Carta Edafológica E14A33, Villa Madero.
- Doerr, S. H. & A. D. Thomas. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *J. Hydrol.* 231-232: 134-147.
- DOF, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Dunne, T., W. Zhang, and B. F. Aubry. 1991. Effects of rainfall, vegetation, and Microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Res.* 27: 2271-2285.
- Echeverria, C., Huber, A., Taberlet, F., 2007. Comparative study of water balance components in a native forest and meadow in southern Chile. *Bosque* 28, 271-280.
- Eguchi, S. y S. Hasegawa. 2008. Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of andisol. *Soil Sci Soc Am J.* 72: 320-330.
- Elick, 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., B. E. Newton, T. Dunne y J. M. Moraes. 1999. Soil hydraulic conductivities of latosols under pasture forest and teak in Rondonia Brazil. *Hydrological processes*. 13: 1417-1422.
- FAO. 2006. Annual report, World Reference Base for Soil Resource 2006. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5. Instituto de Geografía UNAM. México, D.F.
- Gardner, W. R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. *Soil Science* 85:228-232.
- Gómez-Tagle Chávez A., Geissert K.D., Enriquez E. 2011. Infiltrómetro de tensión INDI-INECOL. No publicado.
- Gómez-Tagle, A., Geissert, D., Pérez-Maqueo, O.M., Marín-Castro, B.E., Rendón-López, M.B., 2011. Saturated Hydraulic Conductivity and Land Use Change, New Insights to the Payments for Ecosystem Services Programs: a Case Study from a Tropical Montane Cloud Forest Watershed in Eastern Central Mexico, in: Dikinya, O. (Ed.), *Developments in Hydraulic Conductivity Research*. InTech, pp. 225-248.
- Gómez-Tagle, A. 2009. Linking hydrogeology and ecosystem services: differential controls of surface field saturated hydraulic conductivity in a volcanic setting in central México. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, (6) 2499-2536.
- Gómez-Tagle, A. C. 2008a. Variabilidad de las Propiedades Edáficas Relacionadas con la Infiltración y Conductividad Hidráulica Superficial en la Cuenca de Cuitzeo., INIRENA, Tesis Doctoral de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México, 164 pp.
- Gómez-Tagle et al., 2008b. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. 26(4):287-297
- Grimm, U., Fassbender, H., 1980. Ciclos biogeoquímicos e un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba* 31, 89-99.
- Guan, H., Simunek, J., Newman, B.D., Wilson, J.L., 2010. Modelling investigation of water partitioning at a semiarid ponderosa pine hillslope. *Hydrol. Process*. 24, 1095-1105.
- Guevara-Santamaría, A. 2009. Conductividad hidráulica de campo en suelos volcánicos bajo dos coberturas en la cuenca hidrográfica Umécuaro-Loma Caliente. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 76pp.
- Guevara-Escobar, A., Gonzalez Sosa, E., Ramos-Salinas, M, Hernández-Delgado, G.D. 2007. Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers. *Hydrology and Earth Systems Science Discussions*, 4: 1767–1794.
- Guerra, G. y G.I. Reyes. 2010. Automatización de infiltrómetros y permeámetros de campo: bases conceptuales e instrumentación. Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas. Tesis de Licenciatura de la Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. 103 pp.
- Hewelett, J., Nutter, W., 1969. An outline of forest hydrology. University of Georgia Press, Georgia, USA.
- Hu, W., Shao, M. A. and Si, B. C. (2012), Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes. *European Journal of Soil Science*, 63: 820–830.
- INEGI, 1979. Carta Edafológica E14A23, Morelia, 1st ed. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.

- Janeau, J. L., A. Mauchamp y G. Tarin. 1999. The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influences on the system hydrodynamics: An experimental approach. *CATENA*. 37: 165-173.
- Jaramillo J., D.F. 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115) 215-232.
- Jarvis, N.J., P.B. Leeds-Harrison, and J.M. Dosser. 1987. The use of tension infiltrometers to assess routes and rates of infiltration in a clay soil. *J. Soil Sci.* 38:633-640.
- Johnson, C. W. and N. E. Gordon. 1988. Runoff and erosion from simulator plots on sagebrush rangeland. *Transactions of the ASAE* 31(2):421-427.
- Keith, D.M., Johnson, E.A., Valeo, C., 2010a. A hillslope forest floor (duff) water budget and the transition to local control. *Hydrological Processes* 24, 2738–2751.
- Keith, D.M., Johnson, E.A., Valeo, C., 2010b. Moisture cycles of the forest floor organic layer (F and H layers) during drying. *Water Resources Research* 46.
- Kwicklis, E., Witkowski, M., Birdsell, K., Newman, B., Walther, D., 2005. Development of an Infiltration Map for the Los Alamos Area, New Mexico. *Vadose Zone J.* 4, 672–693.
- Langner, H.W., Gaber, H.M., Wraith, J.M., Huwe, B., Inskeep, W.P., 1999. Preferential Flow through Intact Soil Cores: Effects of Matric Head. *Soil Sci Soc Am J* 63, 1591–1598.
- Lee, R., 1980. *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York, USA.
- Li, Y. Y. y M. A. Shao. 2006. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*. 64: 77-96.
- Li, X.Y., Yang, Z.P., Zhang, X.Y., Lin, H.S., 2009. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential water flow in soils. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 1133–1144.
- Lin, H. S., Brook, E., McDaniel, R., and Boll. J. 2008b. *Hydrogeology and Surface/Subsurface Runoff Processes*, in: *Encyclopedia of Hydrologic Sciences*, edited by: Anderson, M. G., JohnWiley & Sons, Ltd., doi:10.1002/0470848944.hsa306.
- Lin, H.: *Hydrogeology. Bridging disciplines, scales, and data*, *Vadose Zone J.*, 2, 1–11, 2003.
- Lin, H.S., Kogelmann, W., Walker, C., Bruns, M.A., 2006a. Soil moisture patterns in a forested catchment: a hydrogeological perspective. *Geoderma* 131, 345–368.
- Lin, H., 2010a: Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 25–45.
- Lin, H.S., 2010b. Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 25–45.
- Lin, H.S., and K.J. McInnes. 1995. Water flow in clay soil beneath a tension infiltrometer. *Soil Sci.* 159:375-382.
- Logsdon, S.D., Jaynes, D.B., 1993. Methodology for Determining Hydraulic Conductivity with Tension Infiltrometers. *Soil Sci Soc Am J* 57, 1426–1431.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., Velazquez, A., Rogelio Aguirre-Rivera, J., 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems* 90, 62–78.
- Lozano, E., P. Jiménez-Pinilla, J. Mataix-Solera, V. Arcenegui, G.M. Bárcenas, J.A. González-Pérez, F. García-Orenes, M.P. Torres, J. Mataix-Beneyto. 2013. Biological and chemical factors controlling the patchy distribution of soil water repellency among plant species in a Mediterranean semiarid forest. *Geoderma*, Vol: 207–208, 212-220.
- Luo, L., Lin, H., Halleck, P., 2008. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computer tomography. *Soil Sci Soc Am J* 72, 1058–1069.

- Mallants, D., B. P. Mohanty, A. Vervoort, and J. Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.* 10: 115-131.
- Martínez-Zavala, L., Jordán, A., 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in western Andalusia, Spain. *Soil Use and Management* 24, 108–117.
- Matula, S. 2003. The influence of tillage treatments on water infiltration into soil profile. *Plant Soil and Environment.* 49: 298-306.
- Mendoza, M.E., Bocco, G., López, E., Bravo, M., 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 49, 98–117.
- Nanía, L. S. 2002. La cuenca y los procesos hidrológicos. Universidad de Granada.
- Návar, J., 2011. Stemflow variation in Mexico's northeastern forest communities: Its contribution to soil moisture content and aquifer recharge. *Journal of Hydrology* In Press.
- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Ffolliott, P.F., 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 122, 51–71.
- Negrete-Yankelevich, S., Fragoso, C., Newton, A.C., Rusell, G., 2008a. Species-specific characteristics of trees can determine the litter macroinvertebrate community and decomposition process below their canopies. *Plant Soil* 307, 83–97.
- Negrete-Yankelevich, S., Fragoso, C., Adrian C Newton, O William Heal, 2007. Successional changes in soil, litter and macroinvertebrate parameters following selective logging in a Mexican Cloud Forest. *Applied Soil Ecology* 35, 340–355.
- Nuutinen, V., Pitkanen, J., Kuusela, E., Widbom, T., Lohilahti, H., 1998. Spatial variation of an earthworm community related to soil properties and yield in a grass-clover field. *Applied Soil Ecology* 8, 85–94.
- Oyarzún, C. E., C. Frêne., G. Lacrampe., A. Huber y P. Hervé. 2011. Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *BOSQUE* 32(1): 10-19.
- Pachepsky, Y., Rawls, W.J., 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science* 54, 443–451.
- Perkins, D. B., N. W. Haws, J. W. Jawitz, B. S. Das y P. S. C. Rao. 2007. Soil hydraulic properties as ecological indicators in forested watersheds impacted by mechanized military training. *Ecological Indicators.* 7: 589-597.
- Perroni-Ventura Y. 2007. Islas de fertilidad en un ecosistema semiárido: nutrientes en el suelo y su relación con la diversidad vegetal. Tesis de doctorado. Instituto de Ecología, A.C. México. Pp. 100.
- Perroux, K.M., and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Am. J.* 52:1205-1215.
- Pitkanen, J., Nuutinen, V., 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* 9, 411–415.
- Ponce-Díaz, R. L. 2013. efecto de la bioturbación por lombrices (sp.) y por raíces de plantas en la infiltración de suelos: una aproximación experimental. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 90 pp.
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M., Roquero, C., 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, 2nd ed. Mundi-Prensa, Bilbao, España.

- Poulenard, J., P. Podwojewski, J. L. Janeau y J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation in Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *CATENA* 45:
- Regalado, C.M. y A. Ritter. 2005. Characterizing water dependent soil repellency with minimal parameter requirement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1955-1966.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., 1992. Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* 55, 633–639.
- Robichaud, P.R. y R.D. Hungerford. 2000. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology.* 231–232: 207–219.
- Roy, J. L. & W. B. McGill. 1998. Characterization of disaggregated nonwetable surface soils found at old crude oil spill sites. *Can. J. Soil Sci.* 78: 331-334.
- Roy J. y W. B. McGill. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity ethanol droplet (MED) test. *Soil Science* .167:8397.
- SAGARPA. 2004. “Plan rector de producción y conservación de la microcuenca Umécuaro, Mpio. de Morelia, Michoacán”. Fideicomiso de Riesgo Compartido. Morelia, Mich. Diciembre 2004.
- Sedov, S.N., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J.E., 2003. Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *CATENA; Achievements in Micromorphology* 54, 495–513.
- Servenay, A. y C. Prat. 2003. Erosion extension of indurated volcanic soils of México by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma; volcanics soils: properties and processes as a function of soils genesis and land use* 117: 367-375.
- Simunek, J. and M. T. van Genuchten. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, vol. 32, no. 9, 2683-2696.
- Singleton, P. L., M. Boyes y B. Addison. 2000. Effect of treading by dairy cattle on topsoil physical conditions for six contrasting soil types in Waikato and Northland, New Zealand, with implications for monitoring. *New Zealand Journal of Agricultural.*
- Smettem, K.R.J., and B.E. Clothier. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. *J. Soil Sci.* 40:563-568.
- Sobieraj, J. A. 2003. Spatial patterns of saturated hydraulic conductivity and its controlling factors for forested soilscapes. 237.
- Soil-Survey-Staff, 1993. *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- Starr, J. 1990. Spatial and Temporal Variation of Pondered Infiltration *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:629–636.
- Taboada Castro, M.M., M. Lado Liñares, A. Diéguez Villar, y A. Paz González. 1998. Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. p. 101-127. *In* A. Paz González y M.T. Taboada Castro (eds.) *Jornadas Internacionales Sobre Erosión Hídrica*, La Coruña, España. 11-13 de junio de 1998.
- Thompson, S.E., C. J. Harman, P. Heine, and G. G. Katul. 2009. Vegetation-infiltration relationships across climatic and soil type gradients. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, G02023.
- Tobón, C. L., Bruijnzell, A., Frumau, A., y Calvo, J.C. 2004. Changes in soil physical properties alter conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. *En* *Second International Symposium Mountains in the Mist*. Waimea, Hawaii, July 27-August 2, 2004.

- Trimble, S. W. y A. C. Mendel. 1995. The cow as a geomorphic agent: a critical review. *Geomorphology*. 13: 233-253.
- Walker, G.R y L. Zhang. 2002. *Studies in Catchment Hydrology. The basics of Recharge and Discharge*. CSIRO Publishing.
- Wallach, R., Jortzick, C., 2008. Unstable finger-like flow in water-repellent soils during wetting and redistribution – the case of a point water source. *Journal of Hydrology* 351, 26–41.
- Watson, K. W., and R. J. Luxmoore. 1986. Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* 50:578-582.
- Wilson G. V, R. J. Luxmoore. 1988. Infiltración, distribución de macroporosidad y mesoporosidad en dos cuencas forestales. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:329-335.
- 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, The Netherlands, 229 pp.
- Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:788-792.
- Zapata S, A y F. Manzano. 2008. Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo. *Agrociencia* 42: 835-845.
- Zepeda, H. 2008. La vegetación en cárcavas y su efecto sobre la erosión: una base para la restauración autosostenible de áreas de alta erosión en la cuenca de Cuitzeo. 80 pp.
- Zhao X., P. Wu., X. Gao., L. Tian y H. Li. 2014. Changes of soil hydraulic properties under early-stage natural vegetation recovering on the Loess Plateau of China. *Catena* 113: 386–391.
- Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W., Tran, L.T., Vana, T.T., Nullet, M.A., Fox, J., Tran Duc Vien, Pinthong, J., Maxwell, J.F., Evett, S., 2004b. Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous Northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *J. Hydrol.* 287, 124–146.
- Ziegler, A. D., J. N. Negishi, R. C. Sidle, S. Noguchi y A. R. Nik. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *CATENA*. 67: 89-104.
- Zimmermann, B., and Elsenbeer, H. 2008. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance, *Journal of Hydrology*, 361, 78-95.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H., Moraes, J.M.D., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222, 29–38.
- Zinke, P. J. 1962. The Pattern of Influence of Individual Forest Trees on Soil Properties. *Ecology*, Vol. 43, No. 1, pp. 130-133.

ANEXO

Anexo A. Características y propiedades edáficas en la zona de estudio (Tomado de Gómez-Tagle, 2008).

Características físicas: Densidad real (DR), densidad aparente (DA), % agregados estables en agua 2.0 a 4.0 mm (%AEA 2-4), % agregados estables en agua 0.25 a 2.0 mm (%AEA 0.25-2).

Perfil	Prof. (cm)	DR (g·cm ⁻³)	DA (g·cm ⁻³)	% Arena	% Arcilla	% Limo	%AEA 2-4 mm	%AEA 0.25-2mm	Textura	Color Seco	Color Húmedo
Bosque	0-5	1.7	1.0	60.4	21.6	18.0	90.4	90.2	Franco-Arcillo-Arenoso	10 R 3/2	10 R 5/2
	12-32	2.1	0.9	30.2	48.4	21.4	82.2	91.7	Arcilloso	10 R 4/4	10 R 3/2
	32-38	2.0	0.9	26.4	52.9	20.7	44.8	92.0	Arcilloso	10 R 4/4	10 R 3/4
	5-12	2.5	0.9	46.4	29.6	24.0	91.3	90.4	Franco-Arcillo-Arenoso	10 R 4/4	10 R 4/3
	38-52	2.3	0.9	13.6	80.4	6.0	23.4	91.4	Franco-Limoso	10 R 5/4	10 R 3/4
	52-76	2.8	1.0	4.4	83.6	12.0	28.3	92.9	Arcillo-Limoso	7,5 YR 5/2	7,5 YR 4/4
	76-	1.9	1.1	5.6	74.4	20.0	11.5	88.9	Franco-Limoso	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6
Suelo desnudo	0- 21	2.0	1.0	28.4	49.6	22.0	77.3	92.0	Arcilloso	10 R 4/2	
	21-43	2.6	0.9	10.4	74.9	14.7	8.2	90.6	Arcillo-Limoso	10 R 5/6	
	43-72	2.5	1.1	6.4	77.6	16.0	1.1	90.8	Arcillo-Limoso	10 R 5/6	
	72-	2.7	1.2	5.1	74.9	20.0	0.5	88.9	Arcillo-Limoso	10 R 5/6	

Características químicas: Conductividad eléctrica (CE), Fósforo (PO_4^{2-}), Potasio (K^+), Nitrógeno (NH_4^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Cloruros (Cl^-), Hierro (Fe^{2+}), Azufre (SO_4^{2-}), % materia orgánica (%MO), % carbonatos (CaCO_3^-)

Perfil	Prof. (cm)	pH (agua)	pH (CaCl_2)	CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	PO_4^{2-} ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	K^+ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NH_4^+ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cl^- ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Fe^{2+} ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	% MO	% CaCO_3^-
Bosque	0-5	5.41	4.55	0.02	0.023	0.13	0.88	2.47	2.09	0.169	1.790	0.025	5.70	1.30
	5-12	5.34	4.54	0.03	0.023	0.13	0.12	2.06	1.02	0.226	0.895	0.025	5.59	1.42
	12-32	6.20	5.66	0.10	0.025	0.15	0.15	0.98	0.46	0.169	0.000	0.025	3.50	1.32
	32-38	5.40	4.42	0.06	0.023	0.13	0.88	1.13	1.78	0.226	0.447	0.109	3.34	0.98
	38-52	5.56	4.35	0.05	0.023	0.13	1.46	0.93	0.15	0.226	0.895	0.094	1.53	0.99
	52-76	6.01	4.87	0.02	0.023	0.13	1.76	0.51	0.10	0.141	0.895	0.000	1.04	0.96
	76-	5.72	5.32	0.02	0.023	0.13	0.23	0.98	0.25	0.282	0.447	0.000	0.60	0.94
Suelo desnudo	0- 21	5.03	4.22	0.01	0.024	0.14	1.17	0.93	0.20	0.226	0.000	0.109	4.93	1.32
	21-43	6.47	5.53	0.01	0.023	0.14	0.12	0.98	12.38	0.169	0.447	0.003	0.66	1.46
	43-72	6.45	5.59	0.02	0.023	0.14	0.12	0.62	1.02	0.113	0.447	0.004	3.07	1.39
	72-	6.30	5.70	0.12	0.024	0.14	0.12	0.51	0.92	0.169	0.447	0.062	2.74	1.42