



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**IMPACTO DEL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA  
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO, CENTRO DE  
VERACRUZ, MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

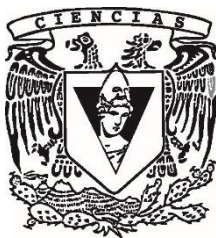
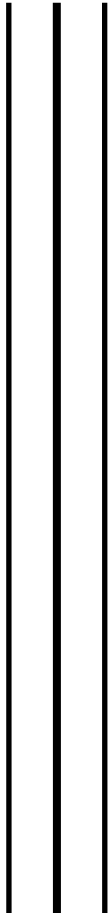
**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A:**

**HUMBERTO PÉREZ PÉREZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DRA. LYSSETTE ELENA MUÑOZ VILLERS**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

1. Datos del alumno  
Pérez  
Pérez  
Humberto  
58587815  
Universidad Nacional Autónoma de  
México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
308226146
2. Datos del tutor  
Dra.  
Lyssette Elena  
Muñoz  
Villers
3. Datos del sinodal 1  
Dra.  
Beatriz  
Ortega  
Guerrero
4. Datos del sinodal 2  
Dra.  
Elizabeth  
Solleiro  
Rebolledo
5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
Guillermo  
Montero  
Martínez
6. Datos del sinodal 4  
Dra.  
María  
Colín  
García
7. Datos de trabajo escrito  
Impacto del cambio en el uso del suelo en la conductividad hidráulica del suelo, centro de  
Veracruz, México  
67 pp  
2016

## **Agradecimientos**

Al Programa de Apoyo de Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), de DGAPA-UNAM, por la beca de titulación concedida por el proyecto titulado "Orígenes, fuentes y sistemas de formación de la precipitación en una región de montaña del centro de Veracruz" (No. IB100313-RR160313).

A la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers por asesorarme en la presente investigación, por la gran paciencia y dedicación; alentándome a nuevos proyectos. De igual manera al Dr. Friso por los datos obtenidos de precipitación.

Al Instituto de Ecología, A.C. (INECOL), Xalapa, Veracruz y a los propietarios de "La Orduña" por los permisos otorgados para llevar a cabo esta investigación en el Santuario de Bosque de Niebla y en las plantaciones de café y caña, respectivamente. También agradezco al Laboratorio de Suelos del INECOL por el apoyo en el análisis de las muestras de suelo.

A cada uno de mis sinodales, por tomarse el tiempo en la revisión de la presente investigación. Gracias por sus correcciones, comentarios y sugerencias.

Luis, llegaste a mi vida en el momento propicio, gracias por creer en mí y por todo ese apoyo que siempre me has brindado, agradezco infinitamente tu compañía.

A mis amigos Chantal, Raquel, Eunice, Nidia y Anthony por aquellos momentos divertidos durante la licenciatura, los equipos de trabajo y salidas al campo que serán siempre las mejores y a mi amigo de la toda la vida, Oscar, por ayudarme a encontrar la forma de procesar mis datos sin tardarme una eternidad, ¡gracias amigos!

Finalmente quiero agradecer y dedicar este proyecto a mis padres por el tremendo apoyo, paciencia y porque nunca dejaron de creer en mi trabajo. Gracias por entenderme, guiarme y alentarme en todas mis decisiones. A mi pequeña hermana Evelin por sus votos de confianza y alegría. Todo este esfuerzo que viene desde tiempo atrás, se los debo a ustedes.

...porque con su bendición pude seguir adelante...

## **Índice**

<b>Resumen</b>	1
<b>1. Introducción</b>	2
<b>Objetivo general</b>	5
<b>Objetivos particulares</b>	5
<b>Preguntas de investigación</b>	5
<b>Hipótesis</b>	6
<b>2. Marco teórico</b>	7
2.1 Ciclo hidrológico	7
2.2 Propiedades físicas del suelo	9
2.2.1 Textura	9
2.2.2 Estructura	9
2.2.3 Estabilidad de los agregados del suelo	9
2.2.4 Densidad aparente	10
2.2.5 Porosidad	10
2.3 Propiedades hídricas del suelo	10
2.3.1 Conductividad hidráulica saturada	10
2.3.2 Humedad del suelo	10
2.3.3 Constantes de humedad	11
2.4 Métodos de medición de la precipitación e infiltración de agua en el suelo	11
<b>3. Métodos</b>	14
3.1 Zona de estudio	14
3.2 Sitios de estudio	15

3.2.1 Bosque Mesófilo de Montaña	16
3.2.2 Plantación de café bajo sombra	16
3.2.3 Plantación de caña de azúcar	18
3.3 Muestreo de suelo	18
3.4 Infiltración y cálculo de la conductividad hidráulica saturada	19
3.5 Análisis de correlación y estadísticos	23
3.6 Relación entre los valores de $K_{fs}$ y la precipitación	24
<b>4. Resultados</b>	<b>25</b>
4.1 Características edáficas <i>in situ</i>	25
4.2 Propiedades hidrofísicas del suelo	26
4.2.1 Densidad aparente	27
4.2.2 Humedad inicial y constantes de humedad	27
4.3 Infiltración y conductividad hidráulica saturada	28
4.3.1 Infiltración	28
4.3.2 Conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ )	30
4.4 Relaciones entre propiedades hidrofísicas y conductividad hidráulica saturada del suelo	31
4.5 Diferencias en las propiedades hidrofísicas del suelo por tipo de vegetación	33
4.6 Precipitación contra conductividad hidráulica saturada en las coberturas vegetales estudiadas	35
<b>5. Discusión</b>	<b>40</b>
5.1 Impactos del cambio en el uso de suelo sobre la conductividad hidráulica saturada	40
5.2 Alteración de las propiedades hidrofísicas a causa del cambio y manejo del suelo	42

5.3 Intensidad de precipitación vs. conductividad hidráulica del suelo: infiriendo flujos durante eventos de lluvia	44
<b>6. Conclusiones</b>	45
<b>7. Bibliografía</b>	46
<b>8. Apéndice</b>	53
8.1 Gráficas de infiltración: A) Infiltración acumulada, B) Infiltración instantánea de los sitios estudiados.	53
8.2 Gráficos de correlación de las propiedades hidrofísicas con los valores de conductividad hidráulica saturada por cada sitio de estudio	65

## **Índice de figuras**

Figura 1. Ciclo hidrológico	8
Figura 2. Localización de la zona de estudio	14
Figura 3. Sitios de estudio	15
Figura 4. Región V de bosque mesófilo de montaña, Santuario del Bosque de Niebla	16
Figura 5. Ubicación de plantación de café bajo sombra y caña de azúcar	17
Figura 6. Línea de muestreo	19
Figura 7. Componentes de un IPCCAS	20
Figura 8. Realización de los ensayos de infiltración	21
Figura 9. Gráficas de infiltración acumulada e infiltración instantánea	22
Figura 10. Curvas experimentales de infiltración acumulada e infiltración instantánea de cada sitio estudiado	29
Figura 11. Correlación de las propiedades hidrofísicas y la conductividad hidráulica saturada	32
Figura 12. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la	37

conductividad hidráulica saturada en la plantación de caña de azúcar

Figura 13. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la conductividad hidráulica saturada en la plantación de café bajo sombra 38

Figura 14. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la conductividad hidráulica saturada en el bosque mesófilo de montaña 39

### **Índice de tablas**

Tabla 1. Propiedades edáficas *in situ* de los sitios de estudiados 26

Tabla 2. Valores estadísticos de las propiedades hidrofísicas 28

Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica saturada de los sitios estudiados 30

Tabla 4. Diferencias entre los tipos de vegetación por cada variable hidrofísica estudiada 33

Tabla 5. Diferencias de la conductividad hidráulica saturada en las distintas condiciones estudiadas en las plantaciones de caña de azúcar y café bajo sombra 34

Tabla 6. Características de los eventos de precipitación 35



## Resumen

El bosque mesófilo de montaña es un ecosistema muy valorado debido a su alta capacidad de infiltración, retención y recarga de agua en cuencas. La conductividad hidráulica saturada de campo ( $K_{fs}$ ) es una propiedad estrechamente relacionada con las características físicas e hídricas del suelo, y es sensible a cambios por el uso y manejo del suelo. En el centro de Veracruz, el bosque mesófilo se distribuye entre los 1200 y 2550 m s.n.m., y pocos han sido los trabajos que han evaluado los impactos hidrológicos en el suelo por su conversión a otros tipos de vegetación. Este trabajo investigó la  $K_{fs}$  del suelo en superficie y su relación con la densidad aparente, textura, estructura y contenidos de humedad del suelo, en tres cubiertas vegetales: bosque mesófilo, cafetal bajo sombra y plantación de caña de azúcar, sobre suelo Acrisol en la región Xalapa-Coatepec, Ver. Asimismo, se compararon las  $K_{fs}$  de cada cobertura vegetal con las intensidades promedio ( $I_{prom}$ ) y máximas ( $I_{máx}$ ) de lluvia locales calculadas con datos observados a resoluciones de 10, 30 y 60 minutos. El bosque mostró en promedio los valores más altos de  $K_{fs}$  ( $132.2 \pm 44.7$  mm/h  $\pm \sigma$ ), mientras que la caña reportó los valores más bajos ( $11.4 \pm 13.4$  mm/h). La densidad aparente fue la propiedad física que más explicó la variación de la  $K_{fs}$  ( $r^2 = 0.8$ ). Contrastando los valores de infiltración con las intensidades de lluvia, se observó que la  $K_{fs}$  en ambos cultivos estuvo muy por debajo de las  $I_{máx}$  (72.2, 53 y 34.9 mm/h), pero no así para las  $I_{prom}$  (12, 6.9 y 2.8 mm/h). Por otro lado, se observó que la infiltración en el bosque estuvo muy por encima de las  $I_{máx}$  (99, 69.4 y 51.2 mm/h) e  $I_{prom}$  (12, 6.9 y 2.8 mm/h). Estos resultados muestran que la plantación de caña de azúcar es la cobertura más propensa a desarrollar escurrimientos superficiales sobre el suelo y, por tanto más vulnerable a erosionarse, seguido por el cafetal bajo sombra, esto debido a fuertes alteraciones en la estructura del suelo como consecuencia de la historia de uso y manejo de la tierra.

Palabras clave: Infiltración, precipitación, monocultivos, bosque de niebla, Xalapa-Coatepec.

## 1. Introducción

El estudio sobre los cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo proporciona la base para conocer los patrones y las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad (Lambin *et al.*, 2001). Son las actividades agrícolas y ganaderas vinculadas al sector industrial las que demandan una superficie cada vez mayor, y por lo tanto las que más influencia han tenido en las transformaciones de la cubierta vegetal a escala local, regional y global (Fregoso, 2000).

El bosque de niebla, conocido en México como bosque mesófilo de montaña (Rzedowski, 1978), se localiza generalmente entre los 1100 y 2000 m s.n.m aunque este intervalo varía con la latitud y exposición de las montañas, entre otros atributos del medio físico. Es uno de los ecosistemas más valorados debido a su alta capacidad de intercepción de agua de lluvia y niebla, filtración y reserva de agua en el subsuelo, permitiendo controlar la erosión de los suelos, el azolve de los ríos y deslaves así como el posible riesgo a inundaciones; el bosque mesófilo igualmente contribuye de manera importante al enriquecimiento y desarrollo de suelos debido a sus bajas tasas de descomposición (Challenger, 1998). Sin embargo, estos bosques presentan a nivel mundial la tasa de deforestación más alta entre los bosques de tipo tropical (Doumenge *et al.*, 1995). Se estima que en México, más del 50% de los bosques de niebla han sido deforestados y/o convertidos a otros usos de suelo (Doumenge *et al.*, 1995).

Los suelos, por lo general de origen volcánico, donde comúnmente se desarrollan los bosques mesófilos son muy permeables debido a su alta capacidad de infiltración y de retención de agua, por lo que el escurrimiento superficial en bosques maduros y conservados, es poco frecuente (Bruijnzeel, 2004; Muñoz-Villers y McDonnell, 2013). La infiltración de agua es un proceso sensible a varios factores entre los que destacan, la intensidad de la precipitación, la pendiente, la humedad antecedente del suelo y algunas de sus propiedades físicas (densidad aparente, porosidad total); estas últimas ligadas con el tipo de suelo e historia de transformación y manejo del mismo (Elsenbeer *et al.*, 1992; Perkins *et al.*, 2007).

La conductividad hidráulica saturada de campo ( $K_{fs}$ ), es una de las propiedades hidrofísicas más sensibles a los cambios de uso y manejo de la tierra (Wit, 2001; Perkins *et al.*, 2007; Zimmermann y Elsenbeer, 2008; Gómez-Tagle *et al.*, 2008), utilizada como descriptor del proceso de infiltración del agua en el suelo.

La pérdida de suelo por el impacto directo de la lluvia sobre un suelo desnudo o con escasa vegetación representa el primer estadio en los procesos de erosión. El impacto de las gotas de lluvia puede provocar el colapso de agregados con liberación de partículas de suelo. El material liberado puede rellenar poros y dar lugar a un sellamiento y al secarse a una costra superficial, o bien ser arrastrado por el agua producto del escurrimiento superficial. En este sentido, la presencia de vegetación con determinado nivel de desarrollo puede actuar como una cubierta protectora del suelo, a través de su capacidad de interceptación de agua por el dosel y biomasa de raíces (Regües y Torri, 2002).

Las perturbaciones antrópicas tales como la conversión de bosque a pastizal afectan la hidrología del suelo a través de cambios en la estructura y propiedades del mismo. En este respecto Zimmermann *et al.* (2006) investigaron en la cuenca del río Amazonas, Brasil, los efectos del uso de la tierra y cubierta vegetal (bosque primario, bosque secundario y pastizal) cuantificando la infiltración y la  $K_{fs}$  a dos profundidades en el suelo (12.5 y 20 cm), para después compararlas con las intensidades máximas de lluvia observadas en ese lugar. Sus resultados mostraron menores tasas de infiltración en el pastizal comparado con los bosques; las mayores infiltraciones se observaron en el bosque primario. También se observó que en el bosque secundario y el pastizal la  $K_{fs}$  estuvo por debajo de las intensidades máximas de precipitación reportadas en estos sitios. Posteriormente, Zimmermann y Elsenbeer (2008) evaluaron la influencia de estas alteraciones en la permeabilidad del suelo midiendo la  $K_{fs}$  a diferentes profundidades en un pastizal de pastoreo, un pastizal abandonado y un bosque natural en el sur de Ecuador. La  $K_{fs}$  mostró una disminución significativa sobre el pastizal para pastoreo comparado con el bosque natural. Sin embargo, al comparar la  $K_{fs}$  del pastizal abandonado con el pastizal para pastoreo, el pastizal abandonado presentó un incremento de hasta dos órdenes de magnitud en el suelo más superficial, mientras que a mayor profundidad no hubo diferencias. Por otro lado, Hassler *et al.* (2011) estudiaron efectos de sucesión secundaria sobre la  $K_{fs}$  en Panamá, utilizando un mosaico del paisaje conformado por cuatro clases de cobertura vegetal y usos de suelo: pastizal, dos bosques secundarios de 5 y 12 años de edad, y un bosque maduro de más de 100 años de edad. Se encontró que a mayor profundidad la  $K_{fs}$  no mostró diferencias significativas entre las clases de cobertura de la tierra, mientras que en horizontes superficiales la  $K_{fs}$  se vio reducida por los cambios de uso de suelo. De estos datos se puede concluir que las perturbaciones afectan la estructura espacial de la  $K_{fs}$ , en particular sobre la capa superficial del

suelo y que la capacidad de infiltración de un suelo puede recuperarse, pero dicho proceso tardaría al menos una década de acuerdo a las condiciones de uso y manejo del suelo.

Históricamente, Veracruz ha sido el cuarto estado del país con mayor superficie de bosque mesófilo; sin embargo, gran parte de este y otros tipos de bosque han sido convertidos a otros usos de suelo en las últimas décadas (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008). En la zona centro de Veracruz, la distribución altitudinal que caracteriza al bosque mesófilo lo divide en dos grupos: bosque mesófilo de montaña baja, presente de los 1200 a los 1800 m s.n.m., y bosque mesófilo de montaña alta, entre 1800 y 2550 m s.n.m. (Williams-Linera *et al.*, 2013); este último rango ha concentrado la mayoría de las investigaciones ecohidrológicas realizadas en los últimos 10 años, con el fin de entender los impactos y modificaciones a los procesos hidrológicos en respuesta a distintas condiciones de uso y manejo del suelo.

En este respecto, Marín-Castro (2010) estudió la variación espacial de la  $K_{fs}$  en un gradiente de perturbación en laderas de bosque mesófilo de montaña maduro, bosque mesófilo secundario y pastizal, en suelos de origen volcánico donde la unidad edáfica corresponde a Andosoles úmbricos. Sus resultados mostraron valores muy bajos de conductividad hidráulica en el pastizal (0.2 mm/h; valor promedio), comparados con el bosque mesófilo secundario (268 mm/h) y bosque mesófilo maduro (447 mm/h). El autor concluye que los cambios en la cubierta vegetal y el uso de suelo conllevan a disminuciones importantes en los valores de la conductividad hidráulica saturada en la capa superficial del suelo en la región alta de la montaña (2000 – 2500 m s.n.m.), con consecuencias en los procesos de generación de escurrimiento de agua sobre el terreno. En este sentido, existen muy pocos trabajos que hayan evaluado los impactos del cambio en el uso de suelo sobre la hidrología del suelo en la región de bosque mesófilo de montaña baja.

Con el fin de estudiar la dinámica del agua en la capa superficial del suelo y evaluar los posibles impactos por la conversión del bosque mesófilo a otros tipos de vegetación, el presente estudio analizó la conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) de campo como descriptor del proceso de infiltración, en tres cubiertas vegetales contrastantes y dominantes en el límite inferior de distribución del bosque en la región central de montaña de Veracruz.

## **Objetivo general**

Analizar la conductividad hidráulica saturada de campo ( $K_{fs}$ ) en la capa superficial del suelo (5 cm) y su relación con algunas propiedades físicas (densidad aparente, textura y estructura) e hídricas del suelo (humedad inicial y constantes de humedad) en tres cubiertas vegetales dominantes (bosques mesófilo, cafetal bajo sombra y plantación de caña de azúcar) sobre suelo volcánico en la región central de Veracruz, México.

## **Objetivos particulares**

1. Caracterizar las propiedades edáficas en los sitios de estudio (*e.g.* profundidad de horizontes, textura, estructura y estabilidad de agregados naturales en la capa superficial).
2. Determinar la conductividad hidráulica saturada de campo ( $K_{fs}$ ), así como las propiedades físicas (densidad aparente) e hídricas (humedad inicial, contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez) del suelo en cada sitio estudiado.
3. Analizar y comparar las intensidades promedio y máximas de lluvia con las tasas de infiltración del suelo obtenidas en cada cobertura vegetal.

## **Preguntas de investigación**

1. ¿En qué medida la conversión del bosque a otros tipos de vegetación afecta la  $K_{fs}$  en la capa superficial del suelo?
2. ¿Cómo se modifica la densidad aparente y constantes de humedad en el suelo debido al cambio en el uso y manejo del suelo, y si estas propiedades permiten explicar la variación de  $K_{fs}$  entre sitios?
3. De acuerdo a las intensidades de lluvia y capacidades de infiltración observadas, ¿qué cubiertas vegetales son más propensas a la generación de escurrimientos superficiales?

## **Hipótesis**

En función del uso y manejo de la tierra, la cubierta vegetal que presentará el mayor grado de perturbación será la plantación de caña de azúcar, por tanto este uso de suelo mostrará las capacidades de infiltración más bajas siendo así el sistema más propenso a generar escurrimientos de tipo superficial, seguido por la plantación de café bajo sombra comparado con el bosque.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico terrestre es un fenómeno global de circulación del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera. Este movimiento es ocasionado por distintos procesos por los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en forma de vapor de agua, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida. El movimiento del agua en este ciclo es mantenido por la radiación solar y por la fuerza de gravedad.

La **precipitación** es la fuente principal de entrada de agua en un ecosistema terrestre. Cuando da inicio un evento de precipitación el agua que cae sobre la superficie terrestre es primero interceptada por la cobertura vegetal, y llega al suelo como escorrentía por los troncos, como lluvia que pasa directamente entre el dosel y como goteo del agua que excede la capacidad de almacenaje de la vegetación (Heuveldop *et al.*, 1986) (Figura 1).

La transpiración es el transporte y evaporación de agua desde el suelo a la atmósfera a través de las plantas, principalmente por sus hojas y depende del agua disponible en el suelo, la superficie arbórea, la temperatura y la humedad del aire, radiación solar y el viento. A nivel global, se calcula que el 10% del vapor de agua presente en la atmósfera se debe a este fenómeno, mientras que el 90% restante proviene de la evaporación de océanos, lagos y ríos, principalmente. El efecto combinado de la transpiración de las plantas y la evaporación del dosel y suelo recibe el nombre de evapotranspiración (FAO, 2006).

El agua al llegar al suelo puede infiltrarse, acumularse o escurrir sobre la superficie del mismo. El agua que se infiltra es almacenada en diferentes formas, la porción que queda disponible para las plantas depende del tipo de suelo y sus características hídricas. Por otro lado, el agua que no es absorbida por las plantas se moverá verticalmente hasta encontrar una capa impermeable de roca, a partir de allí el flujo de agua por lo general es muy lento, y es el encargado de alimentar ríos y arroyos (Muñoz-Villers, 2008). Si, durante un evento de precipitación, se excede la capacidad de infiltración de agua en el suelo el agua escurrirá en sentido de la pendiente; a este flujo de agua sobre la superficie se le conoce como escurrimiento superficial.

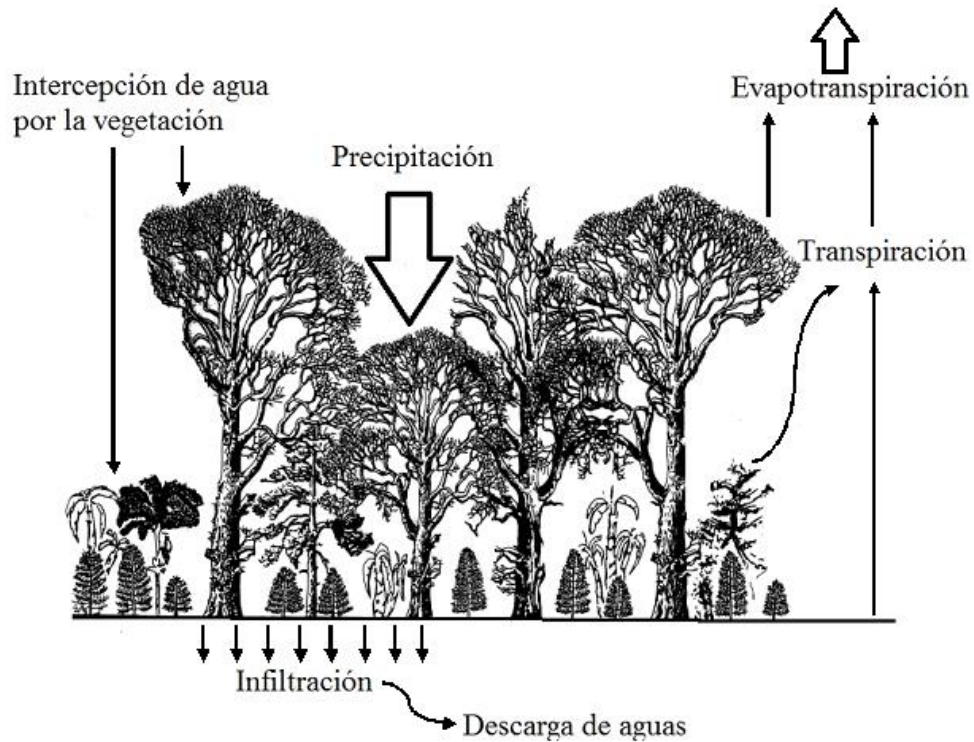


Figura 1. Ciclo hidrológico.

La **infiltración** es el proceso por el cual el agua ingresa de la superficie del terreno al suelo por unidad de área y de tiempo (mm/h). En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie y posteriormente superado cierto nivel de humedad el suelo alcanza la tasa de máximo ingreso de agua, proceso denominado como capacidad de infiltración; es decir, es la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones (Hillel, 2004).

En un ensayo de infiltración, el volumen de agua que entra al suelo tiende a decrecer con el tiempo hasta alcanzar un valor constante denominado infiltración base (Campos-Aranda, 1987) y se relaciona con la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_{fs}$ ). La  $K_{fs}$  representa la facilidad con la que el agua fluye a través de los poros del suelo. Es decir, cuando todos los macro, meso y micro poros se encuentran completamente saturados de agua. Este flujo de agua en un medio poroso saturado es utilizado por diversos autores como descriptor de la infiltración base (Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Zimmermann y Elsenbeer, 2008; Ferrer *et al.*, 2004; Sobieraj *et al.*, 2004; Wit, 2001). En este sentido, la estimación de infiltración es de gran importancia debido



a su aplicación en el sector agrícola y ambiental, dado que permite cuantificar la escorrentía y la erosión, entre otros, así como estudiar los efectos de diferentes prácticas de uso de suelo (Rodríguez-Vásquez *et al.*, 2008).

Existen varios factores que afectan la capacidad de infiltración, como la cantidad e intensidad de la lluvia, el medio superficial, la capacidad de almacenamiento del suelo y las características del medio permeable. El medio superficial se refiere a que la superficie del suelo puede estar cerrada por la acumulación de partículas que impidan, o retrasen la entrada de agua al suelo. La capacidad de almacenamiento depende de la porosidad, el espesor del horizonte y la cantidad de humedad existente. Las características del medio permeable están relacionadas con el tamaño del poro y su distribución, el tipo de suelo –arenoso, limoso, arcilloso–, la estructura y capas de suelos y el tipo de vegetación (Saldana *et al.*, 1998).

## 2.2 Propiedades físicas del suelo

### 2.2.1 Textura

Los suelos son una mezcla de partículas minerales y orgánicas de diferentes formas y tamaños. La textura está determinada por abundancia y distribución por tamaño de las partículas que contiene el suelo. Se denominan “arena” aquellas partículas con diámetro de 2-0.05 mm, de 0.05-0.002 mm se consideran “limo” y “arcilla” los tamaños menores a 0.002 mm. Su determinación se realiza mediante análisis mecánico de Bouyoucos o de Robinson (Burt, 2004).

### 2.2.2 Estructura

La estructura de un suelo se refiere a la agregación de las partículas primarias (arena, limo, arcilla) en partículas compuestas o secundarias llamados “peds” o agregado natural (Siebe *et al.*, 2006). Los agentes responsables de la estructura son las características hídricas junto a la textura y materia orgánica (Crosara, 2004).

### 2.2.3 Estabilidad de agregados del suelo

Es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). Así, la estabilidad de agregados del suelo, por ser

una característica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Doran y Parkin, 1994)

#### 2.2.4 Densidad aparente

La densidad aparente es la medida en peso del suelo secado a 105°C por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ). Difiere de la densidad real en el sentido de que incluye el espacio poroso. La densidad aparente es un criterio importante para la evaluación del balance hídrico y de nutrientes en el suelo y determinante en relación a la permeabilidad y profundidad fisiológica (Siebe *et al.*, 2006).

#### 2.2.5 Porosidad

La porosidad está formada por la suma de los porcentajes de poros (macro, meso y microporos) y su diferente tamaño. La proporción de los tamaños de los poros está delimitada por el tipo de suelo y por el grado de compactación de la estructura. Asimismo, los factores que la determinan son principalmente la textura, estructura, la cantidad de materia orgánica y la actividad biológica (Donoso, 1992).

### 2.3 Propiedades hídricas del suelo

#### 2.3.1 Conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) es una medida de la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación. Este flujo saturado ocurre cuando la presión del agua en los poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo es de cero. En la mayoría de suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio poroso total está lleno con agua. El restante 5% está lleno con el aire atrapado (Donado, 2004). La  $K_{fs}$  está determinada por las propiedades físicas del suelo antes mencionadas, y también puede guardar estrecha relación con otras propiedades hídricas.

#### 2.3.2 Humedad del suelo

La humedad del suelo se puede expresar gravimétricamente, con base en la masa, o volumétricamente, con base en el volumen. La humedad gravimétrica ( $w$ ) es la forma más básica

de expresar la humedad del suelo. Tiene las unidades de kg/kg. La humedad volumétrica, generalmente, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo.

### 2.3.3 Constantes de humedad

Cada suelo presenta, en función de sus propiedades hídricas, la capacidad de movimiento de agua en el suelo. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente son las variables que permiten evaluar las condiciones de drenaje, riego y productividad de los suelos.

La capacidad de campo (CC) de un suelo representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad, después de un riego o lluvia. En este punto el drenaje interno es insignificante. Al igual que el punto de saturación, también se ve afectado por el tipo y contenido de arcillas y materia orgánica. En términos de tensión, el valor de capacidad de campo se obtiene, generalmente, cuando se aplica al suelo una tensión equivalente a 33 kPa, utilizando el procedimiento de las membranas de presión. Generalmente se expresa el contenido de agua en suelo por la forma gravimétrica de humedad ( $\omega$ ) en unidades de  $\text{g}_{\text{Agua}}/\text{g}_{\text{Suelo seco}}$  o volumétrica de humedad en unidades de  $\text{cm}^3_{\text{Agua}}/\text{cm}^3_{\text{Suelo}}$ . Si no se expresan las unidades, se asume que se refiere al contenido gravimétrico (Dane y Topp, 2002).

El punto de marchitez permanente (PMP) se define como el contenido de humedad en la zona de las raíces, según el cual la planta se marchita y no puede recobrar igual turgencia al colocarla en una atmósfera saturada de agua durante doce horas (Dane y Topp, 2002). Se puede determinar mediante membrana presión a un potencial matricial de 1500 kPa.

El agua aprovechable para las plantas es la cantidad de agua en el suelo que puede ser absorbida por las plantas. La diferencia entre los valores de humedad en la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente representa el agua disponible para las plantas. La capacidad de campo representa el límite superior ó 100% de disponibilidad de la humedad del suelo y el punto de marchitez permanente es el límite inferior de esta disponibilidad ó 0% (Dane y Topp, 2002).

## 2.4 Métodos de medición de la precipitación e infiltración de agua en el suelo

La precipitación se mide en términos de la cantidad de agua que cae en un área y en un periodo de tiempo determinado expresada comúnmente en milímetros (mm). Esta lámina de agua indica la altura que se acumula en una superficie durante el tiempo que dura la lluvia.

Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en la parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, y se registra su altura.

A continuación se explican los más importantes:

1. Pluviómetro manual: es un indicador de la lluvia caída, el cual consiste en un recipiente especial cilíndrico, por lo general de plástico, con una escala graduada en donde todas las marcas están a igual distancia entre sí. La altura del agua que llena el cilindro es equivalente a la precipitación.

2. Pluviómetro totalizador: se componen de un embudo o triángulo invertido, que mejora la precisión y recoge el agua en un recipiente graduado. A diferencia del anterior, cuanto más hacia abajo están, las marcas de los mm se van separando entre sí cada vez más, esto compensa el estrechamiento del recipiente. El mismo tiene esa forma para dar más precisión en lluvias de poco volumen y facilitar su lectura. El instrumento se coloca a una determinada altura del suelo y un operador registra cada 24 horas el agua caída.

3. Pluviómetro de balancín o doble cubeta basculante: el embudo conduce el agua colectada a una pequeña cubeta triangular doble, de metal o plástico, con una bisagra en su punto medio. Es un sistema cuyo equilibrio varía en función de la cantidad de agua en las cubetas. La inversión se produce generalmente a 0.254 mm de precipitación, así que cada vez que caen 0.254 mm de lluvia la báscula oscila, vaciando la cubeta llena, mientras comienza a llenarse la otra (Heras *et al.*, 2002).

La intensidad es una característica de la precipitación cuyo análisis tiene particular importancia en las tormentas debido a que sus consecuencias se observan rápidamente en la superficie que cubren. La intensidad de la precipitación es la cantidad de lluvia que cae en determinado tiempo, reportada generalmente en mm/h. La duración de la lluvia corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. El periodo de duración, por otro lado, es un determinado periodo, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura una tormenta (Villón-Béjar, 2004).

Los instrumentos que miden la infiltración con base a la  $K_{fs}$  en campo utilizando métodos directos son:

1. Infiltrómetro: es un aparato sencillo, de uno o dos tubos de plástico resistente de diámetro fijo. Se clava en el suelo a una profundidad variable, se le agrega una cierta cantidad de agua y se observa el tiempo que tarda en infiltrarse.
2. Infiltrómetros de doble anillo: son dos anillos concéntricos, el interior de 23 cm de diámetro para determinar la velocidad de infiltración, mientras que el exterior de 35 cm se inunda para disminuir los efectos de frontera del anillo interior. Los anillos se insertan en el suelo a la profundidad mínima necesaria para evitar fugas de los mismos.
3. Lisímetro: es un depósito enterrado de paredes verticales, abierto en su parte superior y cubriendo el terreno que se quiere estudiar. La superficie del suelo está sometida a los agentes atmosféricos y recibe las precipitaciones naturales. El agua de drenaje es medida, al igual que la humedad y la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Los inconvenientes son la necesidad de períodos largos de medida, la reconstrucción del suelo no es adecuada ya que no se reproduce exactamente igual el proceso que el mismo sufrió.
4. Simuladores de lluvia: estos instrumentos aplican agua en forma constante, reproduciendo lo más fielmente un evento de precipitación. Las gotas son del tamaño de las de lluvia y tienen una energía de impacto similar, lo que permite comparar los efectos. Varían en tamaño, cantidad de agua necesaria y método de medición. El área de lluvia es variable entre  $0.1 \text{ m}^2$  y  $40 \text{ m}^2$ . La diferencia entre precipitación y escorrentía representa la valoración del volumen infiltrado (Heras *et al.*, 2002).

### 3. Métodos

#### 3.1 Zona de estudio

La investigación se llevó a cabo en el municipio de Coatepec, ubicado en la región centro del estado de Veracruz (Figura 2); se sitúa a los 19°21'32'' (latitud norte) y 96°47'40'' (longitud oeste) (INEGI, 2012). Específicamente, la zona de estudio se localiza entre los 1200 y 1300 m s.n.m. a 8 km al sur de la ciudad de Xalapa.

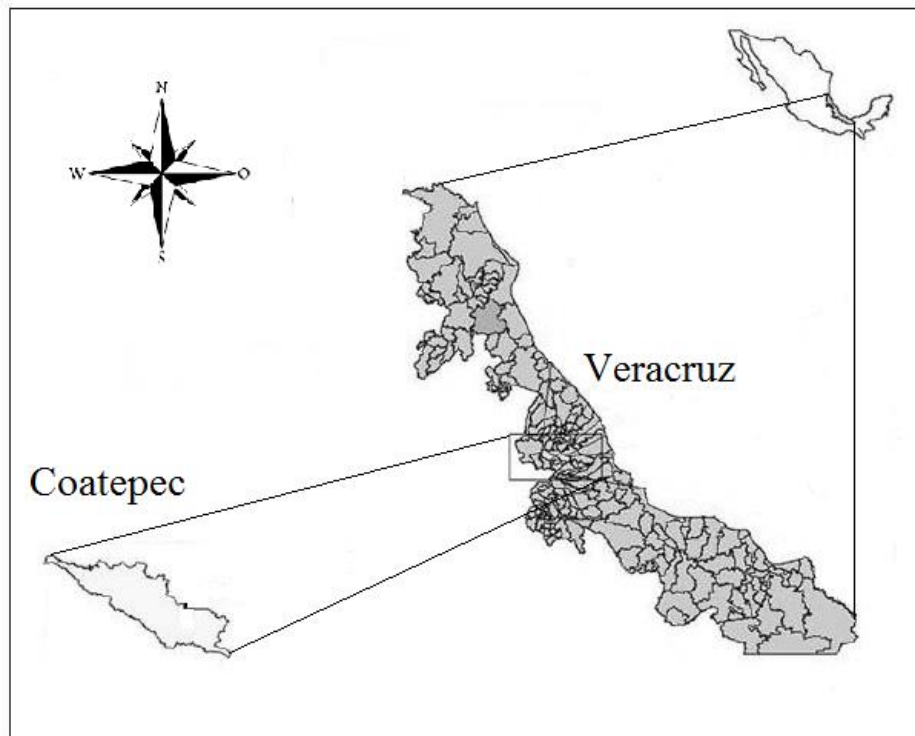


Figura 2. Localización de la zona de estudio  
Fuente: Modificado de INEGI (2010).

El clima se define como templado húmedo con lluvias durante todo el año, distinguiéndose tres estaciones: la temporada seca-fría, la seca-cálida y la de lluvias. Durante la temporada seca-fría, de noviembre a marzo, se presentan los llamados “nortes”, una condición típica atmosférica que trae aire polar al Golfo de México, causa nieblas, frío y llovizna durante días. En la temporada seca-cálida, de abril a mayo, se presentan las temperaturas más altas, la menor precipitación, la menor cobertura de nubes, un mayor aumento en las horas de luz y radiación. Durante la temporada de lluvias, entre junio y octubre, ocurre la mayor precipitación y los meses de julio y septiembre, en especial, se caracterizan por presentar lluvias muy abundantes. La precipitación

media anual es de 1765 mm y la temperatura media anual de 19.5°C, con una temperatura media mensual mínima de 15.5°C en enero y una máxima de 22.5°C en mayo (Holwerda *et al.*, 2013). En el centro de Veracruz el paisaje está compuesto por una matriz de fragmentos de bosque, campos agrícolas, potreros, cafetales y asentamientos humanos (Williams–Linera, 1993). La franja de bosque mesófilo de montaña baja (1200-1800 m s.n.m.) se establece en lomeríos con suelos volcánicos con una gran heterogeneidad topográfica y ambiental. Los tipos de suelo predominantes en la región han sido producidos por el vulcanismo, provenientes del Cofre de Perote, denominados como Andosoles. Las propiedades físicas y químicas generales de estos suelos son: baja densidad aparente (0.2-0.6 g/cm<sup>3</sup>), alta porosidad (80%), presencia de minerales amorfos –denominados alófanos– lo cual favorece la aireación, la alta retención de agua dentro del suelo y la conductividad hidráulica (Juo y Franzluebbbers, 2003). Son suelos ácidos, profundos y con un contenido de nutrientes bajo, pero con una muy alta fertilidad debido a un contenido alto de materia orgánica (Williams–Linera, 2007).

### 3.2 Sitios de estudio

Se seleccionaron tres cubiertas vegetales distintas y dominantes (Figura 3) en el límite inferior de distribución del bosque mesófilo en el centro de Veracruz (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008), caracterizadas por estar presentes en un mismo rango altitudinal (1200 – 1300 m s.n.m.) y, por tanto, compartir condiciones climáticas similares. En los sitios de estudio domina la textura arcillosa, con un contenido de materia orgánica del 2.4% en superficie en un estado de descomposición ligero, proveniente de las especies dominantes (Meza y Geissert, 2007).



Figura 3. Sitios de estudio: A) Bosque mesófilo de montaña. B) Plantación de café bajo sombra. C) Plantación de caña de azúcar.

### 3.2.1 Bosque Mesófilo de Montaña

El bosque mesófilo de montaña estudiado se ubica en el *Santuario de Bosque de Niebla*, reserva perteneciente al Instituto de Ecología, A.C (INECOL), Xalapa, Veracruz. Se localiza a 1325 m s.n.m. y pertenece a la región V designado por la CONABIO (2010) (Figura 4). Es un área de vegetación poco perturbada y única en la región, con una superficie de 30 ha aproximadamente, caracterizada por plantas epifitas como el “tencho” (*Tillandsia multicaulis*), árboles como la “marangola” (*Clethra macrophylla*), “aguacatillo” (*Cinnamomum effusum*) y “jinicuil” (*Inga jinicuil*) que alcanzan hasta 25 m de alto, “tlachichinole” (*Moussonia deppeana*) que se trata de un arbusto de 2 m de altura y “flor de mayo” (*Palicourea padifolia*) de hasta 4.5 m. La unidad edáfica corresponde a un Acrisol húmico vértico (Arreola-Flores, 2016). Asimismo, el Santuario es refugio de un importante número de especies de animales entre las cuales destacan anfibios, reptiles, aves y mamíferos.

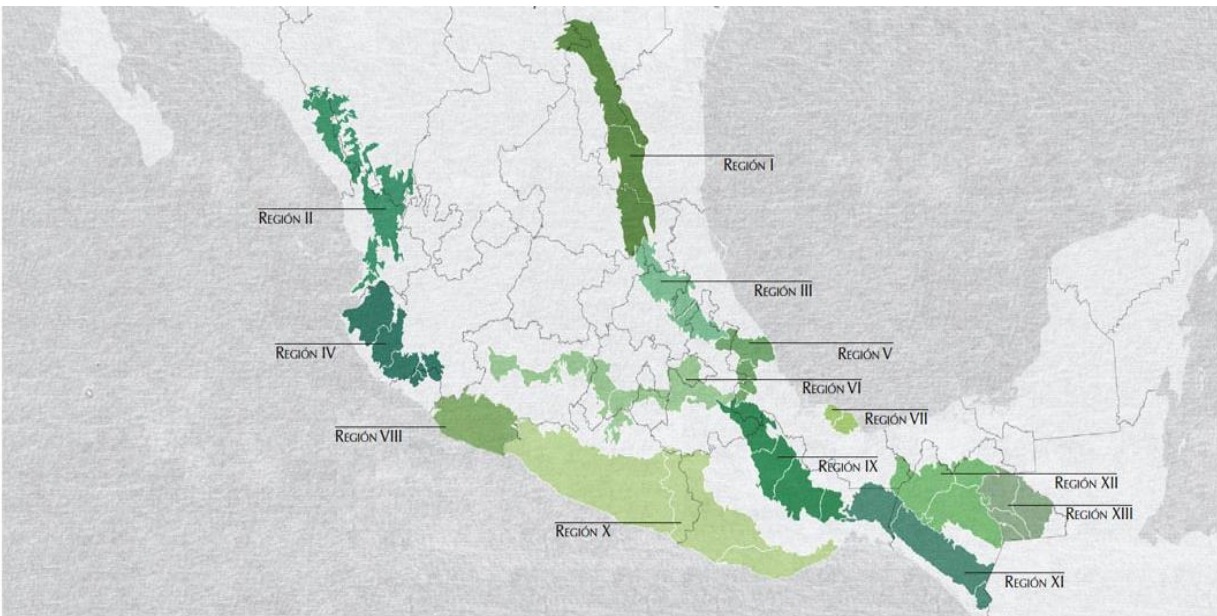


Figura 4. Región V de bosque mesófilo de montaña, Santuario de Bosque de Niebla.  
Fuente: CONABIO, 2010.

### 3.2.2 Plantación de café bajo sombra

La plantación de café con una superficie de 196 ha se localiza en la localidad La Orduña, perteneciente al municipio de Coatepec (Figura 5). Se encuentra situado en una meseta a una altitud de 1210 m s.n.m. La plantación de café consiste en un monocultivo bajo sombra, donde la



mayor parte del bosque natural ha sido sustituido por diversas especies de árboles de sombra (Holwerda *et al.*, 2013).

La plantación tiene una estructura vertical compleja donde se distinguen hasta dos niveles de dosel, la altura promedio de los árboles es de 14 m y la cobertura es del 80%. Se presentan árboles de “jinicuil” (*Inga jinicuil*) de sombra en promedio y se utilizan variedades de café de porte alto, sembradas con una densidad de 1,600 plantas por ha. Los arbustos de café pertenecen a la especie *Coffea arabica*; con una altura de 2.5 m en promedio. En esta región la planta *Coffea arabica* florece en marzo o abril, el periodo de desarrollo del fruto es entre mayo y octubre y la cosecha se realiza entre los meses de diciembre y febrero (Villers *et al.*, 2009). Las plantas de café y árboles de sombra están sujetos a la poda en intervalos irregulares, el manejo incluye el control de malezas, la poda selectiva y sistemática, además del control fitosanitario mediante agroquímicos. Se asocia principalmente con medianos y grandes productores.

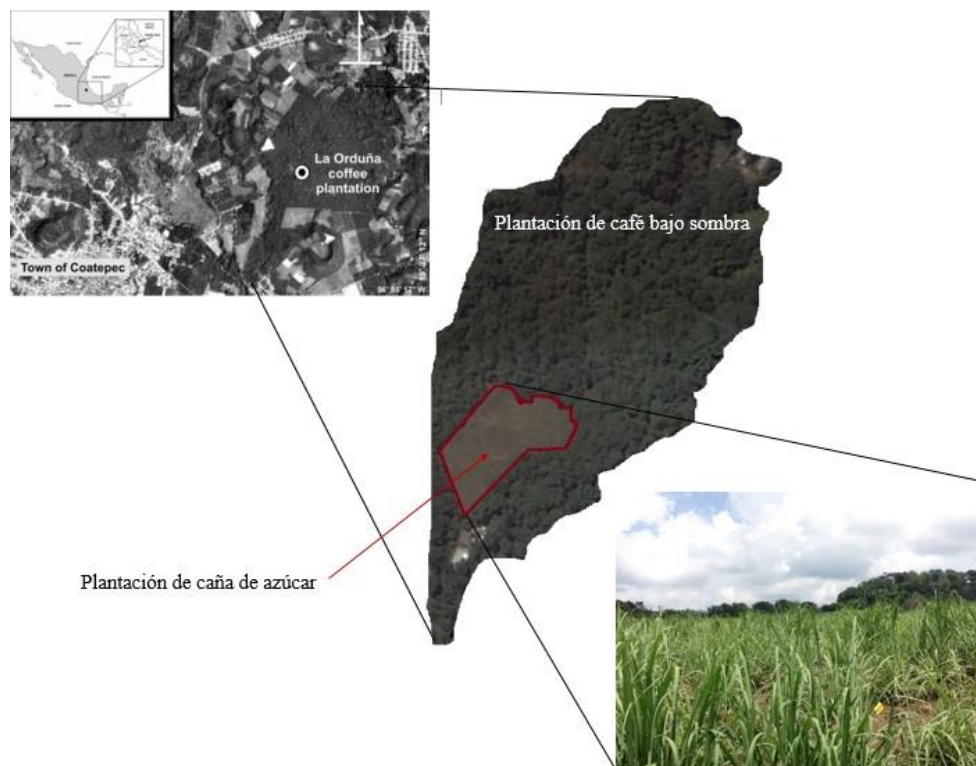


Figura 5. Ubicación de plantación de café bajo sombra y caña de azúcar.  
Fuente: Holwerda *et al.* (2013) e imagen del Google Earth (2016).

### 3.2.3 Plantación de caña de azúcar

La plantación de caña de azúcar se encuentra a un costado del cafetal (Figura 5). Se trata de un monocultivo de caña de azúcar que comprende un área aproximada de 9 ha. La unidad edáfica dominante en las plantaciones de café bajo sombra y caña de azúcar pertenece a un Andosol de tipo ferralítico (Meza y Geissert, 2007). Durante la temporada seca-cálida la altura que presenta la caña de azúcar es de aproximadamente 20 cm con un tono verde opaco. En la temporada de lluvias la caña de azúcar presenta una altura aproximada de 1 a 1.2 m, mientras que en la temporada seca-fría la caña de azúcar alcanza una altura máxima de 1.7 a 2.5 m (Holwerda *et al.*, 2013). Se realizan prácticas de quema y labranza una vez al año como parte de su manejo.

### 3.3 Muestreo de suelo

En la primera visita a campo (abril 2014) se realizó un reconocimiento y descripción de los sitios, así también se elaboró el diseño experimental, el cual consistió en determinar un transecto de muestreo de 30 m de longitud con dirección este-oeste, sobre terreno plano o bien con ligera pendiente (0 a 3°) en cada sitio investigado.

Durante la segunda visita a campo (julio 2014), mediante barrenaciones se determinaron las propiedades edáficas en los sitios de estudio (*e.g.* número de horizontes, profundidad, textura, estructura y estabilidad de agregados) al comienzo, mitad y final del transecto, es decir, a los 0, 15 y 30 m de distancia. Para ello se utilizó un manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo (Siebe *et al.*, 2006) con la intención de tener una primera evaluación cualitativa *in situ* de los sitios de estudio. Cabe señalar que la profundidad máxima a la cual se barrenó en los tres sitios de estudio fue de aproximadamente 16 cm, debido a que en promedio, esta profundidad caracterizaba el horizonte superficial.

Posteriormente, cada transecto de muestreo fue dividido en segmentos de 2 m (Figura 6). En cada punto (16 puntos en total por sitio), se colectó una muestra de suelo en superficie (a 5 cm) utilizando anillos de acero inoxidable de 5x5 cm y de 5x1 cm para determinar, respectivamente, la densidad aparente y constantes de humedad (punto de marchitez y capacidad de campo). Para la densidad aparente se utilizaron pruebas de secado, es decir, cada muestra se secó en estufa a 110°C durante 24 horas o hasta que el peso era constante. Para determinar el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo, las muestras fueron saturadas y se aplicó una tensión específica mediante ollas y membranas de presión, -1500 kPa para punto de marchitez

permanente, y -33 kPa para capacidad de campo. Todos estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Ecología, A.C. (INECOL), Xalapa, Ver.

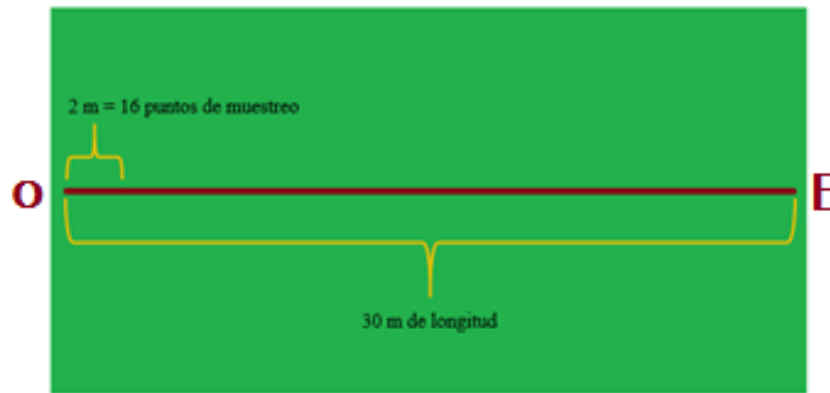


Figura 6. Línea de muestreo.

Para las plantaciones de café bajo sombra y caña de azúcar, se llevó a cabo una caracterización de los puntos muestreados. De tal manera que en la plantación de café se identificaron tres condiciones de cobertura vegetal. La primera de ellas donde el suelo no tenía vegetación y se consideró como parte de veredas (*suelo compactado*), la segunda condición fue donde el punto de muestreo se encontró bajo un arbusto de café (*cafeto*) y en la tercera condición el punto se localizó a un costado de un arbusto de café y un árbol de sombra (*cafeto + árbol*). Mientras que en la plantación de caña de azúcar se determinaron dos condiciones. Donde había una cuneta en la tierra hecha por el arado, en la cual no había vegetación (*surco*) y donde la vegetación estaba presente (*no surco*).

### 3.4 Infiltración y cálculo de la conductividad hidráulica saturada

En cada sitio estudiado se realizaron ensayos de infiltración en los 16 puntos de muestreo utilizando infiltrómetros portátiles de carga constante y anillo sencillo (IPCCAS).

El IPCCAS es un instrumento constituido por tres componentes: el primero es el tubo de Mariotte, con un diámetro de 63.5 mm, tiene adherida una regla graduada en milímetros y funciona como reservorio principal de agua, está sellado en ambos extremos con dos tapones de goma de número 12. En el interior del Mariotte, se encuentra el tubo de burbujeo con un diámetro de 9.0 mm, el cual sobresale por una apertura del tapón superior. Ambos tubos son de Plexiglas o Perspex (polimetil-metacrilato). En la parte inferior del tubo de Mariotte está

conectada una manguera con una válvula de paso. El segundo componente es un anillo de acero inoxidable que tiene un diámetro de 170 mm y 60 mm de profundidad con una tapa hermética y una campana hembra que se conecta con la llave de paso, un tubo de purga soldado herméticamente y un mango de inserción que permite montar y desmontar fácilmente el anillo. En el tubo de purga se inserta un trozo de manguera de PVC transparente de 12 mm de diámetro y 200 mm longitud que sirve para medir la carga hidráulica aplicada. La tercera parte es la base de soporte del tubo de Mariotte, que se compone de una base en forma de disco y la caña de inserción, ambos son de PVC, representado en la Figura 7 (Gómez-Tagle *et al.*, 2008).

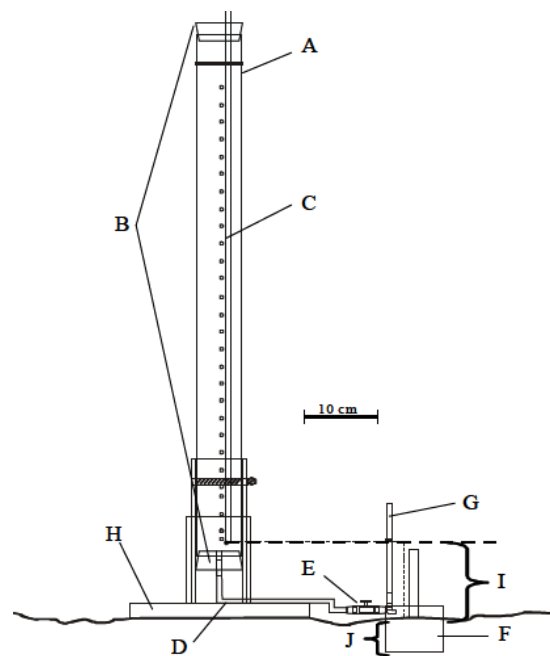


Figura 7. Componentes de un IPCCAS. A) Reservorio principal; B) tapones de goma; C) tubo de burbujeo; D) tubo de salida da agua; E) válvula de paso; F) anillo sencillo; G) tubo de purga y medición de la carga hidráulica; H) base de soporte; I) carga hidráulica constante y J) profundidad de inserción del anillo.

Fuente: Gómez-Tagle *et al.*, (2008).

Los ensayos de infiltración se hicieron sobre cada punto de muestreo con varias recargas hasta alcanzar un flujo constante en el bosque mesófilo y las plantaciones de café y caña. Se usó agua potable proveniente de la toma municipal o del INECOL según el caso. El equipo de infiltración se instaló sobre el horizonte orgánico (O) con ayuda de estacas, lo que permitió mantener estable el dispositivo en los sitios con pendiente. Sin embargo, fue necesario retirar el mantillo del horizonte orgánico para facilitar la inserción del anillo. Cuando fue necesario, las raíces superficiales fueron retiradas cuidadosamente sin alterar la estructura del suelo. Utilizando un martillo de goma, el anillo se insertó 50 mm en el suelo y el reservorio principal se llenó con agua hasta los 820 mm. Al realizar los ensayos de infiltración se abrió la válvula de paso y se registró la disminución de la columna de agua marcada en la regla graduada del Mariotte y la medición de la carga hidráulica (Figura 8), a la par se anotó el tiempo en el que ocurría el descenso de la columna de agua hasta alcanzar un gasto estable, indicativo de la fase estacionaria.



Figura 8. Realización de los ensayos de infiltración.

La infiltración medida con el IPCCAS se representa gráficamente como tiempo versus infiltración acumulada, en dos fases. La primera de ellas se denomina transitoria (sucesión de puntos con rápido cambio de pendiente), dominada por el componente capilar del suelo, y la segunda fase llamada estacionaria (línea recta) controlada por el componente gravitacional y la  $K_{fs}$  (Elrick y Reynolds, 1992). Otra forma de representación es el tiempo contra la infiltración instantánea o tasa de infiltración reportada como lámina/tiempo. En la Figura 9 se muestra ambas formas de representar la infiltración como una función del tiempo.

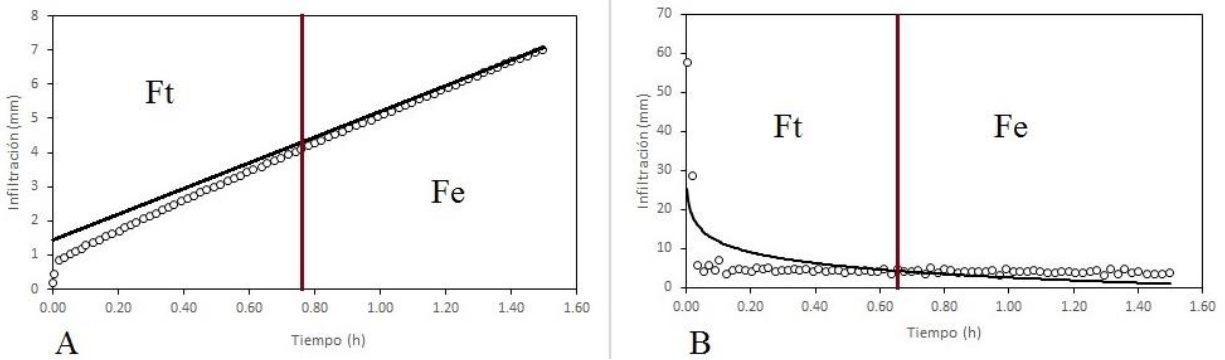


Figura 9. A) Infiltración acumulada (eje “y”) contra tiempo (eje “x”). B) Infiltración instantánea (eje “y”) contra tiempo (eje “x”). Se diferencian dos fases: la fase transitoria (Ft) o de humectación con flujo no estacionario y la fase estacionaria (Fe).

El método que se aplicó para determinar la  $K_{fs}$  es el método Wu2, que utiliza datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (tiempo versus lámina acumulada) obtenida mediante los ensayos de infiltración. La solución al método Wu2 adopta la siguiente forma:

$$K_{fs} = A/(af) \quad [1]$$

donde  $K_{fs}$  es la conductividad hidráulica saturada en campo,  $A$  es la pendiente de la recta obtenida por la regresión de mínimos cuadrados (tiempo versus lámina acumulada),  $a$  es el intercepto de la ecuación generalizada obtenida por Wu *et al.* (1999), y el parámetro  $f$  se define, a su vez, como:

$$f = \{[h+(1/a^x)]/G^x\}+1 \quad [2]$$

donde  $h$  es la carga hidráulica,  $a^x$  representa el componente capilar de suelo (Elrick y Reynolds, 1992) de acuerdo a su textura, y  $G^x$  el factor de forma, definido como:

$$G^x = d+(r/2) \quad [3]$$

donde  $d$  es la profundidad de inserción del anillo (5 cm) y  $r$  es el radio del anillo (7.62 cm).

### 3.5 Análisis de correlación y estadísticos

Se utilizó estadística básica (valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar, mediana y coeficiente de variación) para conocer la distribución de los datos de  $K_{fs}$  y de las propiedades hidrofísicas (densidad aparente, porcentaje de humedad inicial, capacidad de campo, punto de marchitez y agua aprovechable para las plantas) estudiadas por cada tipo de cobertura vegetal.

Posteriormente, los valores de  $K_{fs}$  fueron correlacionados mediante curvas de regresión con cada una de las propiedades hidrofísicas mencionadas, en conjunto y por cobertura vegetal; a partir de ello, se identificó la variable que más explicó la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación.

Se compararon entre sitios los datos de la  $K_{fs}$  y de las propiedades hidrofísicas antes mencionadas para evaluar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre coberturas vegetales. Para ello se corrieron pruebas det en el programa SigmaPlot v.13 (Systat Software Inc). Dependiendo de la normalidad de los datos se utilizaron pruebas paramétricas (Shapiro-Wilk y varianzas iguales), o bien pruebas no paramétricas (Mann-Whitney Rank Sum). Cabe resaltar que todas las pruebas estadísticas se evaluaron a un nivel de confianza de 0.05.

Después, con la caracterización realizada sobre los puntos muestreados en las plantaciones de café bajo sombra y caña de azúcar se compararon los valores de la  $K_{fs}$  y determinó si existe una relación entre las condiciones de cada punto con la  $K_{fs}$  mediante pruebas det anteriormente mencionadas.

### 3.6 Relación entre los valores de $K_{fs}$ y la precipitación

Utilizando un pluviómetro de balancín con resolución de 0.1 mm por golpe (TR-525M, Texas Electronics EUA) se colectaron datos de precipitación de forma continua en dos estaciones meteorológicas (INECOL y La Orduña) instaladas por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, cerca o directamente en las coberturas estudiadas. El periodo de estudio abarcó de enero a diciembre de 2014.

Los datos de las dos series fueron reordenados a intervalos de 10, 30 y 60 minutos. La precipitación fue estudiada a nivel de eventos por lo que fue necesario determinar cada uno de ellos en ambas series. Si la precipitación registrada fue mayor o igual a 0.1 mm y de manera ininterrumpida se consideró como un evento de precipitación. De esta manera, en ambas series se calculó el número de eventos de precipitación y posteriormente se calculó la cantidad y la duración de la lluvia, así como la intensidad promedio y máxima a las distintas resoluciones.

Finalmente, con el objetivo de analizar qué coberturas vegetales son más propensas a generar escurrimiento superficial, y consecuentemente vulnerables a erosionarse, se compararon los valores de la  $K_{fs}$  del bosque mesófilo con las intensidades promedio y máximas de la lluvia calculadas a intervalos de 10, 30 y 60 minutos con datos colectados en el INECOL, mientras que los valores de la  $K_{fs}$  de las plantaciones de café y caña fueron comparados con las intensidades promedio y máximas calculadas con las resoluciones antes mencionadas de datos de La Orduña.



## 4. Resultados

### 4.1 Características edáficas *in situ*

Se realizó una descripción de las características edáficas *in situ* del suelo (número de horizontes, profundidad, textura, estructura y estabilidad de los agregados) al inicio, a la mitad (15 m) y al final (30 m) del transecto seleccionado en cada uno de los sitios estudiados. Como muestra en la Tabla 1, se identificaron 2 horizontes. El horizonte orgánico (O) producto de la acumulación de materiales orgánicos depositados en la superficie y el horizonte A que muestra la acumulación de materia orgánica ya humificada. A su vez, en el horizonte A se identificaron 2 subhorizontes A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> que dependiendo del sitio de estudio se observaron características diferentes.

La plantación de caña de azúcar no presentó un horizonte de acumulación de materiales orgánicos sobre la superficie. Sin embargo, el horizonte A presentó dos condiciones relevantes. A<sub>1</sub> mostró en promedio una profundidad de 5 cm, con textura dominante arcillo arenosa (RA), con una estructura disturbada en terrones y una estabilidad de agregados muy baja. Lo que significa un subhorizonte perturbado por el arado u otras labranzas. Por otro lado, en el subhorizonte A<sub>2</sub> se observó una textura arcillo limosa (RL) con estructura disturbada en terrones y una baja estabilidad de los agregados del suelo a una profundidad de hasta 11 cm.

En la plantación de café el horizonte orgánico mostró una textura arcillo limosa (RL) sin tomar en cuenta los residuos orgánicos (hojarasca), con una estructura angular en bloques y una estabilidad mediana de los agregados del suelo. Mientras que el horizonte A obtuvo una textura arcillosa (R) con una estructura angular en bloques y una moderada estabilidad de los agregados del suelo.

El bosque mesófilo presentó el horizonte orgánico con la mayor profundidad (6 cm), con textura dominante arcillo limosa (RL) sin considerar la hojarasca, con presencia de algunos granos de arena y una estabilidad muy alta de los agregados. Asimismo, en el horizonte A se observó una textura arcillosa (R) con estructura angular en bloques y alta estabilidad de los agregados del suelo a una profundidad de 10 cm.

Estas características *in situ* mostraron de manera cualitativa que la plantación de caña presentó la más baja estabilidad de los agregados naturales del suelo y una muy mala estructura del mismo.

Tabla 1. Propiedades edáficas *in situ* de los sitios de estudiados.

<b>Caña</b>				
Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Estructura	Estabilidad de los agregados
A <sub>1</sub>	0-5	RA	Disturbado en terrones	Muy baja
A <sub>2</sub>	5-16	RL	Disturbado en terrones	Baja
<b>Café</b>				
Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Estructura	Estabilidad de los agregados
O	0-3	RL	Angular en bloques	Mediana
A	3-16	R	Angular en bloques	Moderada
<b>Bosque</b>				
Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Estructura	Estabilidad de los agregados
O	0-6	RL	Angular en bloques	Muy alta
A	6-16	R	Angular en bloques	Alta
RA: arcillo arenosa. RL: arcillo limosa. R: arcillosa.				

#### 4.2 Propiedades hidrofísicas del suelo

Para cada punto de muestreo se determinó la densidad aparente ( $D_a$ ;  $g/cm^3$ ), el contenido de humedad inicial ( $H$ ; %v/v), el contenido de humedad a capacidad de campo ( $CC$ ; %v/v) y al punto de marchitez permanente ( $PMP$ ; %v/v). De la diferencia entre los valores de  $CC$  y  $PMP$ , se obtuvo el contenido de agua aprovechable para las plantas ( $AAPP$ ; %v/v). La Tabla 2 muestra los estadísticos básicos (promedio, desviación estándar, mediana, mínimo, máximo y coeficiente de variación) que se obtuvieron para cada variable y para cada tipo de vegetación. Cabe mencionar que un punto de muestreo en el cultivo de caña de azúcar presentó un comportamiento anómalo comparado con los demás puntos, por tanto se tomó la decisión de no tomar en cuenta este dato.

#### 4.2.1 Densidad aparente

El valor promedio de densidad aparente fue de  $1.0 \text{ g/cm}^3$  para la plantación de caña,  $0.9 \text{ g/cm}^3$  para la plantación de café y  $0.7 \text{ g/cm}^3$  en el bosque, siendo éste último el que reportó el valor más bajo ( $0.6 \text{ g/cm}^3$ ); sin embargo, la desviación estándar fue similar para los tres sitios estudiados (Tabla 2).

#### 4.2.2 Humedad inicial y constantes de humedad

El contenido de humedad inicial promedio más alto se observó en el bosque (66.4%), seguido por la plantación de caña (50.8%) y por la plantación de café (46.9%). Sin embargo la plantación de caña mostró la mayor variación (36.7%) comparado con el bosque (9.2%) y la plantación de café (5.8%).

Las plantaciones de caña y de café presentaron bajos contenidos de humedad a capacidad de campo con valores promedio de 37.7 % y 48.9%, respectivamente. El bosque reportó el valor promedio más alto (84.6%), y una capacidad de campo muy por encima de las dos plantaciones. Sin embargo, fue el bosque el que mostró una mayor dispersión (0.3%) con respecto a las plantaciones de café (0.1%) y caña (0.1%).

El bosque mostró el rango más amplio (49.5 – 114.6%) de contenido de humedad al punto de marchitez permanente comparado con la plantación de café (34.9 – 55.6%) y caña (26.4 – 33.1%). Asimismo, el bosque tuvo el valor promedio más alto (72.4%) de punto de marchitez permanente, seguido por plantación de café (41.8%) y la plantación de caña (29.8%).

El mayor contenido de agua aprovechable para las plantas se encontró en el bosque con un valor promedio de 12.2%, mientras que las plantaciones de caña y café mostraron valores muy similares (7.9 y 7.1%).

También, fue el bosque el que presentó la mayor variación (6.5%) en contraste con las plantaciones de café (1.8%) y caña (1.5%). Lo cual demuestra que de las tres coberturas vegetales, el bosque es el que alberga el mayor contenido de agua aprovechable para las plantas.

Tabla 2. Valores de densidad aparente (Da), contenido de humedad inicial (H), humedad a capacidad de campo (CC), humedad al punto de marchitez permanente (PMP) y el agua aprovechable para las plantas (AAPP).

<b>Caña (n=15)</b>					
	Da (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	CC (%H)	PMP (%H)	AAPP (%H)
Prom.	1.0	50.8	37.7	29.8	7.9
$\sigma$	0.1	36.7	2.2	1.7	1.5
Mediana	1.0	37.2	37.9	29.9	8.2
Mín.	0.9	32.4	32.9	26.4	3.3
Máx.	1.1	142.9	41.4	33.1	9.6
Cv	0.1	0.7	0.1	0.1	0.2
<b>Café (n=16)</b>					
	Da (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	CC (%H)	PMP (%H)	AAPP (%H)
Prom.	0.9	46.9	48.9	41.8	7.1
$\sigma$	0.1	5.8	6.8	6.3	1.8
Mediana	0.9	45.5	46.6	39.4	7.3
Mín.	0.8	40.3	40.5	34.9	3.4
Máx.	1.1	61.2	61.9	55.6	10.2
Cv	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
<b>Bosque (n=16)</b>					
	Da (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	CC (%H)	PMP (%H)	AAPP (%H)
Prom.	0.7	66.4	84.6	72.4	12.2
$\sigma$	0.1	9.2	22.3	18.7	6.5
Mediana	0.7	61.5	81.9	71.3	10.7
Mín.	0.6	55.9	58.8	49.5	2.5
Máx.	0.9	80.9	133.8	114.6	27.7
Cv	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5
H: humedad inicial. Da: densidad aparente. CC: capacidad de campo. PMP: punto de marchitez permanente. AAPP: agua aprovechable para las plantas Prom: promedio. $\sigma$ : desviación estándar. Mediana. Mín: mínimo. Máx: máximo. Cv: coeficiente de variación. n: número de muestras.					

#### 4.3 Infiltración y conductividad hidráulica saturada

##### 4.3.1 Infiltración

Se obtuvieron gráficas de infiltración acumulada e instantánea (Figura 10) para cada punto muestreado en las diferentes coberturas vegetales y usos de suelo (ver gráficas en el Apéndice 8.1). En las siguientes gráficas se puede observar ejemplos de la fase transitoria (Ft) y la fase

estacionaria (Fe), lo que indica que se alcanzó el flujo estable para cada caso, el cual fue necesario para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ).

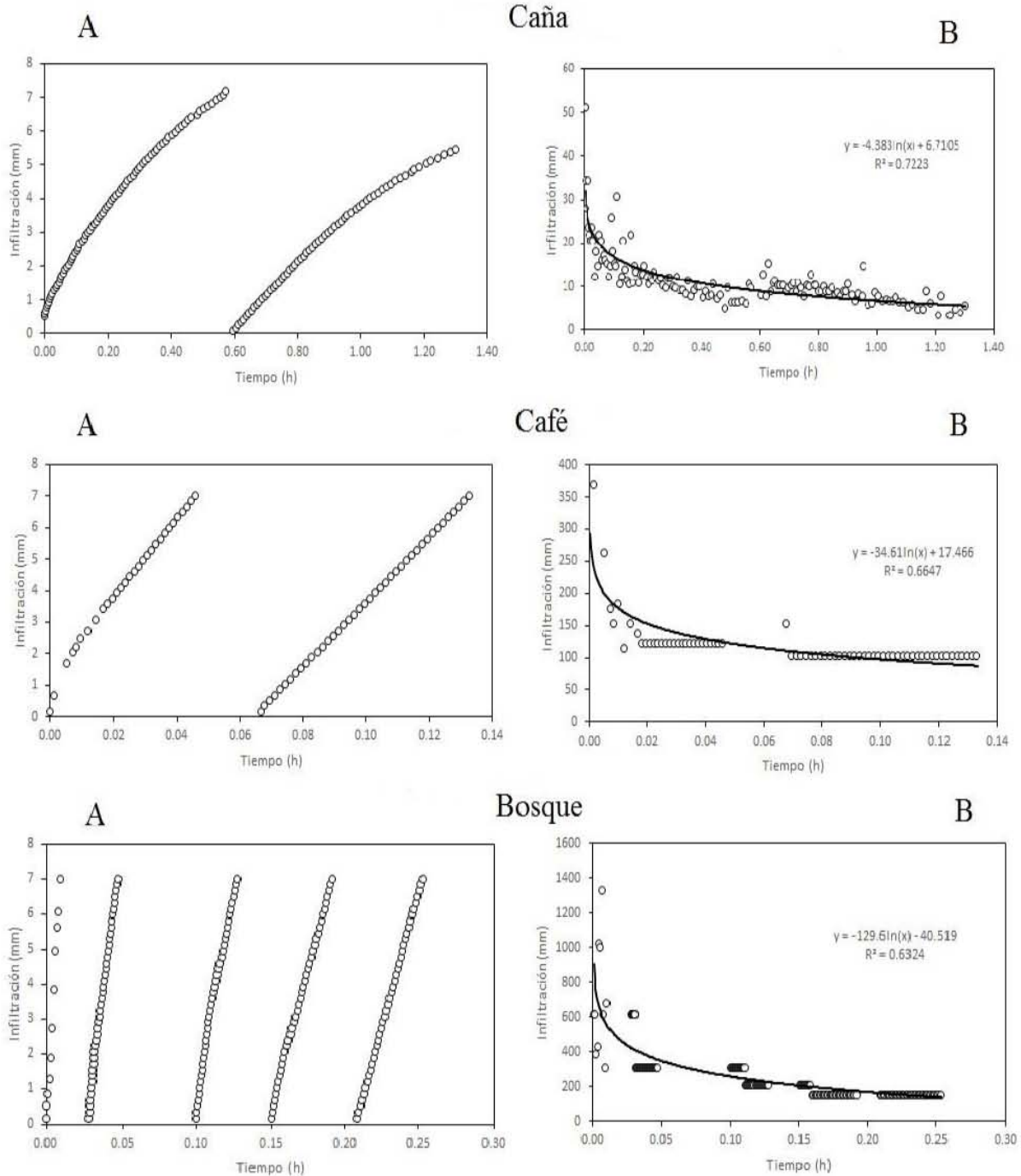


Figura 10. Curvas experimentales de infiltración A) Infiltración acumulada (eje “y”) contra tiempo (eje “x”). B) Infiltración instantánea (eje “y”) contra tiempo (eje “x”) en cada sitio estudiando.

#### 4.3.2 Conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ )

La plantación de caña mostró la menor  $K_{fs}$  con un valor de 11.4 mm/h, seguida por la plantación de café con un valor de 16.9 mm/h; mientras que el bosque fue el que registró la mayor  $K_{fs}$  con un valor promedio de 132.3 mm/h (Tabla 3). De modo que la  $K_{fs}$  de la plantación de caña fue hasta 11 y 7 veces menor que la observada en el bosque y plantación de café, respectivamente. Por otro lado, las plantaciones de caña y café presentaron una menor variabilidad en los registros (13.5 y 17.7 mm/h, respectivamente) en contraste con el bosque (44.8 mm/h). Asimismo, fue el bosque el que presentó el mayor rango en la  $K_{fs}$  con valores que fueron de 73.5 a 195.4 mm/h, seguido por las plantaciones de café (1.2 – 64.9 mm/h) y caña (0.9 – 51.2 mm/h).

Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) de los sitios estudiados.

<b><math>K_{fs}</math> (mm/h)</b>			
	<b>Caña (<math>n=15</math>)</b>	<b>Café (<math>n=16</math>)</b>	<b>Bosque (<math>n=16</math>)</b>
Prom	11.4	16.9	132.3
$\sigma$	13.5	17.7	44.8
Mediana	4.9	10.7	129.3
Mín.	0.9	1.2	73.5
Máx.	51.2	64.9	195.4
Cv	1.2	1.1	0.3
Prom: promedio. $\sigma$ : desviación estándar. Mediana. Mín: mínimo. Máx: máximo. Cv: coeficiente de variación. $n$ : el número de datos con los que se realizaron los estadísticos básicos por cada cubierta vegetal.			

4.4 Relaciones entre las propiedades hidrofísicas y la conductividad hidráulica saturada del suelo

Primeramente se correlacionaron los valores de las propiedades hidrofísicas con los de la  $K_{fs}$  mediante curvas de regresión; en este caso se utilizaron todos los resultados sin categorizar por sitios de estudio. De esta manera, las correlaciones encontradas entre variables fueron mayores o iguales a 0.4 a excepción del contenido de humedad inicial. En la Figura 11 se puede observar que la relación entre la humedad inicial y la  $K_{fs}$  (gráfica A) fue baja ( $r^2 = 0.1$ ), en contraste con la densidad aparente (gráfica B) que mostró una alta correlación ( $r^2 = 0.8$ ). Por otro lado, se observó que la relación entre la capacidad de campo y  $K_{fs}$  (gráfica C) fue similar a la del punto de marchitez permanente y  $K_{fs}$  (gráfica D) con un valor de  $r^2 = 0.7$ , mientras que el agua aprovechable para las plantas y  $K_{fs}$  mostró una correlación de  $r^2 = 0.4$ . De modo que, el contenido de humedad inicial mostró ser la variable con la menor relación con la  $K_{fs}$  y la densidad aparente la variable con mayor relación, por lo tanto, esta última podría explicar en gran medida el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación.

Posteriormente se correlacionaron las propiedades hidrofísicas con los valores de la  $K_{fs}$  por cada sitio estudiado. Los resultados mostraron que las plantaciones de caña y café en general obtuvieron relaciones menores a 0.1, es decir, correlaciones muy bajas entre sí. Sólo el bosque presentó correlaciones mayores o iguales a 0.2 entre estas variables ( $r^2 = 0.2 - 0.9$ ), a excepción del contenido de humedad inicial que mostró un valor de  $r^2 < 0.1$  (ver gráficas en el Apéndice 8.2). Es importante destacar que la correlación más alta entre las propiedades físicas y la  $K_{fs}$ , se obtuvo con la densidad aparente y para el bosque ( $r^2 = 0.9$ ).

Esto sugiere que la densidad aparente está estrechamente ligada con la infiltración del suelo, pues el bosque, al ser la cobertura vegetal menos perturbada presenta la mayor estabilidad de los agregados naturales del suelo, lo que indica una mejor estructura del mismo ocasionada por las bajas densidades que mostró.

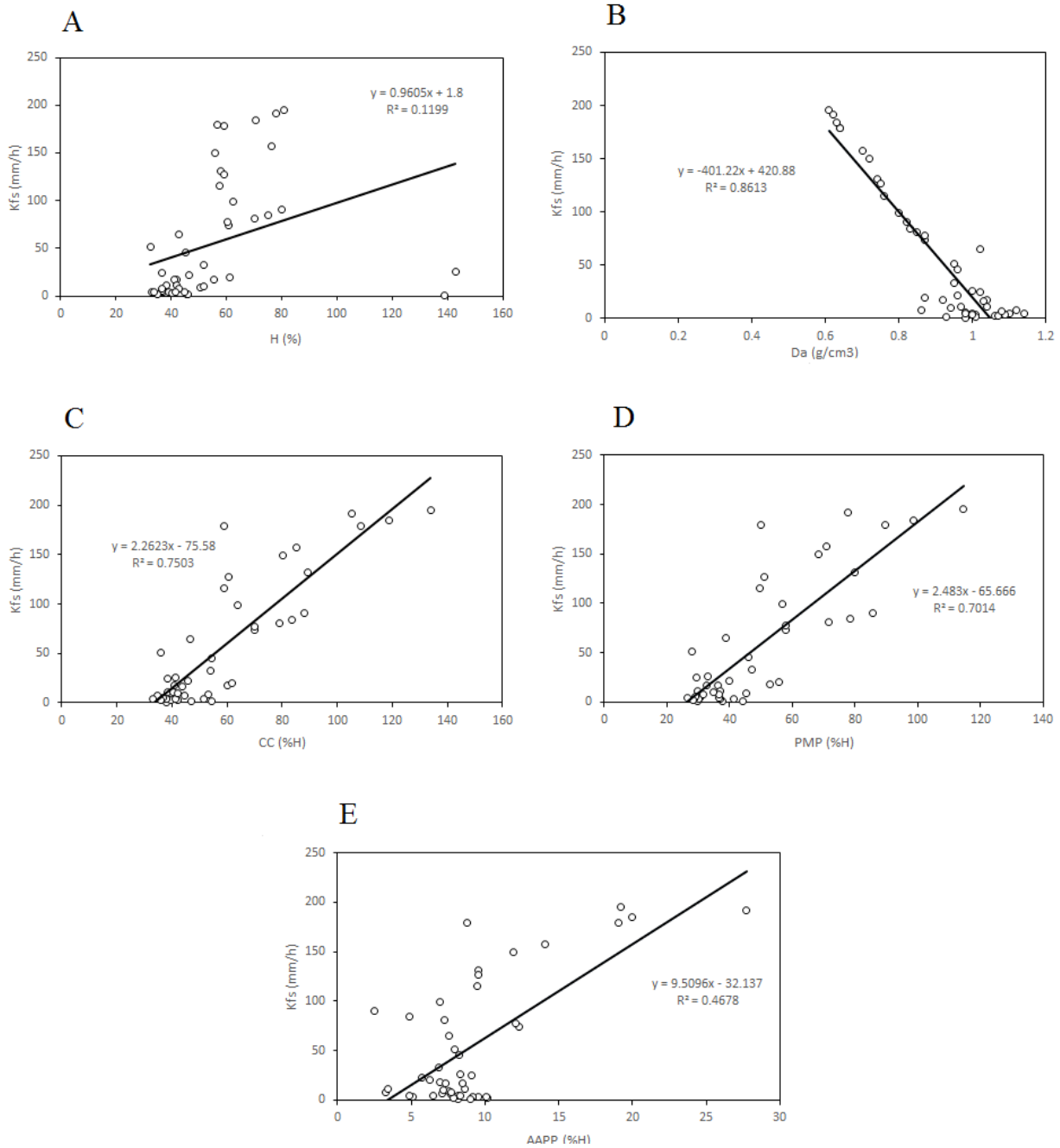


Figura 11. Gráficos de correlación entre el contenido de humedad inicial y  $K_{fs}$  (gráfica A), densidad aparente y  $K_{fs}$  (gráfica B), capacidad de campo y  $K_{fs}$  (gráfica C), punto de marchitez permanente y  $K_{fs}$  (gráfica D), agua aprovechable para las plantas y  $K_{fs}$  (gráfica E).



#### 4.5 Diferencias en las propiedades hidrofísicas del suelo por tipo de vegetación

La Tabla 4 reporta los valores promedio y desviación estándar de cada variable muestreada, por cada tipo de vegetación estudiado. Esta tabla muestra también los resultados de las diferencias entre los tipos de vegetación por cada una de las variables hidrofísicas estudiadas. Al respecto, la  $K_{fs}$  mostró ser significativamente diferente entre el bosque y la plantación de café y también con el cultivo de caña de azúcar ( $p = 0.001$ ), mientras que la  $K_{fs}$  entre la plantación de café y la de caña no mostró diferencias significativas ( $p = 0.37$ ). Para la densidad aparente, los tres tipos de vegetación mostraron ser distintos estadísticamente ( $p \leq 0.05$ ). Así también, los valores de contenido de humedad inicial, capacidad de campo y punto de marchitez permanente mostraron ser diferentes entre cubiertas vegetales ( $p \leq 0.05$ ). En el caso del agua aprovechable para las plantas, el bosque mostró ser diferente con respecto a la plantación de café y caña ( $p = 0.01$  y  $0.02$  respectivamente), mientras que los valores entre plantaciones no reportaron diferencias significativas ( $p = 0.07$ ).

Tabla 4. Valores de densidad aparente ( $D_a$ ;  $g/cm^3$ ), contenido de humedad inicial (H; %), capacidad de campo y punto de marchitez permanente (CC y PMP; %), agua aprovechable para las plantas (AAPP; %) y conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ).

	<b>Bosque</b>		<b>Café</b>		<b>Caña</b>	
	No.	Prom ( $\pm \sigma$ )	No.	Prom ( $\pm \sigma$ )	No.	Prom ( $\pm \sigma$ )
$K_{fs}$ (mm/h)	16	132.26 ( $\pm 44.77$ ) <sup>A</sup>	16	16.86 ( $\pm 17.68$ ) <sup>B</sup>	15	11.40 ( $\pm 13.49$ ) <sup>B</sup>
H (%)	16	66.35 ( $\pm 9.22$ ) <sup>A</sup>	16	46.92 ( $\pm 5.83$ ) <sup>B</sup>	15	50.78 ( $\pm 36.67$ ) <sup>C</sup>
$D_a$ ( $g/cm^3$ )	16	0.74 ( $\pm 0.09$ ) <sup>A</sup>	16	0.97 ( $\pm 0.065$ ) <sup>B</sup>	15	1.02 ( $\pm 0.059$ ) <sup>C</sup>
CC (%H)	16	84.59 ( $\pm 22.29$ ) <sup>A</sup>	16	48.88 ( $\pm 6.78$ ) <sup>B</sup>	15	37.65 ( $\pm 2.23$ ) <sup>C</sup>
PMP (%H)	16	72.38 ( $\pm 18.70$ ) <sup>A</sup>	16	41.75 ( $\pm 6.26$ ) <sup>B</sup>	15	29.76 ( $\pm 1.74$ ) <sup>C</sup>
AAPP (%H)	16	12.21 ( $\pm 6.50$ ) <sup>A</sup>	16	7.12 ( $\pm 1.82$ ) <sup>B</sup>	15	7.88 ( $\pm 1.50$ ) <sup>B</sup>

No: número de muestras. Prom: Promedio ( $\pm$  desviación estándar). Los súper índices (A, B, C) indican las diferencias entre coberturas vegetales.

De acuerdo a la caracterización que se realizó en las plantaciones de caña y café en cada uno de los puntos donde se realizaron los ensayos de infiltración se identificó si existen diferencias significativas entre la  $K_{fs}$  y las características que presentó el suelo de cada uno de los puntos. De tal manera que en la plantación de caña se evaluaron dos condiciones: *surco* y *no surco*, mientras que la plantación de café se reconocieron y evaluaron tres condiciones: *suelo compactado*, *cafeto* y *cafeto + árbol*.

La Tabla 5 muestra que la  $K_{fs}$  en las condiciones observadas de la plantación de caña (*surco* y *no surco*) no existen diferencias significativas ( $p = 0.08$ ). Por otro, lado al contrastar los valores de la  $K_{fs}$  de cada condición en la plantación de café se pudo identificar diferencias significativas entre ellas, es decir, *suelo compactado* y *cafeto* señalaron un valor de  $p = 0.001$ , lo mismo que *suelo compactado* y *cafeto + árbol*, mientras que *cafeto* y *cafeto + árbol* el  $p$  valor fue de 0.02. Lo cual muestra que las condiciones de vegetación y suelo en las que se realizaron los ensayos de infiltración en la plantación de café influyeron sobre la  $K_{fs}$ .

Tabla 5. Promedio y desviación estándar ( $\sigma$ ) de la  $K_{fs}$  en las distintas condiciones estudiadas.

<b>Caña</b>						
	Surco			No surco		
	No	Prom ( $\pm \sigma$ )		No	Prom ( $\pm \sigma$ )	
$K_{fs}$ (mm/h)	11	14.1 ( $\pm 14.9$ ) <sup>A</sup>		4	3.9 ( $\pm 2.8$ ) <sup>A</sup>	
<b>Café</b>						
	Suelo compactado		Cafeto		Cafeto + árbol	
	No	Prom ( $\pm \sigma$ )	No	Prom ( $\pm \sigma$ )	No	Prom ( $\pm \sigma$ )
$K_{fs}$ (mm/h)	5	2.7 ( $\pm 1.3$ ) <sup>A</sup>	5	10.9 ( $\pm 3.4$ ) <sup>B</sup>	6	33.7 ( $\pm 18.6$ ) <sup>C</sup>
No: número de muestras. Los superíndices (A, B, C) indican las diferencias entre coberturas vegetales.						

#### 4.6 Precipitación contra $K_{fs}$ en las coberturas vegetales estudiadas

Durante el periodo enero-diciembre de 2014 se identificaron 334 eventos de precipitación a resoluciones de 60 min en la serie INECOL y 319 eventos para la serie La Orduña. La duración de los eventos de precipitación fue de 1 hora hasta 34 horas para el INECOL, mientras que en La Orduña fue de 1 hora hasta 26 horas.

Las intensidades máximas a intervalos de 10, 30 y 60 min para la serie INECOL fueron 99.0, 69.4 y 51.2 mm/h, respectivamente. Las intensidades promedio fueron 12.5 mm/h a 10 min, 7.2 mm/h a 30 min y 2.8 mm/h a 60 min con una precipitación total de 1729 mm. La Orduña por su parte tuvo intensidades máximas de 76.2, 53.0 y 34.6 mm/h a intervalos de 10, 30 y 60 min respectivamente. Las intensidades promedio fueron 12.1 mm/h a 10 min, 6.9 mm/h a 30 min y 2.8 mm/h a 60 min, con una precipitación total de 1627 mm. En ambos casos es claro que las máximas intensidades de lluvia por hora se obtuvieron con resoluciones a 10 min. Sin embargo, hay una menor precipitación registrada en La Orduña, esto puede explicarse por la diferencia de 15 días posteriores al inicio del registro. La Tabla 6 resume las características de la precipitación en el INECOL y La Orduña.

Tabla 6. Características de los eventos de precipitación. El número de eventos ( $n$ ), precipitación total (Pt), duración (mínimo – máximo), intensidad promedio ( $I_{prom}$ ) e intensidad máxima ( $I_{max}$ ) a intervalos de 10, 30 y 60 min a nivel evento para cada serie (INECOL y La Orduña).

<b>INECOL (<math>n = 334</math>)</b>							
Duración (h)	$I_{prom10}$ (mm/h)	$I_{prom30}$ (mm/h)	$I_{prom60}$ (mm/h)	$I_{max10}$ (mm/h)	$I_{max30}$ (mm/h)	$I_{max60}$ (mm/h)	Pt (mm)
1 - 34	12.5	7.2	2.8	99.0	69.4	51.2	1729
<b>La Orduña (<math>n = 319</math>)</b>							
Duración (h)	$I_{prom10}$ (mm/h)	$I_{prom30}$ (mm/h)	$I_{prom60}$ (mm/h)	$I_{max10}$ (mm/h)	$I_{max30}$ (mm/h)	$I_{max60}$ (mm/h)	Pt (mm)
1 - 26	12.1	6.9	2.8	76.2	53.0	34.9	1627

Posteriormente, se compararon los valores de la  $K_{fs}$  de cada sitio de estudio con las intensidades máximas ( $I_{max}$ ) y promedio ( $I_{prom}$ ) calculadas en las series INECOL y La Orduña mediante gráficas de caja y bigote. De modo que la  $K_{fs}$  del bosque mesófilo se contrastó con la serie INECOL y las plantaciones de café y caña con La Orduña.

La plantación de caña mostró que las intensidades máximas de lluvia a intervalos de 10, 30 y 60 min ( $I_{max10}$ ,  $I_{max30}$  e  $I_{max60}$ ) están muy por arriba de sus valores de la conductividad hidráulica saturada (Figura 12). Las intensidades promedio a 10 y 30 min ( $I_{prom10}$  e  $I_{prom30}$ ) fueron las que se encontraron en el rango de los valores de la  $K_{fs}$ , mientras que a intensidades promedio a 60 min ( $I_{prom60}$ ) se hallaron por debajo de este rango. Por tanto, son las precipitaciones a intensidades promedio las que el suelo de la plantación de caña podría infiltrar.

En cuanto a la plantación de café, las intensidades máximas a intervalos de 10, 30 y 60 min se localizaron por encima de sus valores de  $K_{fs}$ , esto indica que el suelo de esta cobertura vegetal en condiciones de saturación no podría infiltrar la lluvia a estas intensidades (Figura 13). Por otro lado, las intensidades promedio a 10 y 30 min se ubicaron sobre el rango en donde la  $K_{fs}$  no se ve impedida, mientras que la intensidad promedio a 60 min fue la única que se observó por debajo de los valores de la  $K_{fs}$ . Por tanto, la lluvia a las intensidades promedio podría ser infiltrada en el suelo en la plantación de café.

En el bosque, las intensidades promedio a 10, 30 y 60 min se ubicaron muy debajo de los valores de la  $K_{fs}$ ; lo mismo se observó para las intensidades máximas a 30 y 60 min. Sólo la intensidad máxima a 10 min se ubicó en el rango de los valores de la  $K_{fs}$  (Figura 14). En este sentido el bosque muestra gran capacidad de infiltrar eventos de lluvia a las intensidades máximas y promedio observadas.

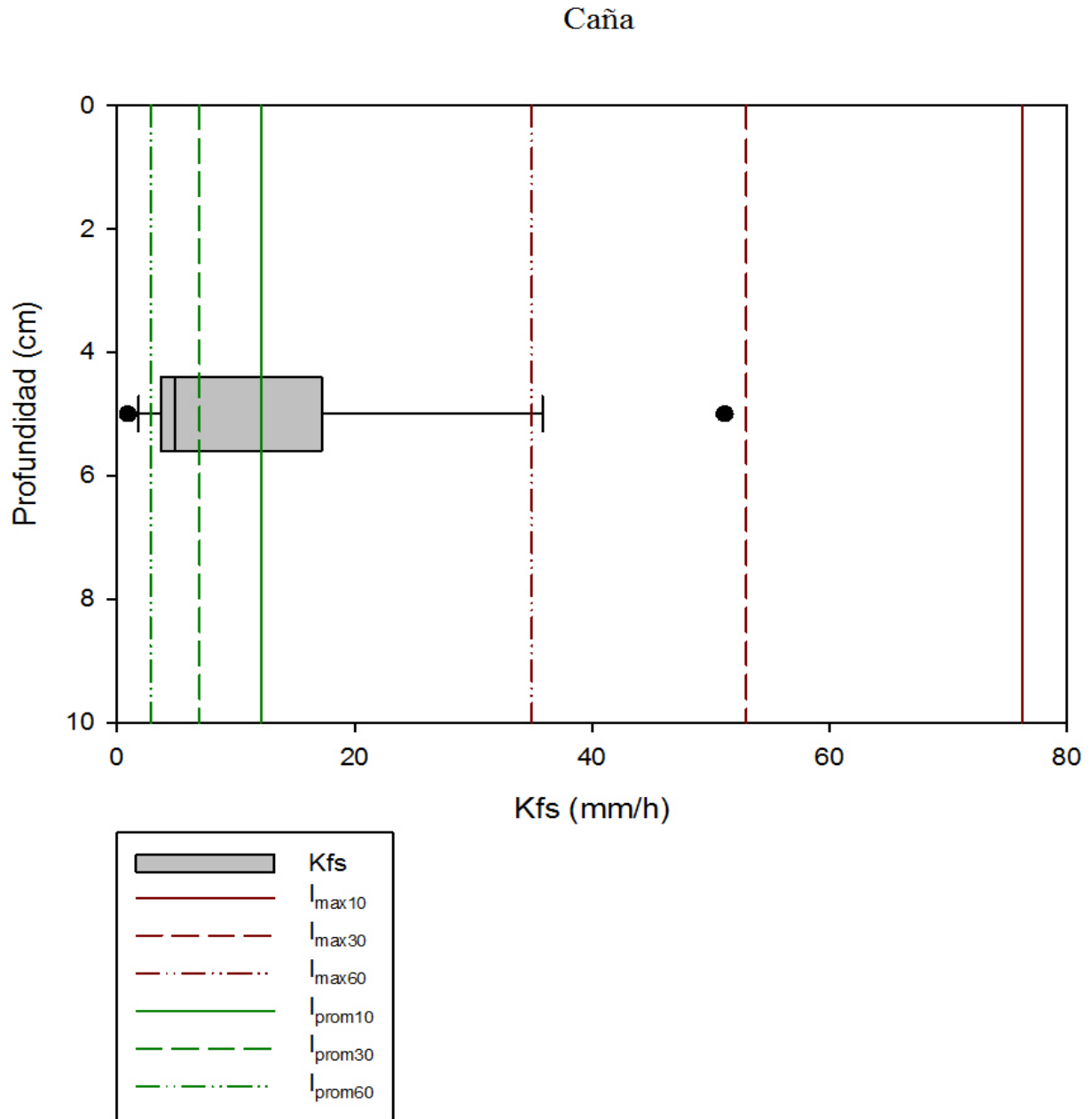


Figura 12. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la  $K_{fs}$  en la plantación de caña de azúcar.

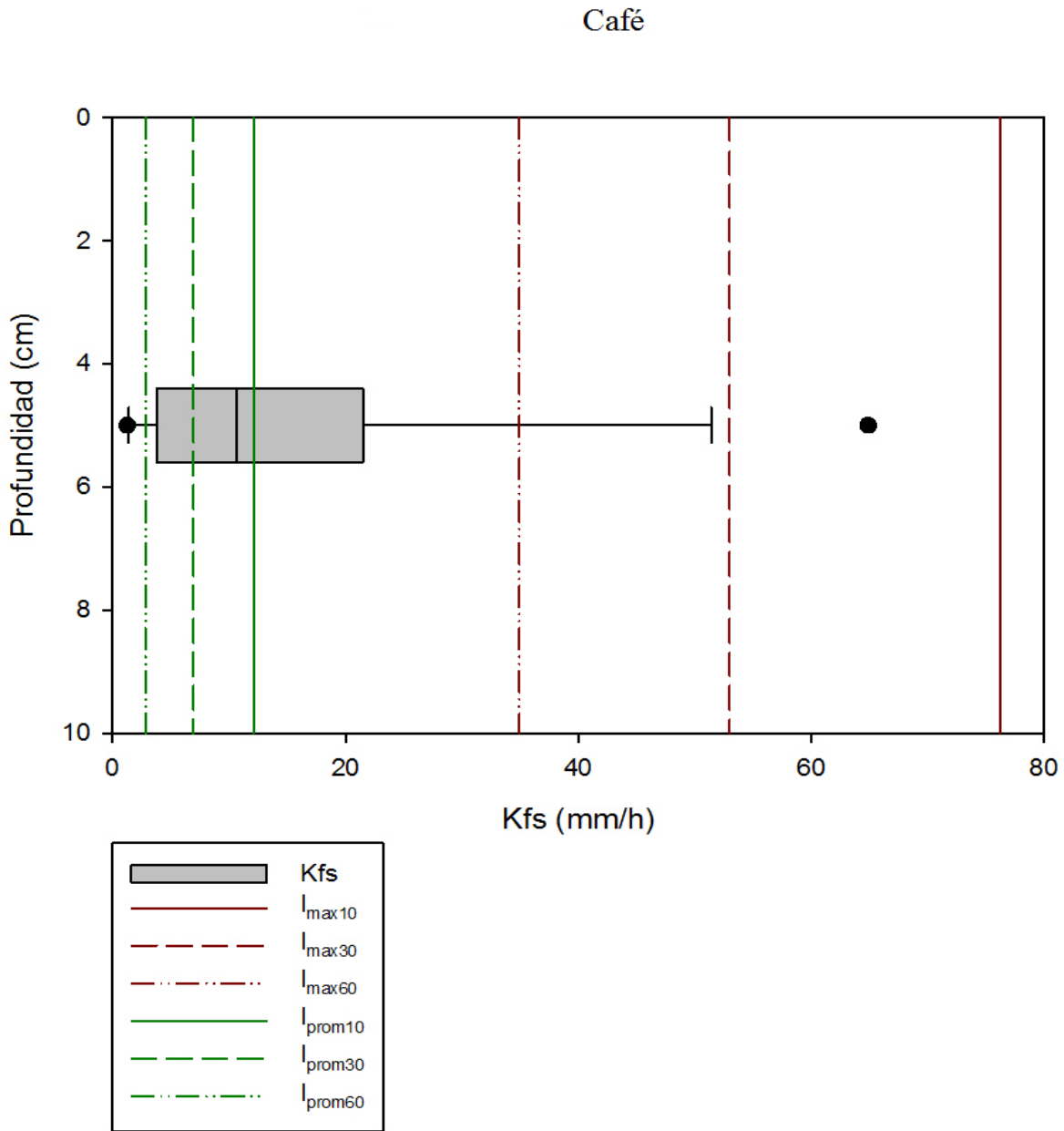


Figura 13. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la  $K_{fs}$  en la plantación de café bajo sombra.

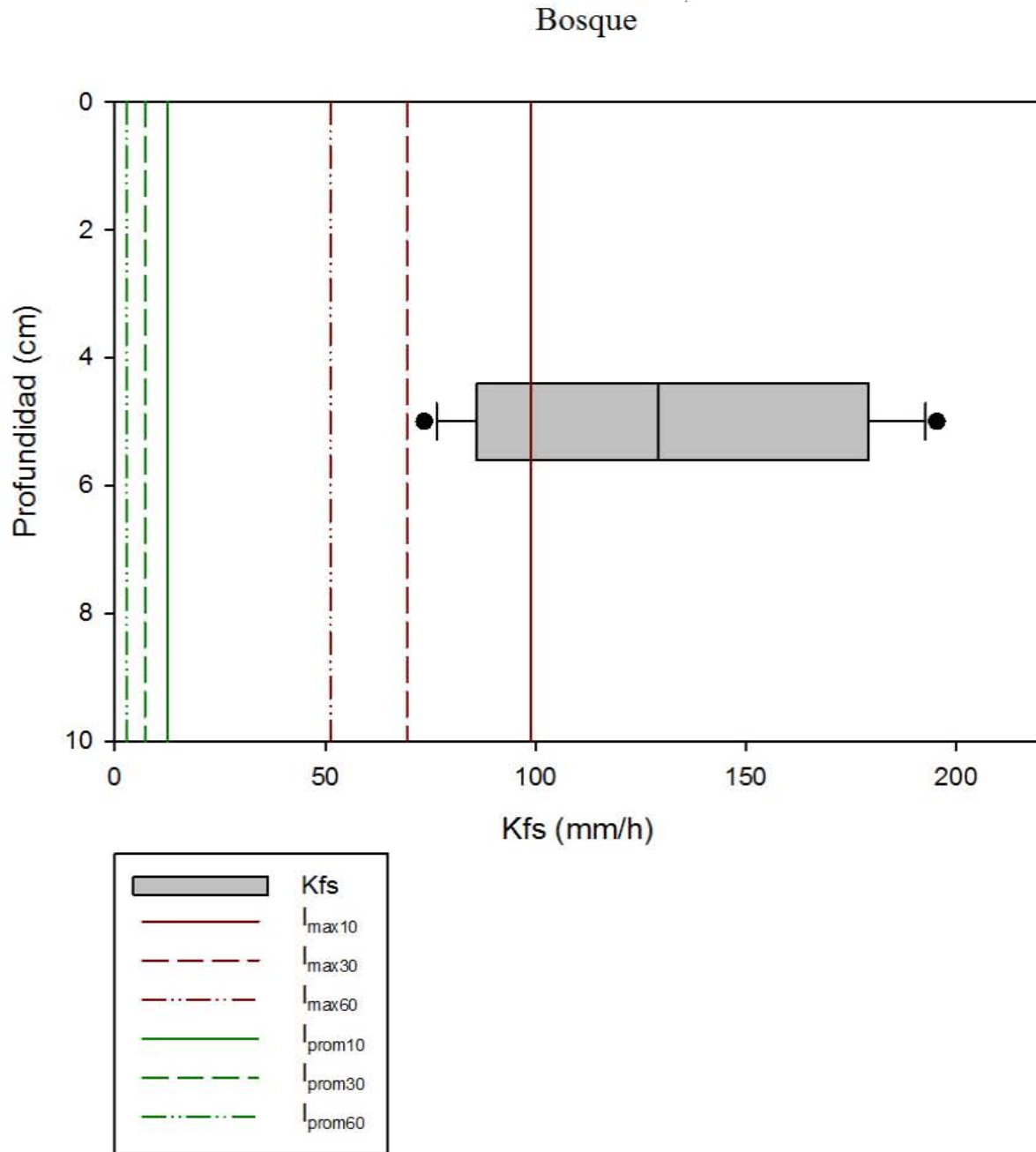


Figura 14. Intensidades máximas y promedio de la precipitación y la  $K_{fs}$  en el bosque mesófilo de montaña.

## 5. Discusión

### 5.1 Impactos del cambio en el uso de suelo sobre la conductividad hidráulica saturada

La importancia de los bosques radica en los servicios ambientales que brindan a la sociedad. Específicamente el bosque mesófilo de montaña tiene un papel importante en la regulación de los flujos hidrológicos como consecuencia de su gran capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo (Williams-Linera, 2007). Pese a esto, se estima que en México alrededor del 50% de estos bosques han sido sustituidos por otros tipos de vegetación y usos de tierra (Toledo-Aceves *et al.*, 2011). Los suelos de estos bosques son generalmente de origen volcánico y a diferencia de otros suelos se caracterizan por su alta capacidad de retención de humedad y almacenamiento de agua, lo cual a su vez determina la dinámica del agua a nivel superficial y subsuperficial (Tobón *et al.*, 2000; Tobón *et al.*, 2010; Gonzáles-Barrios *et al.*, 2011).

En el presente trabajo se encontró que la conductividad hidráulica saturada en las plantaciones de café bajo sombra y caña de azúcar en la capa superficial del suelo fueron significativamente más bajas comparadas con las del bosque mesófilo. A pesar de que las plantaciones y bosque estudiados no comparten la misma unidad edáfica, los suelos de los tres sitios en sus primeros 10 cm se caracterizan por tener como textura dominante la arcilla (~60% en las plantaciones, y 70% en el bosque; Arreola-Flores, 2016; D. Geissert *com. pers.*), reduciéndose así la posible influencia del tipo de suelo sobre el proceso de infiltración. En este respecto, son muy escasos los estudios mineralógicos y de infiltración, lo cual sin duda representa un vacío importante de información.

Por otra parte, se encontró que los valores de la conductividad hidráulica entre plantaciones no fueron distintos, a pesar de sus diferencias en el tipo de vegetación, uso y manejo del suelo. En esta región, específicamente en el límite superior de distribución del bosque mesófilo, el trabajo de Marín-Castro (2010) mostró también altos valores de conductividad hidráulica en bosques maduro ( $446.96 \pm 930.61$  mm/h; promedio  $\pm \sigma$ ) y secundario ( $268.25 \pm 690.31$  mm/h), comparado con un pastizal ( $0.23 \pm 0.35$  mm/h); en el presente trabajo los valores encontrados en la plantación de caña de azúcar fueron similares a los del pastizal.

Estudios en otras regiones han mostrado que la disminución de la conductividad hidráulica saturada en la capa superficial del suelo está influenciada fuertemente por el cambio en el uso de suelo. Al respecto, Oyarzún *et al.* (2011) comparó las tasas de infiltración en los primeros 30 cm



del suelo en un bosque natural siempre verde y en una plantación de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en suelos derivados de cenizas volcánicas en la cordillera sur de Chile. Sus resultados mostraron mayores infiltraciones en el bosque ( $703.3 \pm 380$  mm/h; promedio  $\pm \sigma$ ) comparado con la plantación forestal ( $23.0 \pm 19.7$  mm/h). La enorme disminución de la infiltración en la plantación fue atribuida a alteraciones y/o deformaciones en la estructura del suelo, debido específicamente a la historia de uso del suelo.

Otros estudios han mostrado que las reducciones en la conductividad hidráulica saturada del suelo, como consecuencia del cambio en el uso de suelo, pueden atenuarse con el aumento en profundidad del suelo. Por ejemplo, la investigación de Tobón *et al.* (2010) al norte de Costa Rica midió la conductividad hidráulica saturada utilizando tres instrumentos (permeámetro de Guelph, infiltrómetro de tensión y método del núcleo) en un bosque de niebla, en un pastizal y en un sendero donde transitaba ganado, caracterizados por suelos de origen volcánico (Andisoles), específicamente *typic Hapludands* y *typic Hydrudands* (Soil Taxonomy, 2014). Sus resultados mostraron que la conductividad hidráulica a nivel superficie (10 cm de profundidad) fue bastante alta ( $714 \pm 0.1$  mm/h; promedio  $\pm \sigma$ ) en el bosque de niebla comparada con los demás sitios ( $240 \pm 0.1$  y  $32 \pm 0.1$  mm/h). Los autores también observaron que la permeabilidad del suelo disminuyó conforme aumentaba la profundidad, notando que los cambios más drásticos se llevan a cabo sobre la superficie, es decir, en los primeros horizontes del suelo. Por otro lado, al contrastar los valores de conductividad hidráulica del pastizal y el sendero a las distintas profundidades, notaron que no había diferencias entre estos dos sitios.

Por otra parte, Bonell *et al.* (2010) estudiaron la conductividad hidráulica en un bosque natural, un bosque perturbado y en tres plantaciones (*Acacia ariculiformes*, *Tectona grandis* y *Casuarina equisetifolia*) a cuatro diferentes profundidades (0, 10, 60, 150 cm) en la región de los Ghats orientales de la India. Su investigación mostró una disminución considerable de la conductividad hidráulica a nivel superficie en las tres plantaciones, seguida por el bosque perturbado, comparado con el bosque natural. Asimismo, las diferencias más significativas se observaron en los primeros 10 cm. En el estudio de Bonell y colegas (2010), la disminución de la conductividad hidráulica es atribuida a la intensidad de uso y transformación de los bosques, y a los efectos de plantaciones monoespecíficas sobre la ecología del suelo.

Un punto importante es que la gran mayoría de la literatura disponible en estos temas, reporta comparaciones entre bosques y pastizales, o bien entre bosques y plantaciones forestales, siendo

muy escasos los estudios que han evaluado los impactos hidrológicos en el suelo asociados a la conversión de bosques por plantaciones de café bajo sombra o caña de azúcar.

## 5.2 Alteración de las propiedades hidrofísicas a causa del cambio y manejo del suelo

Las propiedades físicas de los suelos determinan la estructura, la facilidad de penetración de las raíces, aireación, textura, la capacidad de infiltración, almacenamiento de agua, retención de nutrientes (Porta-Casanellas *et al.*, 2003) y, en gran medida también, la capacidad de muchos de los usos a los que están sometidos. El cambio en el uso y manejo de la tierra imprime modificaciones en la distribución y la morfología del espacio poroso del suelo. Un cambio en la estructura implica alteraciones en la distribución por tamaño de los agregados naturales, y en consecuencia un aumento en la densidad aparente debido al pisoteo del ganado, a la frecuencia de labranza, al chapeo, entre otros (Dumbeck y Harrach, 1985). Al disminuirse la permeabilidad del sustrato edáfico, se compromete la funcionalidad hidrológica y su capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Geissert *et al.*, 2012).

En este trabajo se evaluaron algunas características edáficas *in situ* de las coberturas estudiadas a nivel superficial en el suelo. En la plantación de caña de azúcar la textura dominante fue arcillo arenosa, con muy baja estabilidad de los agregados naturales y estructura disturbada en terrones. Lo que indica una mala estructura del suelo, esto podría en parte explicar los valores más bajos de conductividad hidráulica obtenidos. Por otro lado la plantación de café mostró una textura dominante arcillo limosa, una estructura angular en bloques y una moderada estabilidad de los agregados. En este caso, los valores de conductividad hidráulica estuvieron por encima de los observados en la caña de azúcar. El bosque presentó una muy alta estabilidad de agregados lo que se traduce en una muy buena estructura entre los espacios porosos del mismo, lo que explicaría su alta conductividad hidráulica. Aunque el bosque presentó una estructura similar (angular en bloques) al de la plantación de café, la variación de la conductividad hidráulica entre estos sitios se debe muy probablemente al alto contenido de materia orgánica observado sobre la superficie del bosque.

De una manera más estricta, se determinaron mediante pruebas de laboratorio otras propiedades hidrofísicas de los sitios de estudio. Al respecto, se encontró una relación entre el aumento de la densidad aparente en el suelo y la disminución de la capacidad de infiltración, y en consecuencia en la conductividad hidráulica, lo que explicaría en parte los valores muy bajos obtenidos de

conductividad hidráulica en las plantaciones de caña y café, y valores muy altos en el bosque. La densidad aparente mostró ser significativamente diferente entre coberturas vegetales, y también demostró ser la variable que mejor explica el comportamiento de la conductividad hidráulica saturada. Al respecto, el estudio de Tobón *et al.* (2010) en suelos Andisoles al norte de Costa Rica, reportó también densidades aparentes bajas ( $0.4 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ ; promedio  $\pm \sigma$ ) y conductividades hidráulicas altas ( $714 \pm 0.1 \text{ mm/h}$ ) en la capa superficial del suelo (primeros 5 cm de profundidad) en un bosque de niebla, comparado con un pastizal ( $0.6 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$  y  $32 \pm 0.1 \text{ mm/h}$ , respectivamente).

En cuanto a las constantes de humedad, se encontró que el bosque mesófilo fue la cobertura vegetal que tuvo los contenidos de humedad a capacidad de campo más altos comparado con las plantaciones de café y caña. Esto indica que el bosque puede retener la mayor cantidad de agua en el suelo después del drenaje por efectos de gravedad. Por otra parte, la plantación de caña seguida por el café reportaron los valores promedio más bajos de humedad al punto de marchitez permanente comparado con el bosque. Lo que muestra que hay menos agua en el suelo a altas tensiones en estas plantaciones. Consecuentemente, existe una mayor humedad en el suelo aprovechable para las plantas en el bosque comparado con las otras coberturas vegetales. En esta misma región, solo que en el límite superior de distribución del bosque mesófilo en el centro de Veracruz, Castro (2012) analizó las propiedades hídricas del suelo en un bosque conservado, un bosque secundario y una plantación de *Pinus patula*. Sus resultados mostraron un mayor contenido de humedad a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente (60 y 50 %, respectivamente) en el bosque maduro seguido del bosque secundario (58 y 38 %), y menores en la plantación de pino (43 y 30 %). Al igual que Castro (2012), el presente estudio también encontró los valores más altos de humedad a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente en el bosque mesófilo de montaña.

Por otra parte, el trabajo de Tobón *et al.* (2010) mostró también mayores contenidos de agua disponible para las plantas en el bosque comparados con un pastizal. Sin embargo, su estudio reportó un valor de humedad a punto de marchitez ligeramente mayor en el pastizal con respecto al bosque, lo que en el presente estudio no se observó. Tobón y demás autores (2010) atribuyeron estas diferencias de humedad en el suelo a cambios en las distribuciones de tamaño de los poros, en particular, una disminución en el número de macroporos y su sustitución por meso y microporos, en asociación con cambios en la densidad aparente como se mencionó anteriormente

debido a la conversión del bosque de niebla por pastizales. Aunque en la presente investigación no se estudió la porosidad total y la distribución del tamaño de los poros, los resultados obtenidos sugieren mayor porosidad en el bosque mesófilo lo que a su vez podría sugerir mayor presencia de macroporos, mesoporos y microporos, es decir mayor estructura, en la capa superficial del suelo comparado con los otros tipos de vegetación estudiados.

### 5.3 Intensidad de precipitación versus conductividad hidráulica del suelo: infiriendo flujos durante eventos de lluvia

Las plantaciones de café y caña mostraron valores de conductividad hidráulica saturada muy por debajo de las intensidades máximas registradas a intervalos de 10, 30 y 60 min, mientras que las intensidades promedio a 10 y 30 min se compararon similares a los rangos de las conductividades hidráulicas obtenidas. Por lo que para estos usos de suelo, solo las intensidades promedio a 60 min se encontraron por debajo de los valores de la conductividad hidráulica a saturación. Por otro lado, el bosque mesófilo mostró conductividades hidráulicas en el suelo que estuvieron por encima de las intensidades máximas de lluvia calculadas a 30 y 60 min y las promedio a 10, 30 y 60 min; mientras que la intensidad máxima a 10 min se ubicó dentro del rango observado de valores de conductividad hidráulica. En este sentido, se puede afirmar que de las tres cubiertas vegetales estudiadas, el bosque mesófilo es el que puede infiltrar y amortiguar las precipitaciones en un amplio rango de intensidades, tanto máximas como promedio. Por el contrario, las plantaciones de café y caña presentan problemas para infiltrar lluvias de alta y moderada intensidad, por tanto estas cubiertas vegetales mostraron ser las más propensas a generar escurrimientos superficiales durante eventos de precipitación. Al respecto, Karlsen (2010) contrastó la conductividad hidráulica saturada del suelo (Andosol) de un bosque mesófilo de montaña maduro en el centro de Veracruz, México, con las intensidades máximas y promedio en intervalos de 10, 30 y 60 min observadas en este sitio. Sus resultados mostraron que para el primer horizonte, la conductividad hidráulica del suelo ( $1345 \pm 872$  mm/h; promedio  $\pm \sigma$ ) fue mayor a las intensidades de lluvia mencionados; sin embargo, con el aumento en profundidad del suelo la conductividad hidráulica se reduce ( $26 \pm 22$  mm/h y  $7.2 \pm 8.1$  mm/h) por lo que es muy probable el desarrollo de flujo lateral a profundidades mayores a los 40 cm. En este estudio no se realizaron ensayos de infiltración a diferentes profundidades en los sitios estudiados, sin embargo podría ser interesante por lo que será un tema de investigación a futuro.

## **6. Conclusiones**

La conversión del bosque mesófilo de montaña a plantaciones de café bajo sombra y caña de azúcar en el límite inferior de distribución del bosque en la región central de montaña de Veracruz, reduce fuertemente la capacidad de infiltración de agua en la capa superficial del suelo, evaluado a través del cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo.

También, se observaron aumentos en la densidad aparente y reducciones en los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez en los suelos de las plantaciones de caña de azúcar y café, comparado con los del bosque. Estos cambios en las propiedades físicas e hídricas del suelo están asociados a la conversión del bosque en monocultivos cuyas prácticas de labranza y manejo repercuten fuertemente en la estructura del suelo.

Al compararse los valores de conductividad hidráulica con las intensidades de lluvia registradas en los sitios de estudio, se observó que la plantación de caña de azúcar fue la cobertura más propensa a generar escurrimientos superficiales, y por tanto más vulnerable a erosionarse. En contraste, el bosque mostró gran potencial de infiltrar y amortiguar lluvias de moderada y alta intensidad, particularmente observadas durante la época de lluvias.

## 7. Bibliografía

- Arreola-Flores, D.P. 2016. Análisis de la dinámica del agua en un suelo de bosque de niebla de montaña baja en el centro de Veracruz. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias. INECOL, Xalapa, Veracruz. 66 pp.
- Bonell, M., Purandara, B.K., Venkatesh, B., Krishnaswamy, J., Acharya, H.A.K., Singh, U.V., Jayakumar, R., Chappell, N. 2010. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications for surface and sub-surface hydrology. *Journal of Hydrology*. 391, 48-55.
- Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 104, 186-189.
- Burt, R. (Ed.). 2004. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. 4, 700.
- Campos-Aranda, D. 1987. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. 56 pp.
- Castro A. A. 2012. Variación temporal del contenido de humedad del suelo en un bosque mesófilo de montaña en Coatepec, Veracruz. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias. INECOL, Xalapa, Ver. 46-48 pp.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro. CONABIO-Instituto de Biología, UNAM-Agrupación Sierra Madre, México. 75-81 pp.
- Crosara, A. 2004. Práctico no. 4: Estructura del suelo. Facultad de Ciencias, Uruguay. Disponible es: <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%204.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2010. *El Bosque Mesófilo de Montaña en México. Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible*. México D. F. 20 pp.

- Dane, J.H. y Topp, G.C. (Eds.). 2002. *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin. 5, 1692.
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA. Special Publication. 35 pp.
- Donado, L.D. 2004. *Modelo de conductividad hidráulica en suelos*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 16 pp.
- Donoso, C. 1992. *Ecología forestal*. Universidad Austral de Chile. Editorial Universitaria. Valdivia, Chile. 45-44 pp.
- Doumenge, C., Gilmour, D., Ruiz M.P. y Blockhus, J. 1995. *Tropical montane cloud forests: conservation status and management issues*. En: L. S. Hamilton, J.O Juvik y F.N., Scatena, eds. *Tropical Montane Cloud Forests*. Springer-Verlag, Nueva York. 24-37 pp.
- Dumbeck, G. y Harrach, T. 1985. "Porenverteilung bei Bodenverdichtungen", *Mitteilgn. Dtsch. Gesellschi.* 43, 213-218.
- Elsenbeer H., Cassel K. y Castro J. 1992. *Spatial analysis of soil hydraulic conductivity in a tropical rain forest catchment*. *Water Resources Research*. 28, 3202-3206.
- Elrick, D.E., y Reynolds, W.D. 1992. *Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters*.
- Ferrer, J.M., Estrela Monreal T., Sánchez del Corral Jiménez A. y García-Meléndez E. 2004. *Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction*. *Geoderma*. 123, 257-277.
- Fregoso, A. 2000. *La vegetación como herramienta base para la planeación, aprovechamiento y conservación de los recursos forestales: el caso de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich., México*. Tesis de Licenciatura-Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México. 57-59 pp.

- Geissert, D., Gómez-Tagle, Ch.A., Marin, B., Castro, A., Karlsen, R. y Tobon, C. 2012. Soil water dynamics of andosol soils in tropical montane cloud forest in eastern Mexico. 2nd international conference on hydrogeology. Leipzig, Germany. 22-27 Julio 2012. Póster.
- González-Barrios, J.L., Jean-Pierre V., Luc Descroix, Sánchez-Cohen I., Chávez-Ramírez E. y González Cervantes, G. 2011. Impacto del cambio de uso del suelo en la hidrodinámica superficial de una cuenca receptora de agua. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA). 8, 105-110 pp.
- Gómez-Tagle, Ch.A., Gómez-Tagle R.F.A., Batlle-Salles J., Zepeda C.H., Guevara Santamaría A.G., Maldonado L.S y Pintor A.J. 2008. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México. Terra Latinoamericana. 26, 287-297.
- Hassler, S.K., Zimmermann, B., Breugel, M., Hall, J.S. y Elsenbeer, H. 2011. Recovery of saturated hydrology conductivity under secondary succession on former pasture in the tropics. Forest Ecology and Management. 261, 1634-1640.
- Heras, R., Springall, R. y Custodio E. 2002. Manual de hidrología. Centro de Estudios hidrológicos de Madrid. 1-5 pp.
- Heuvelink, J., Tasis, J.P., Quiros-Conejo, S., Espinoza Prieto, L. 1986. Agroclimatología Tropical. Ed. Univ. Est. A Distancia, San José, Costa Rica. 378 pp.
- Hillel, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. ELSEVIER Academic Press. USA. 494 pp.
- Holwerda F., Bruijnzeel, L.A., Barradas, V.L. y Cervantes, J. 2013. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. Agricultural and Forest Meteorology. 173, 1-9.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Coatepec, Veracruz. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>



- Juo, A.S.R. y Franzluebbbers, K. 2003. Tropical soils: properties and management for sustainable agriculture. Oxford University Press: New York.
- Karlsen, H. R. 2010. Stormflow Processes in a Mature Tropical Montane Cloud Forest Catchment, Coatepec, Veracruz, Mexico. Tesis de Maestría. Posgrado en Ecohidrología. Universidad de Amsterdam. 33-38 pp.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Science* 12, 10-12.
- Lambin, E.F., Turner, Bi. L., Geist, H. J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O. T., Dirzo, Rodolfo, G., Fischer, Folke, C. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*. 4. 11, 261-263.
- Marín-Castro, B.E. 2010. Variación especial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de origen volcánico bajo tres usos de suelo en el centro de Veracruz, México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias. INECOL, Xalapa, Ver. 14-35 pp.
- Meza, E. y Geissert D. 2007. El comportamiento hidrodinámico de Andosoles con uso diferenciado en el municipio de Coatepec, estado de Veracruz, México. En Reporte técnico final del proyecto N°. INE/A1-064/2007. Instituto Nacional de Ecología / Vrije Universiteit Amsterdam/Instituto de Ecología, Xalapa, Ver. 118-130 pp.
- Muñoz-Villers, L.E. 2008. Efecto del cambio en el uso de suelo sobre la dinámica hidrológica y calidad de agua en el trópico húmedo del centro de Veracruz, México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana. 59-65 pp.
- Muñoz-Villers, L. E. y López-Blanco, J. 2008. Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*. 29, 71-93.
- Muñoz-Villers, L.E. y McDonnell, J.J. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3543-3552.

- Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 56, 156-153.
- Oyarzún, C.E., Godoy, R., Staelens, J., Donoso, P.J. y Verhoest, N. 2011. Seasonal and annual throughfall and stormflow in Andean temperate rainforests. *Hydrological Processes*. 25, 623-633.
- Perkins, D.B., Haws, N.W., Jawitz, J.W., Das, B.S., y Rao, P.S.C. 2007 Soil hydraulic properties as ecological indicators in forested watersheds impacted by mechanized military training, *Ecological Indicators*, 7, 589-597.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo M. y Roquero De Laburu C., 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Tercera edición; Impreso en España, Ediciones Mundi-prensa. 929 pp.
- Regües, D. y Torri, D. 2002. Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo arcilloso sin vegetación. *C. & G.* 16 (1-4), 57-59.
- Rodríguez-Vásquez A.F., Aristizábal-Castillo A.M., Camacho-Tamayo J.H. 2008. Spatial Variability of Philip and Kostikov Infiltration Models in an Acid Soil. *Eng. Agric., Japoticabal*. 28, 65-67.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa, México. 432 pp
- Saldana, A., Stein, A. y Zinck, J.A. 1998. Spatial Variability of Soil Properties at Different Scales Within three Terraces of the Henares River. *Catena*, Amsterdam, 33, 139-42.
- Siebe, C., Janh, R. y Stahr, K. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. 2da. Edición. 14-27 pp.
- Sobieraj, J.A., Elsenbeer, H. y Cameron, G. 2004. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *CATENA*. 55, 49-77.
- Tobón C., Bouten W., y Dekker S. 2000 Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in Northwest Amazonia. *Journal of Hydrology*. 237, 169-183

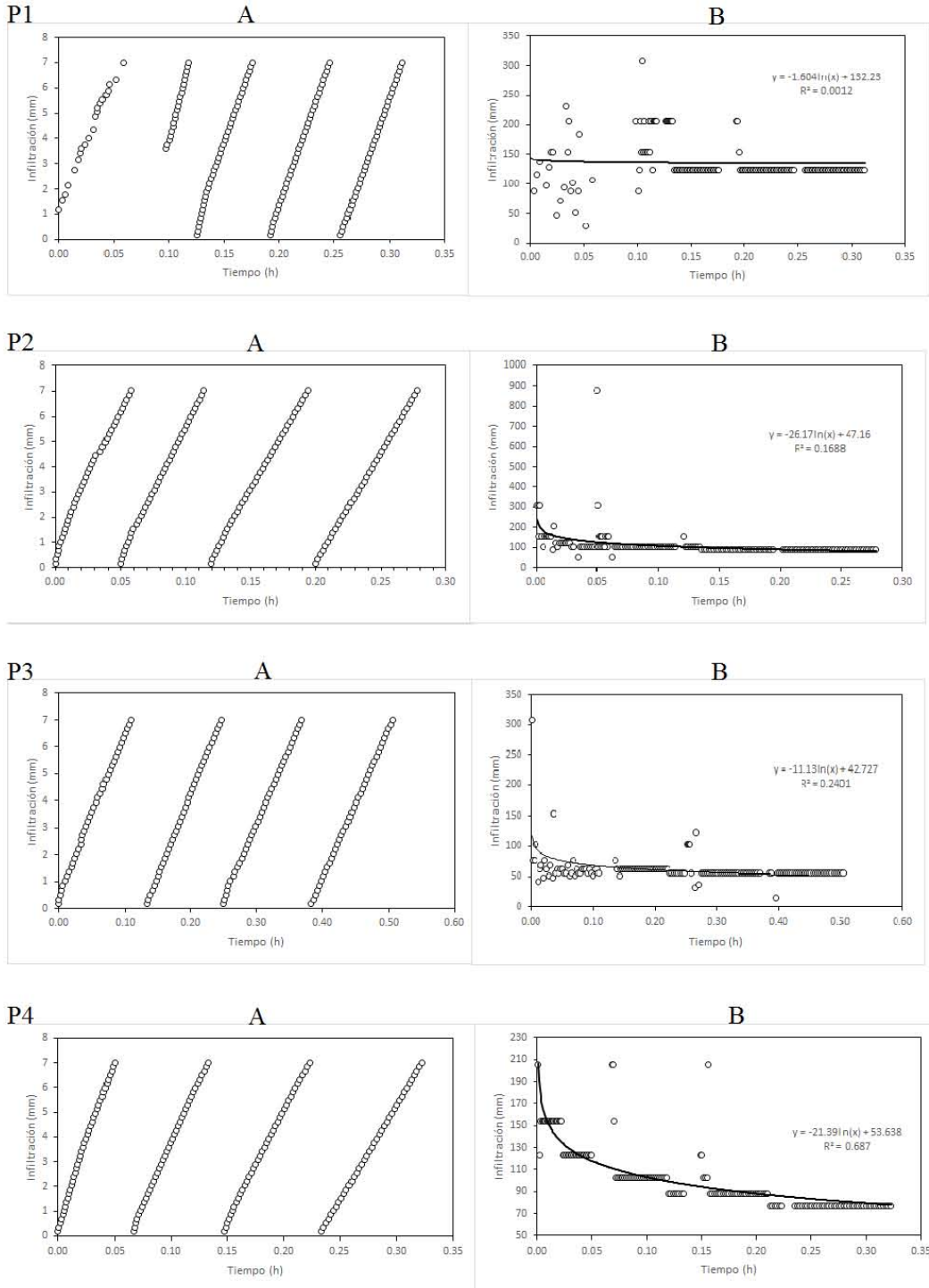
- Tobón C., Bruijnzeel, L.A., Frumau, F.A. y Calvo-Alvarado J.C. 2010. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. *Tropical Montane Cloud Forest: Since for Conservation and Management*. Cambridge University Press. 52, 502-513.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J.A., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. 2011. Tropical montane cloud forests: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Environmental Management*. 92, 974-981.
- USDA-NRCS. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. Doceava edición. 338 pp.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. y Hernández, J. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* 34, 322-329.
- Villón-Béjar, M. 2004. *Hidrología. Precipitación*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Tecnológica de Costa Rica. 77-88 pp.
- Williams-Linera, G. 1992. Ecología del paisaje y el bosque mesófilo de montaña en el centro de Veracruz. *Ciencia y Desarrollo XVIII*. 105, 132-138.
- Williams-Linera, G. 1993. Bordes de bosque nublado en el Parque Ecológico Clavijero, Xalapa, Veracruz, México. *Revista de Biología Tropical*. 41, 107-109.
- Williams-Linera G. 2007. *El Bosque de niebla del centro de Veracruz: Ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático*. INECOL-CONABIO, Xalapa, Ver.
- Williams-Linera, G., Toledo-Garibaldi, M. and Gallardo, H. C. 2013. How heterogeneous are the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant. Ecol.* 214., 685-701.
- Wit, A.M.W. 2001. *Runoff controlling factors in various sized catchments in a semi-arid Mediterranean environment in Spain*. Ph. D. Thesis, Universiteit Utrecht, Utrecht, The Nederland. 229 pp.

- Wu, L., Pan, L., Mitchell, J. y Sandel, B. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 788-792.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H y De Moraes, J.M. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. *Forest Ecol. Manage.* 222, 29-38.
- Zimmermann, B. y Elsenbeer, H. 2008. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance, *Journal of Hydrology.* 361, 78-95.

## 8. Apéndice

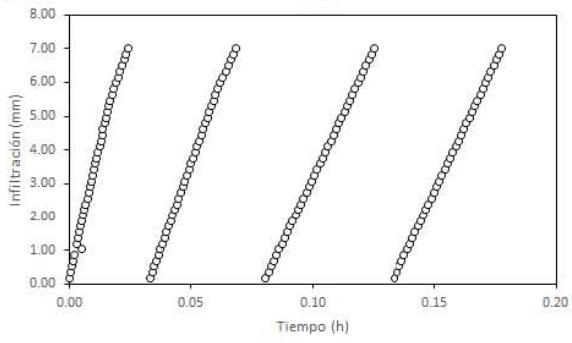
### 8.1 Gráficas de infiltración: A) Infiltración acumulada, B) Infiltración instantánea de los sitios estudiados.

#### Bosque

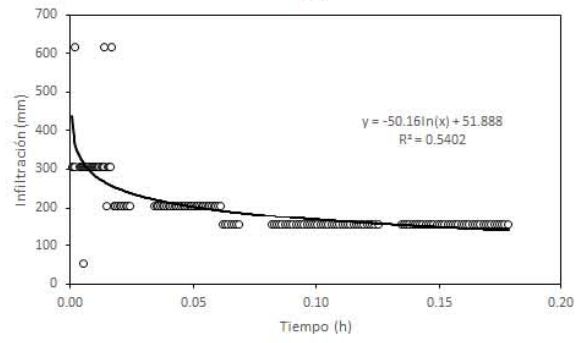


P5

A

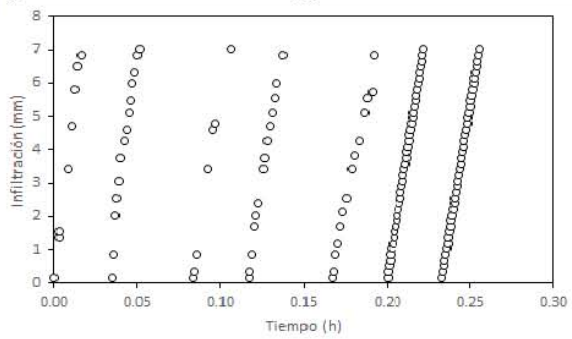


B

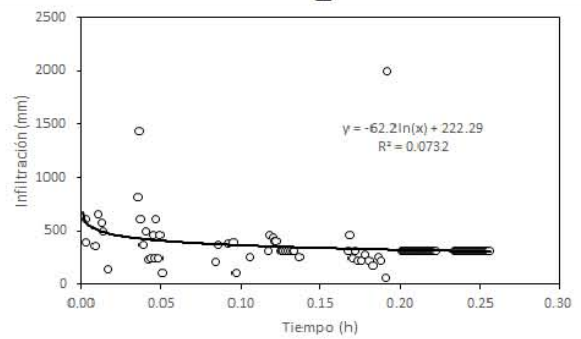


P6

A

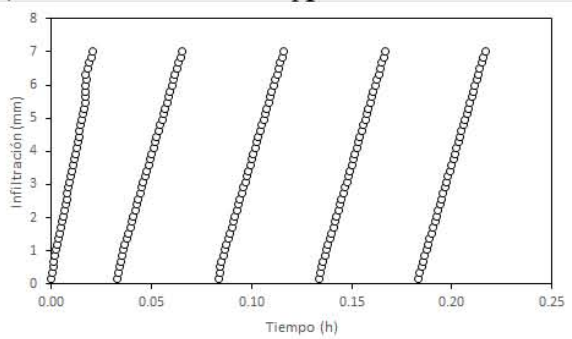


B

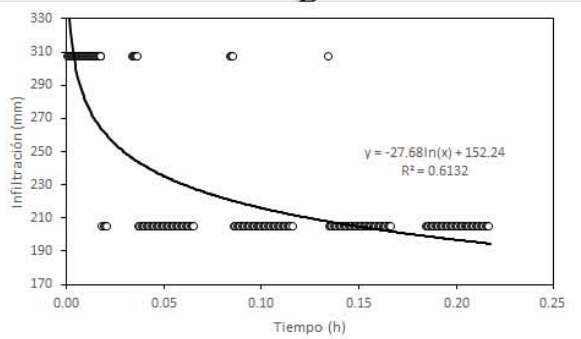


P7

A

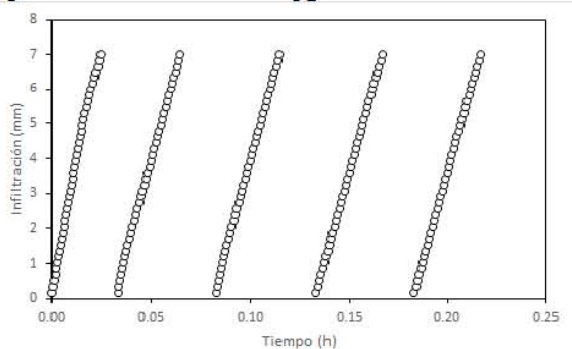


B

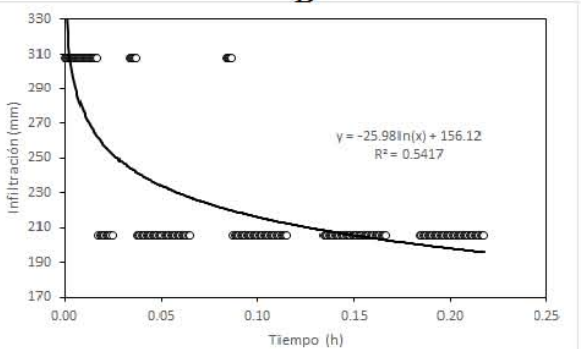


P8

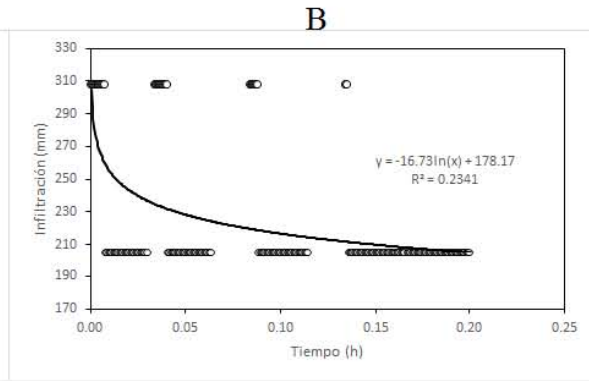
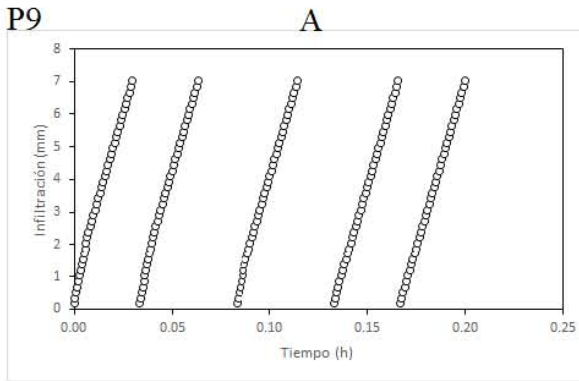
A



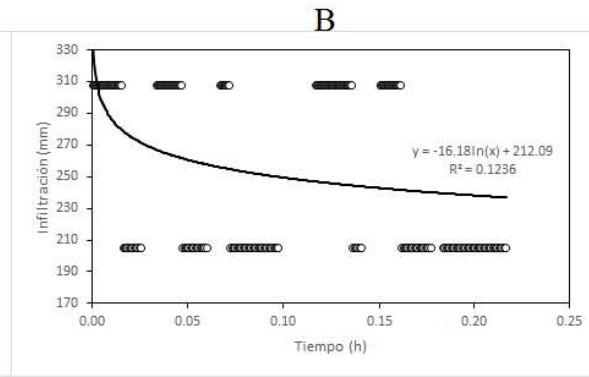
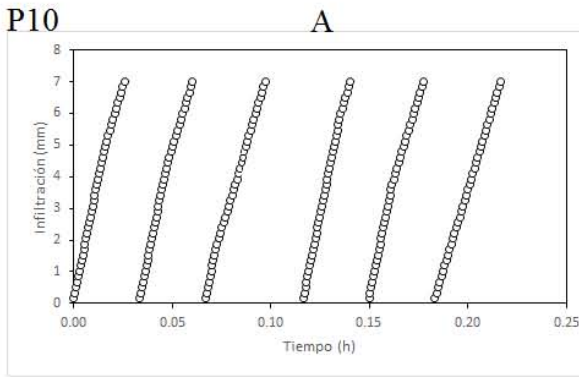
B



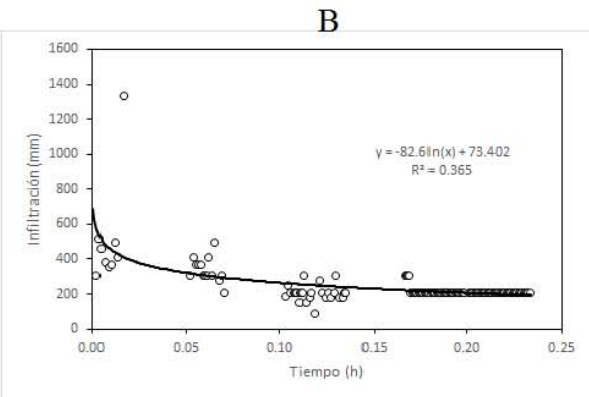
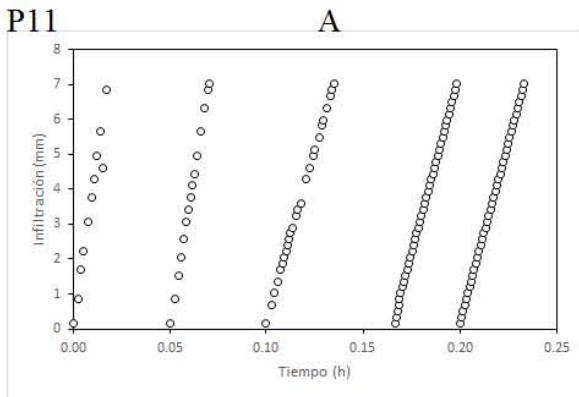
P9



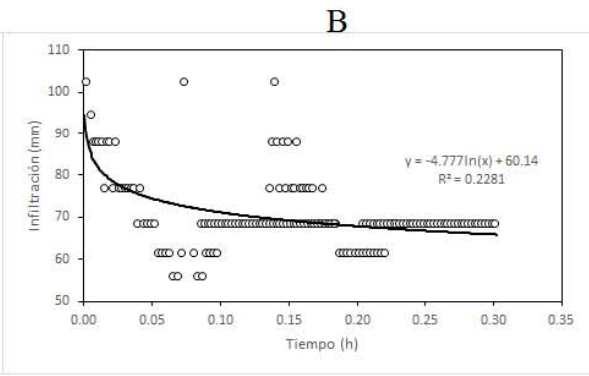
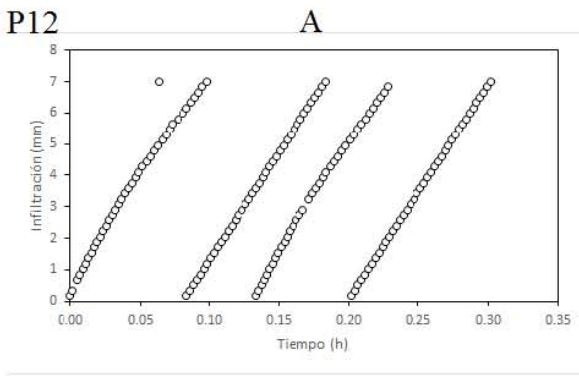
P10



P11

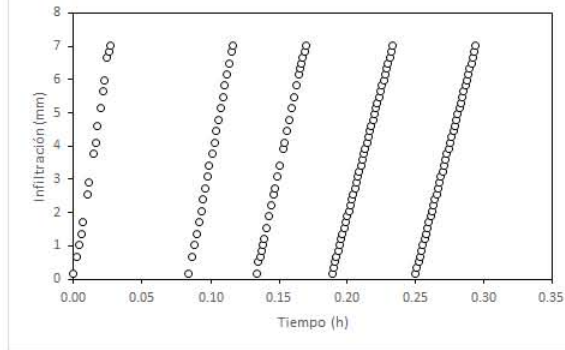


P12

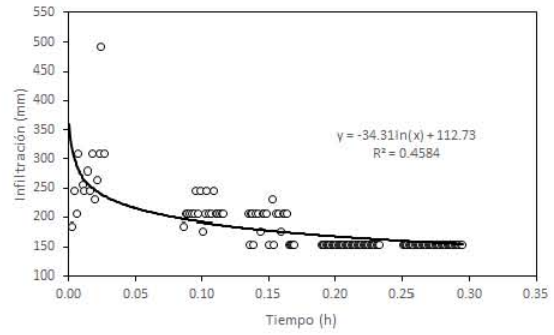


P13

A

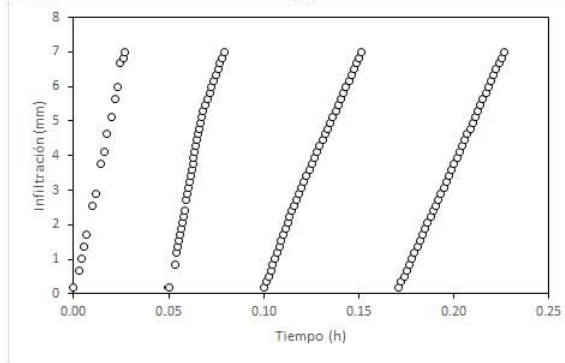


B

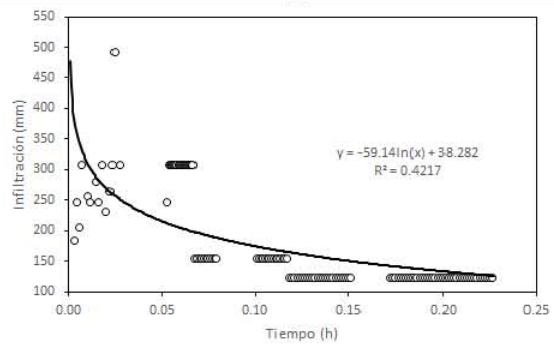


P14

A

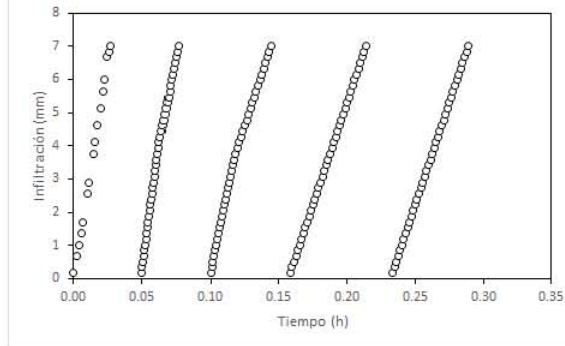


B

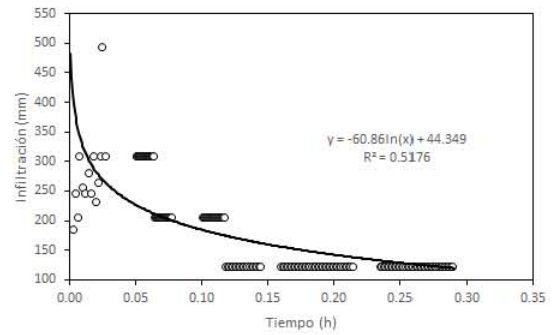


P15

A

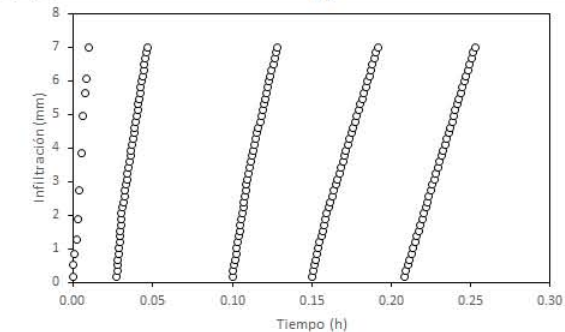


B

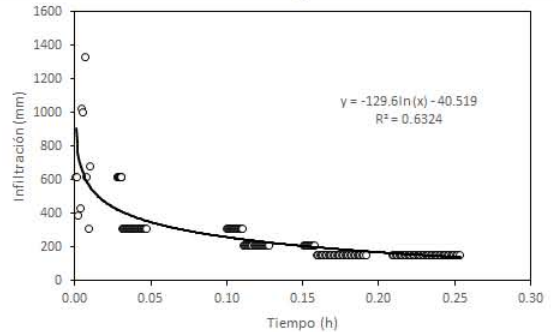


P16

A

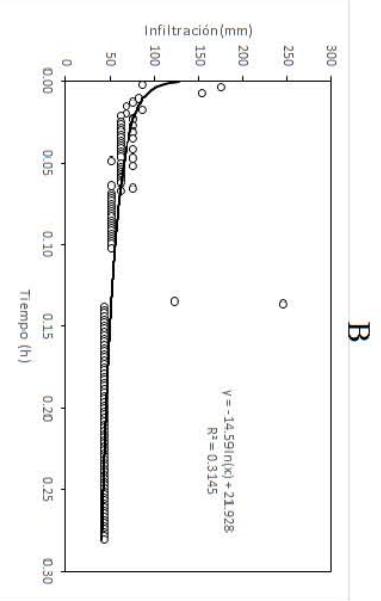
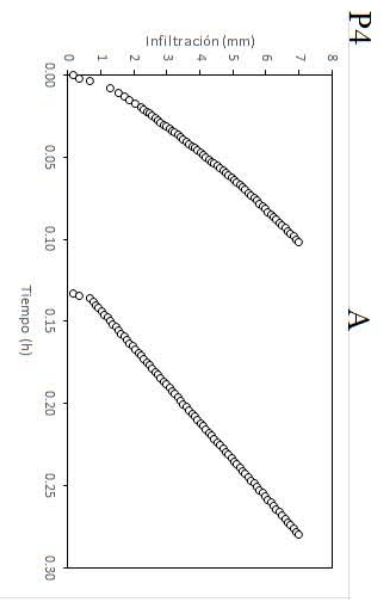
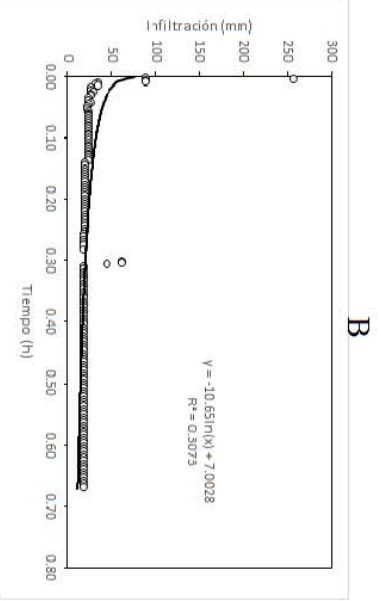
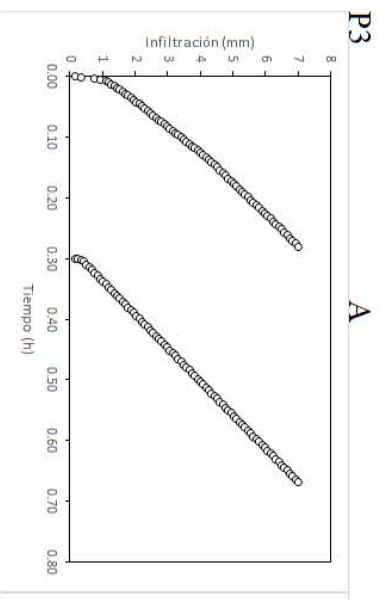
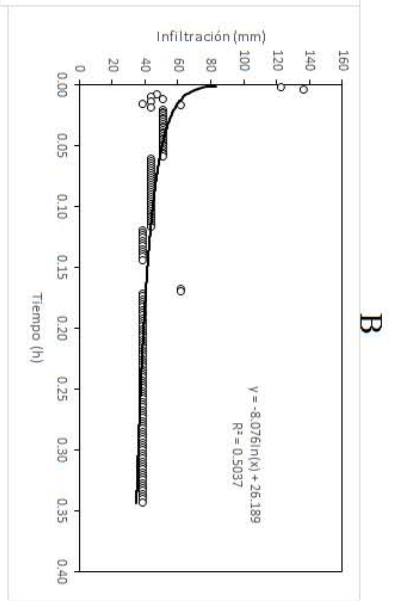
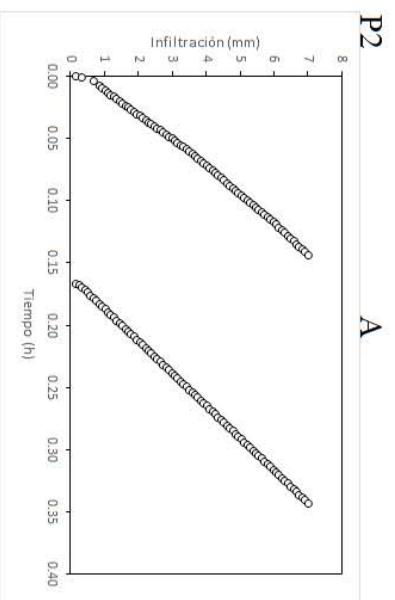
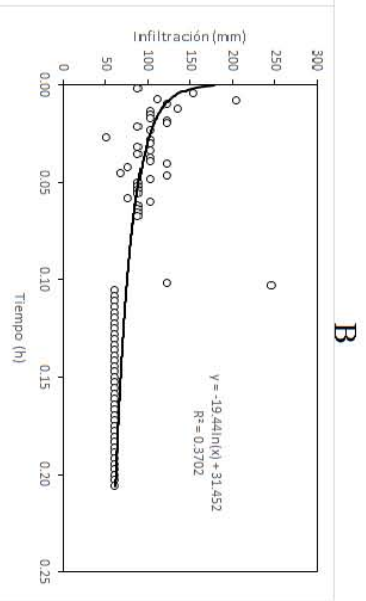
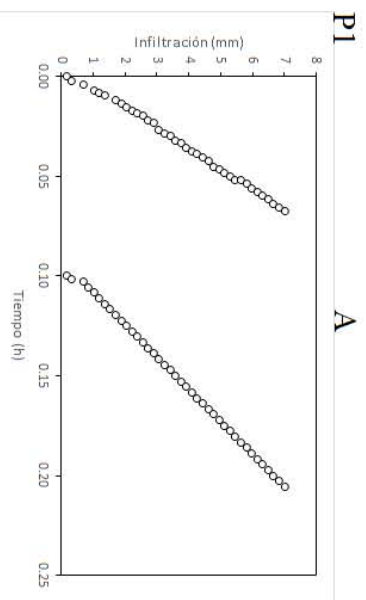


B



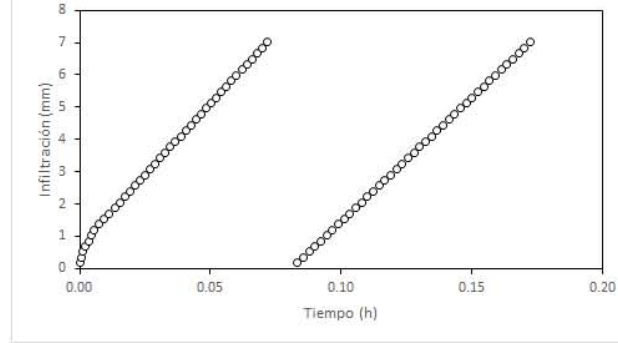


Café

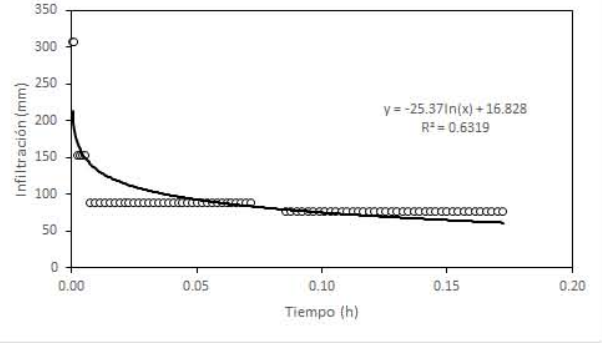


P5

A

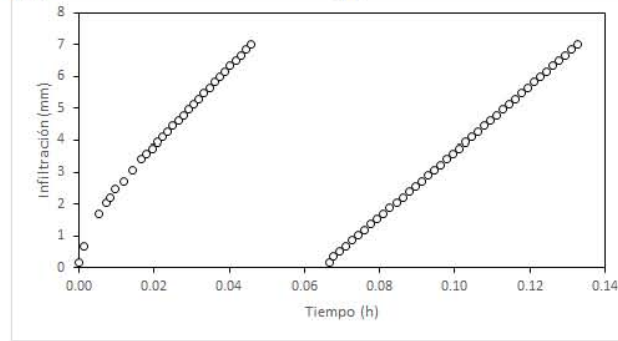


B

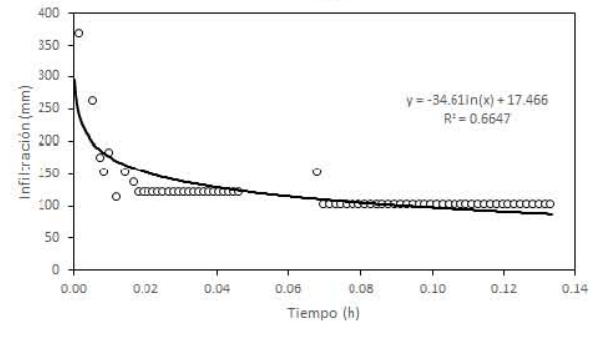


P6

A

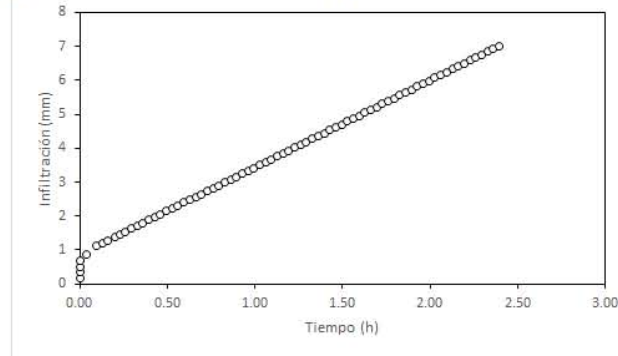


B

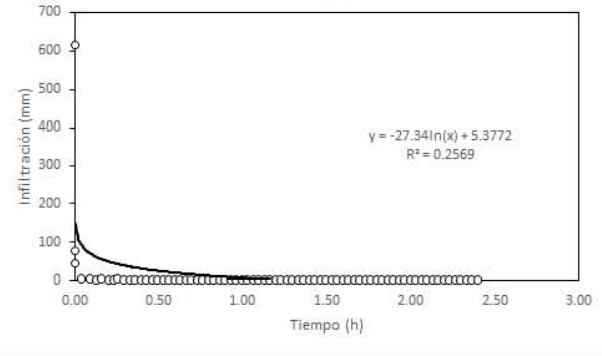


P7

A

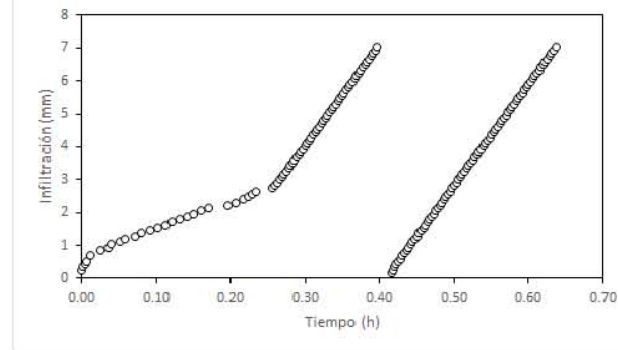


B

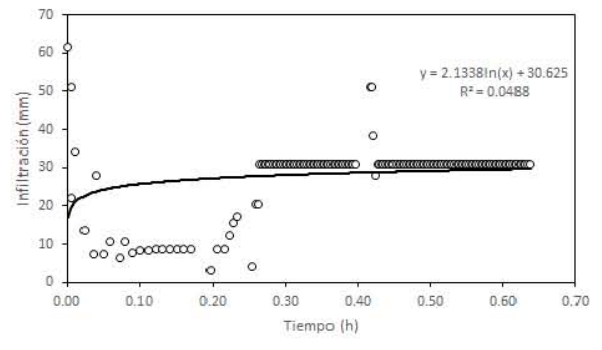


P8

A

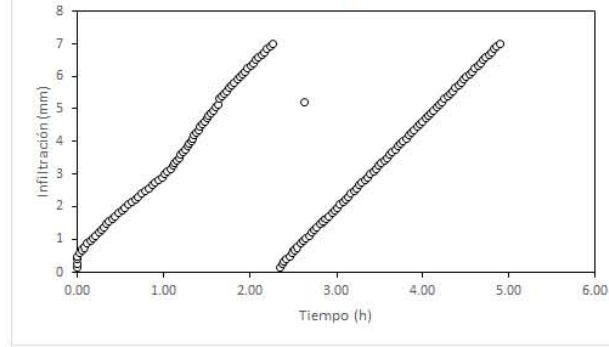


B

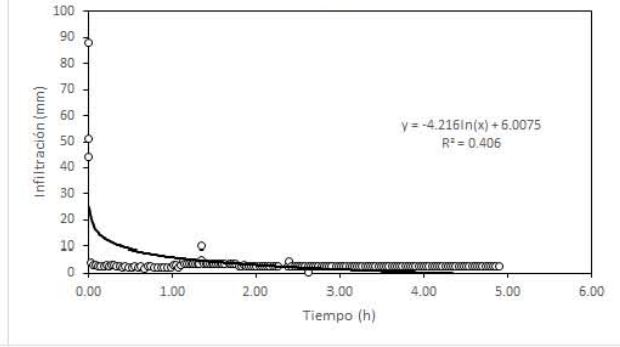


P9

A

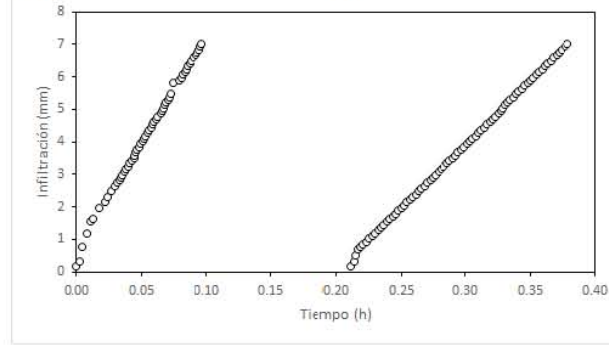


B

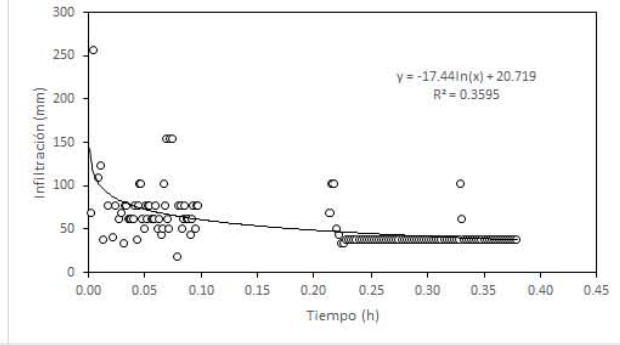


P10

A

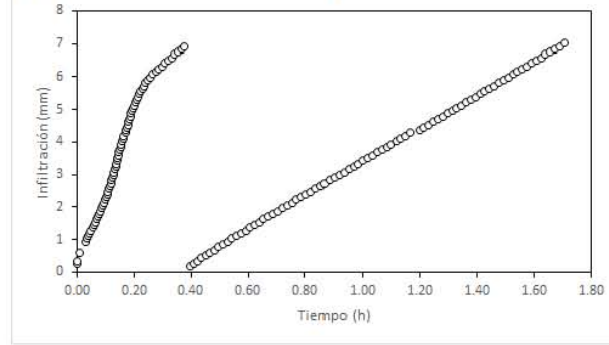


B

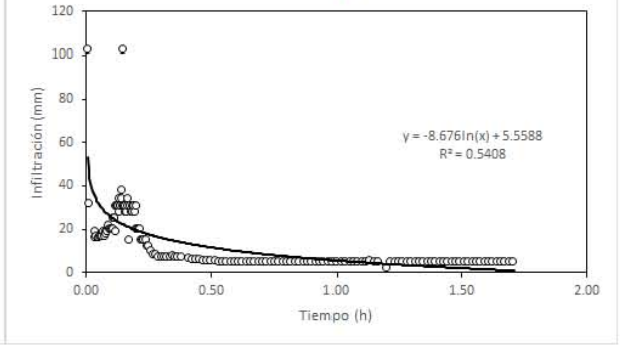


P11

A

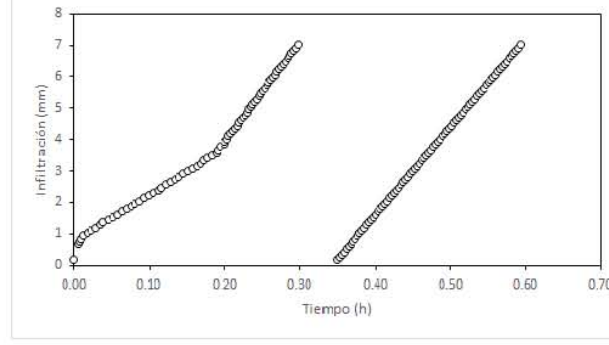


B

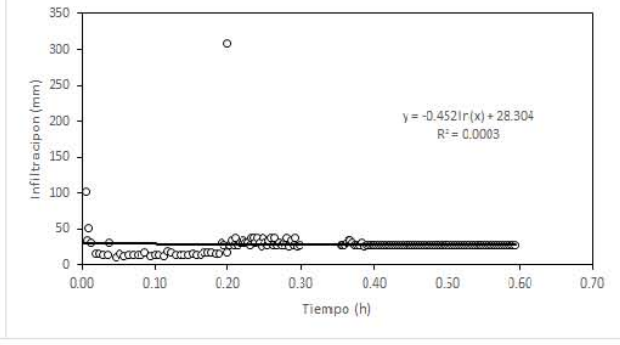


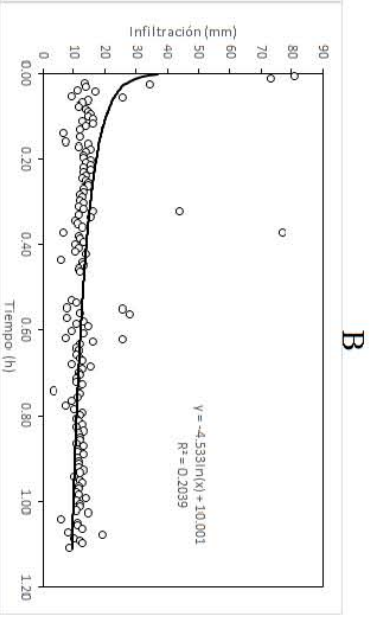
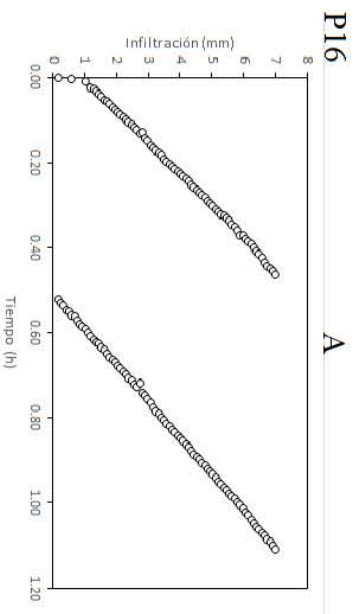
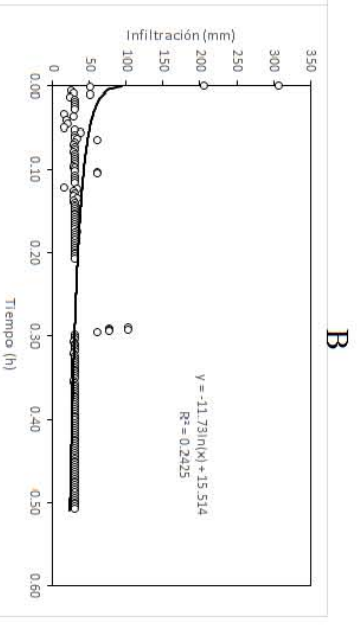
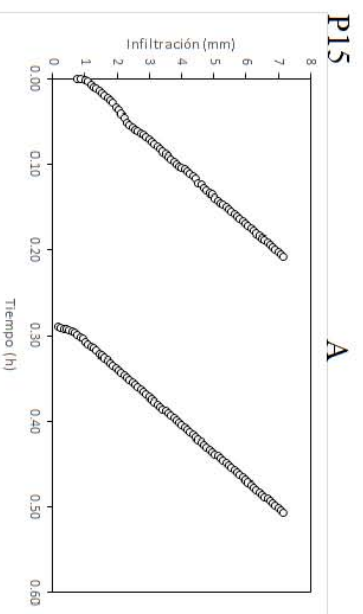
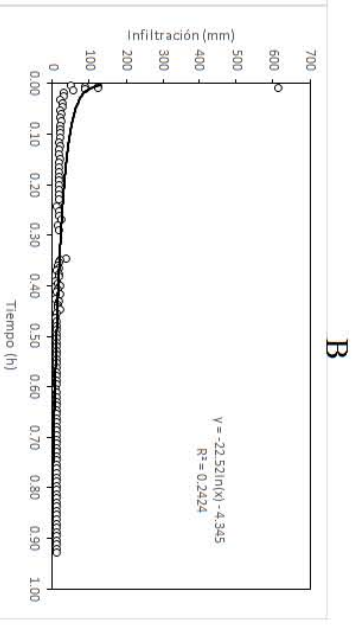
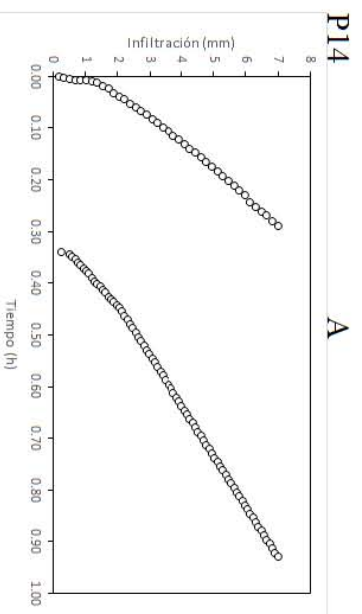
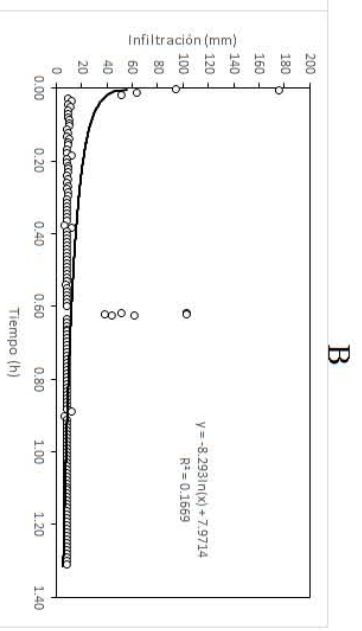
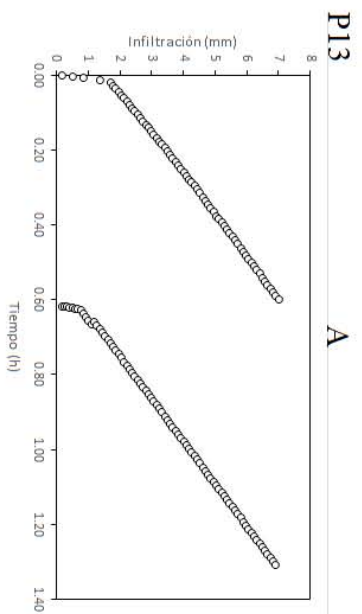
P12

A



B

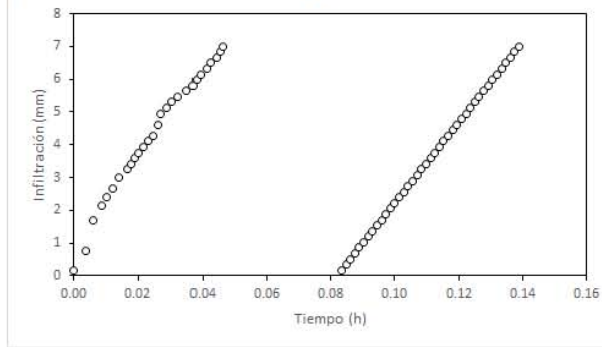




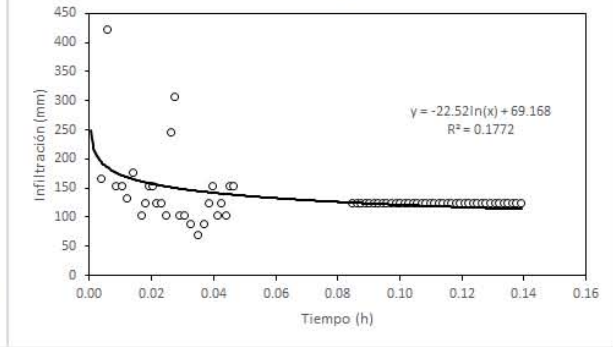
# Caña

P1

A

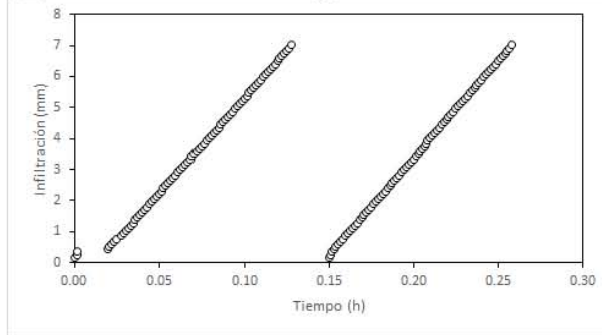


B

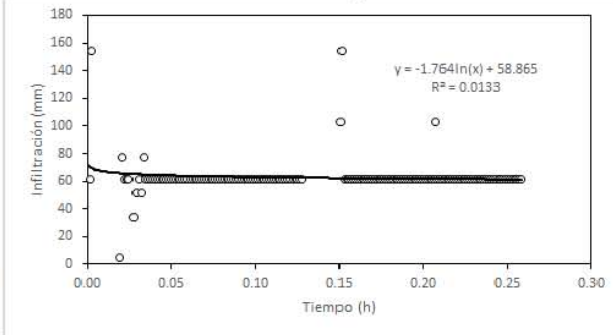


P2

A

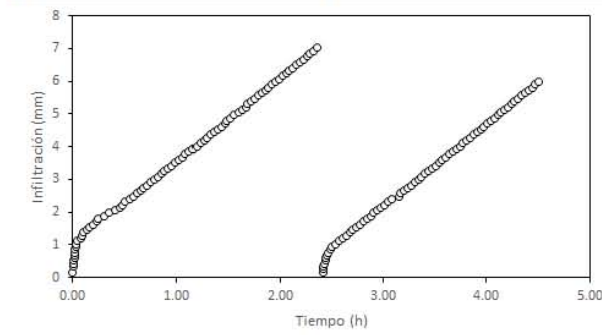


B

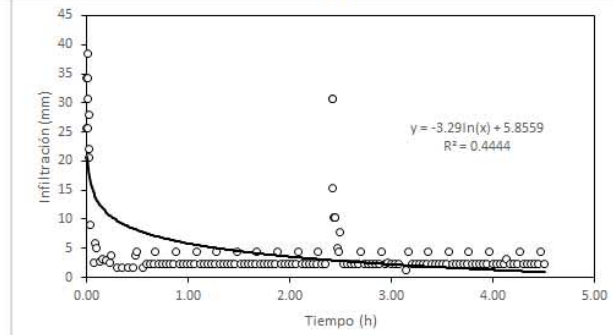


P3

A

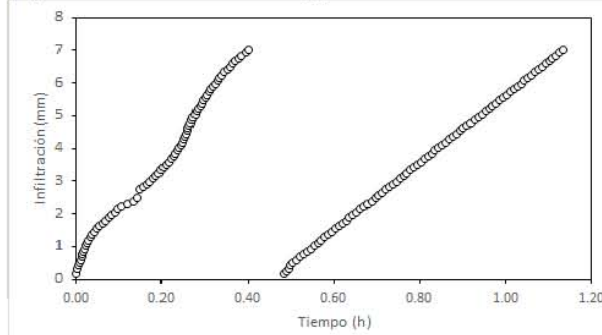


B

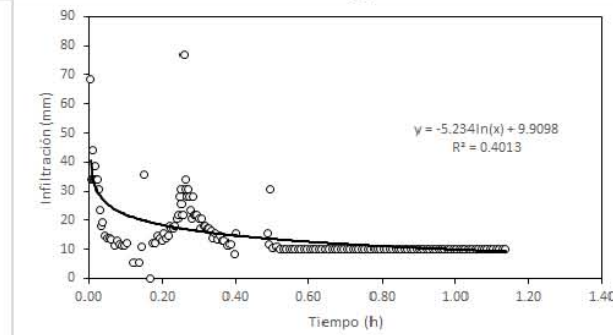


P4

A

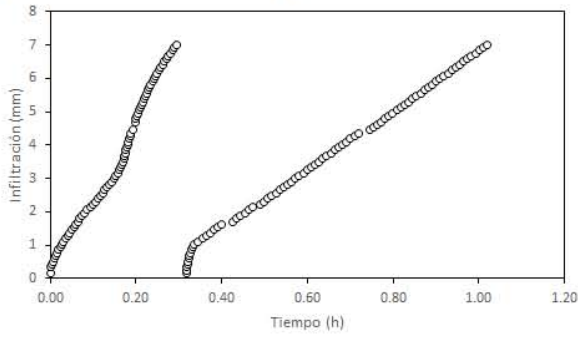


B

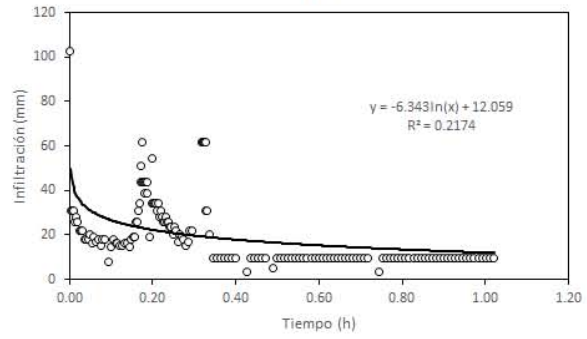


P5

A

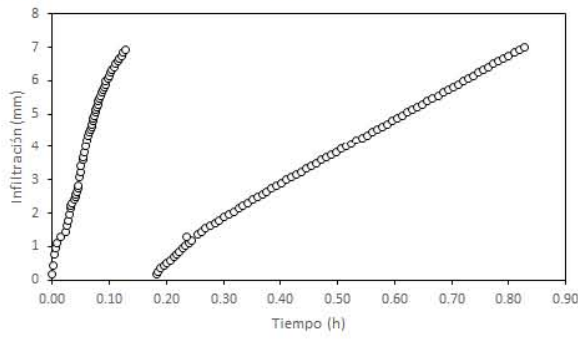


B

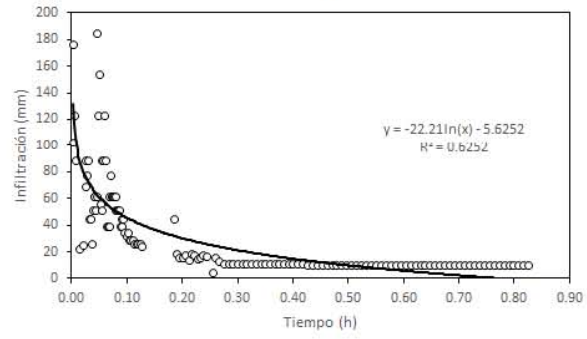


P6

A

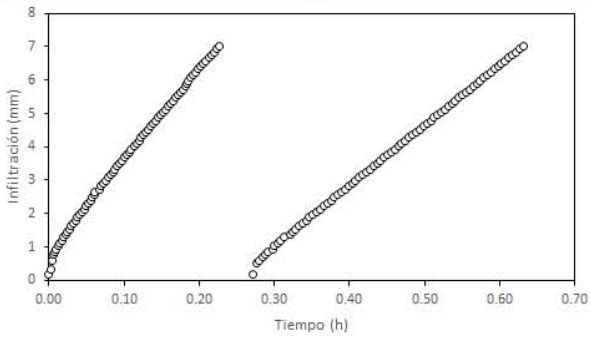


B

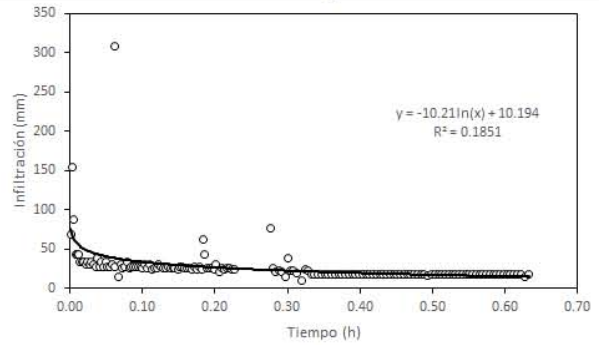


P7

A

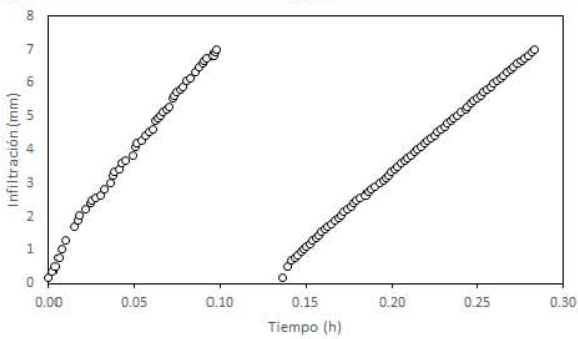


B

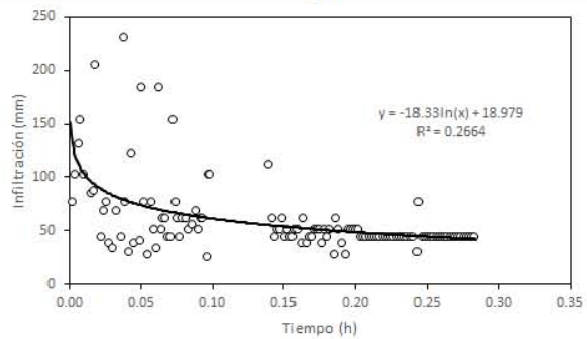


P8

A

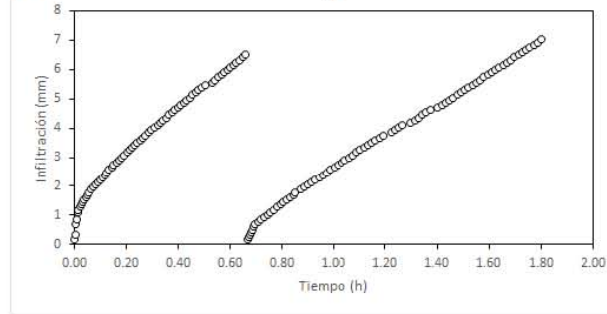


B

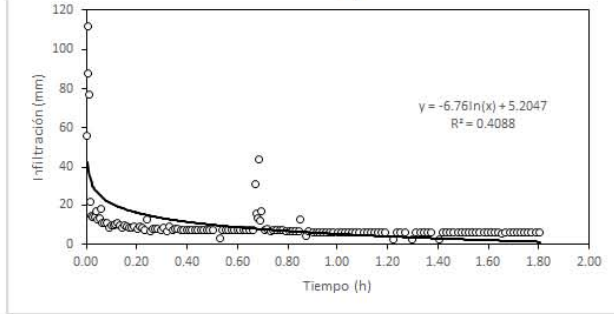


P9

A

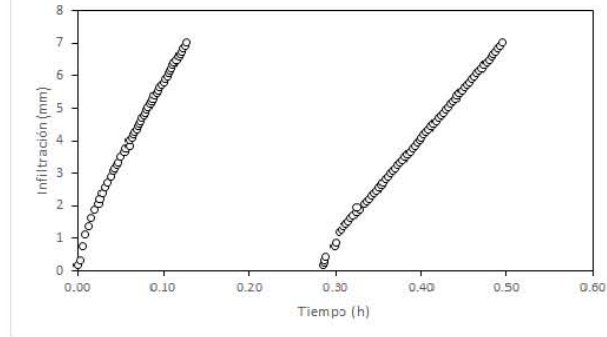


B

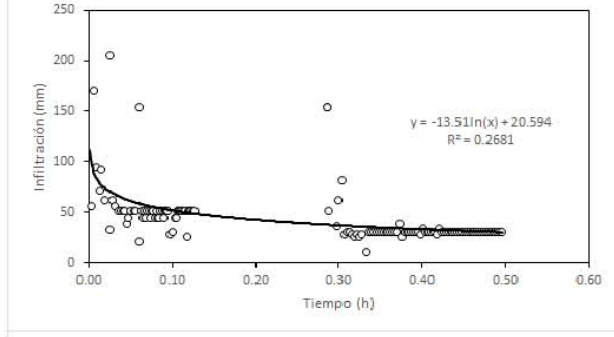


P10

A

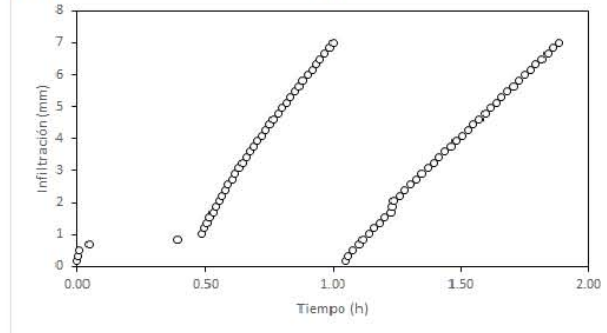


B

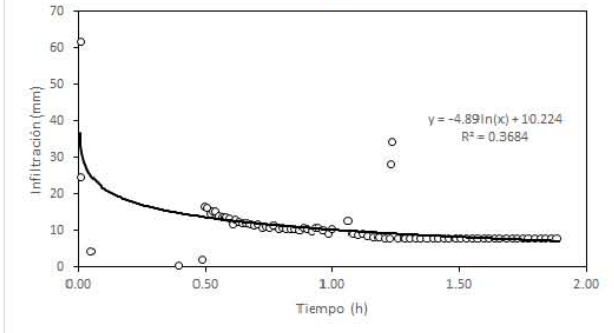


P11

A

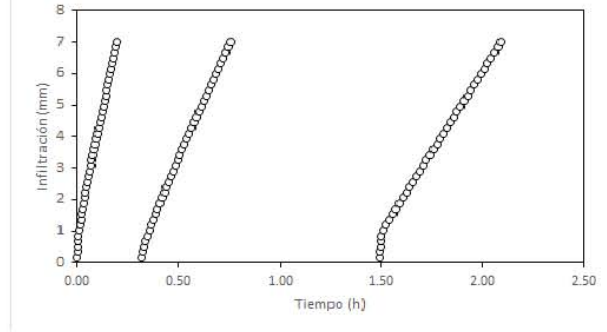


B

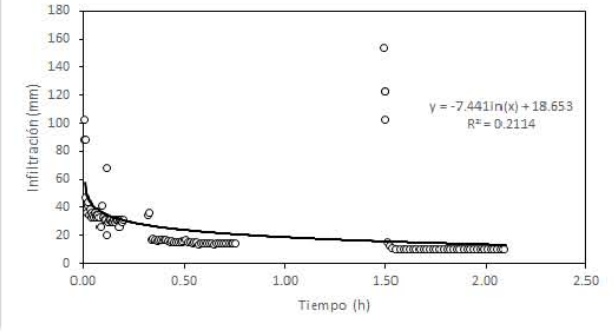


P12

A

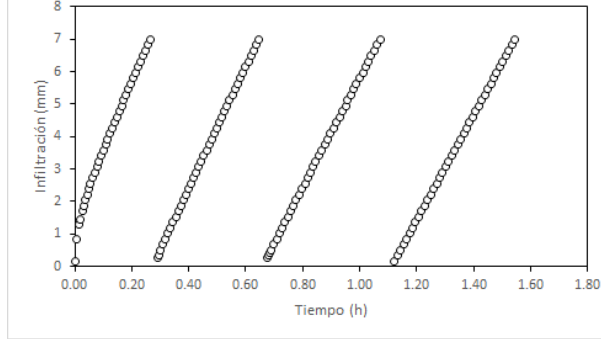


B

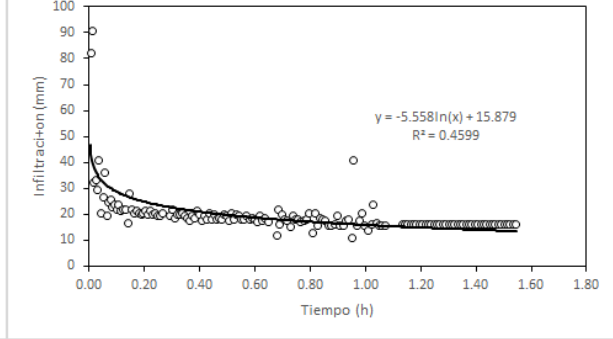


P14

A

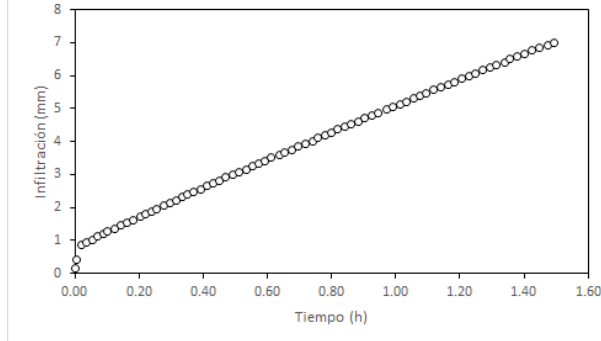


B

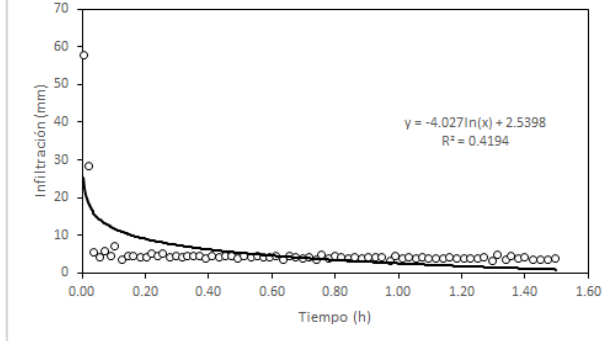


P15

A

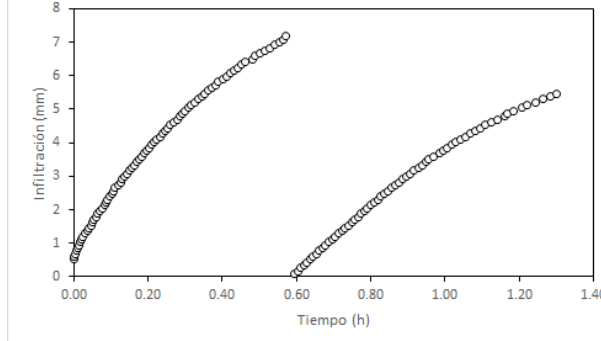


B

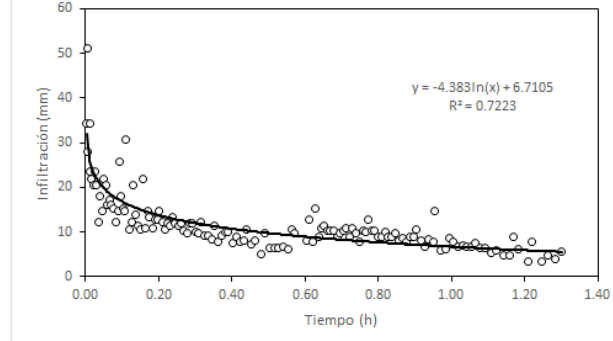


P16

A



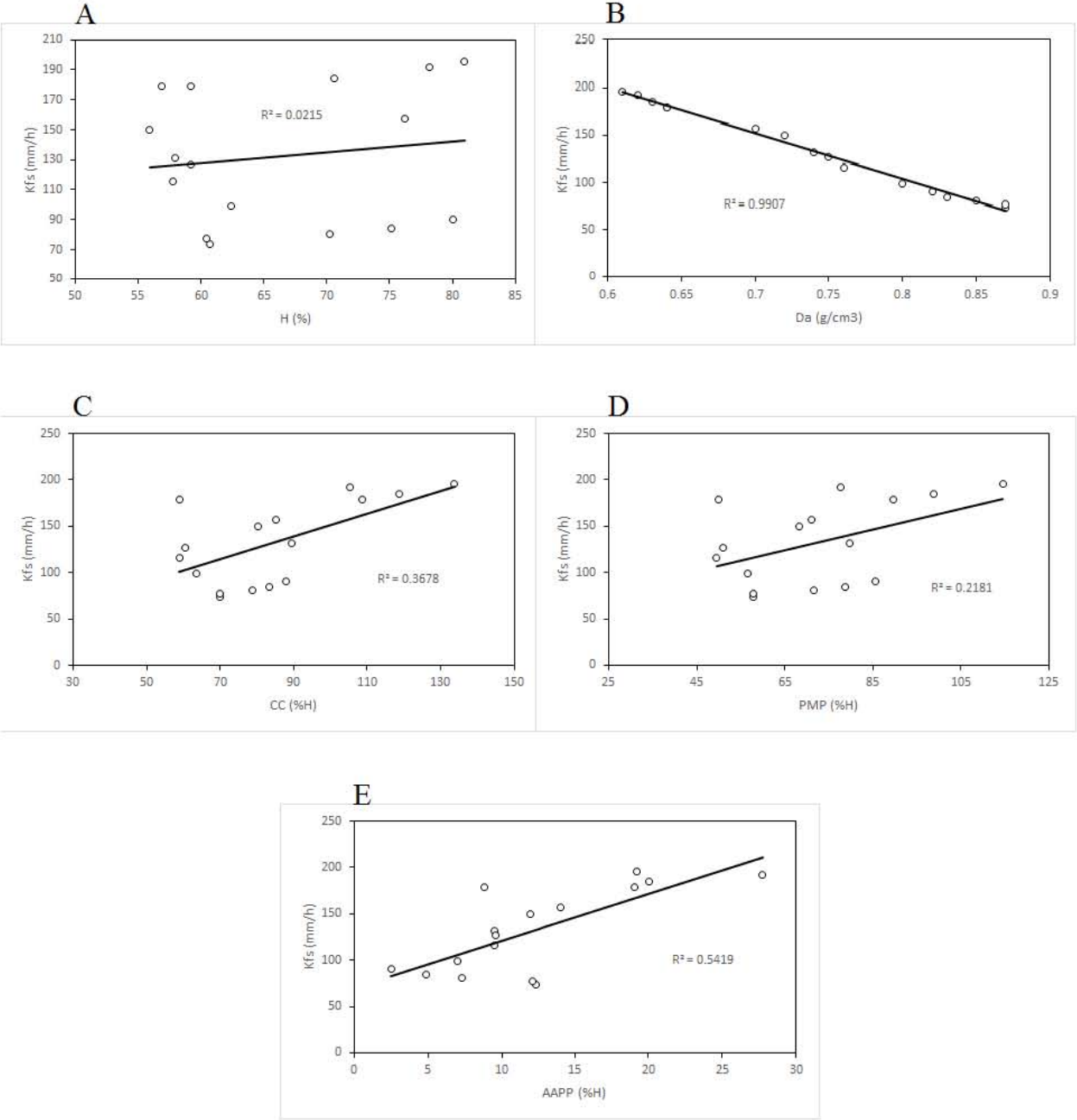
B



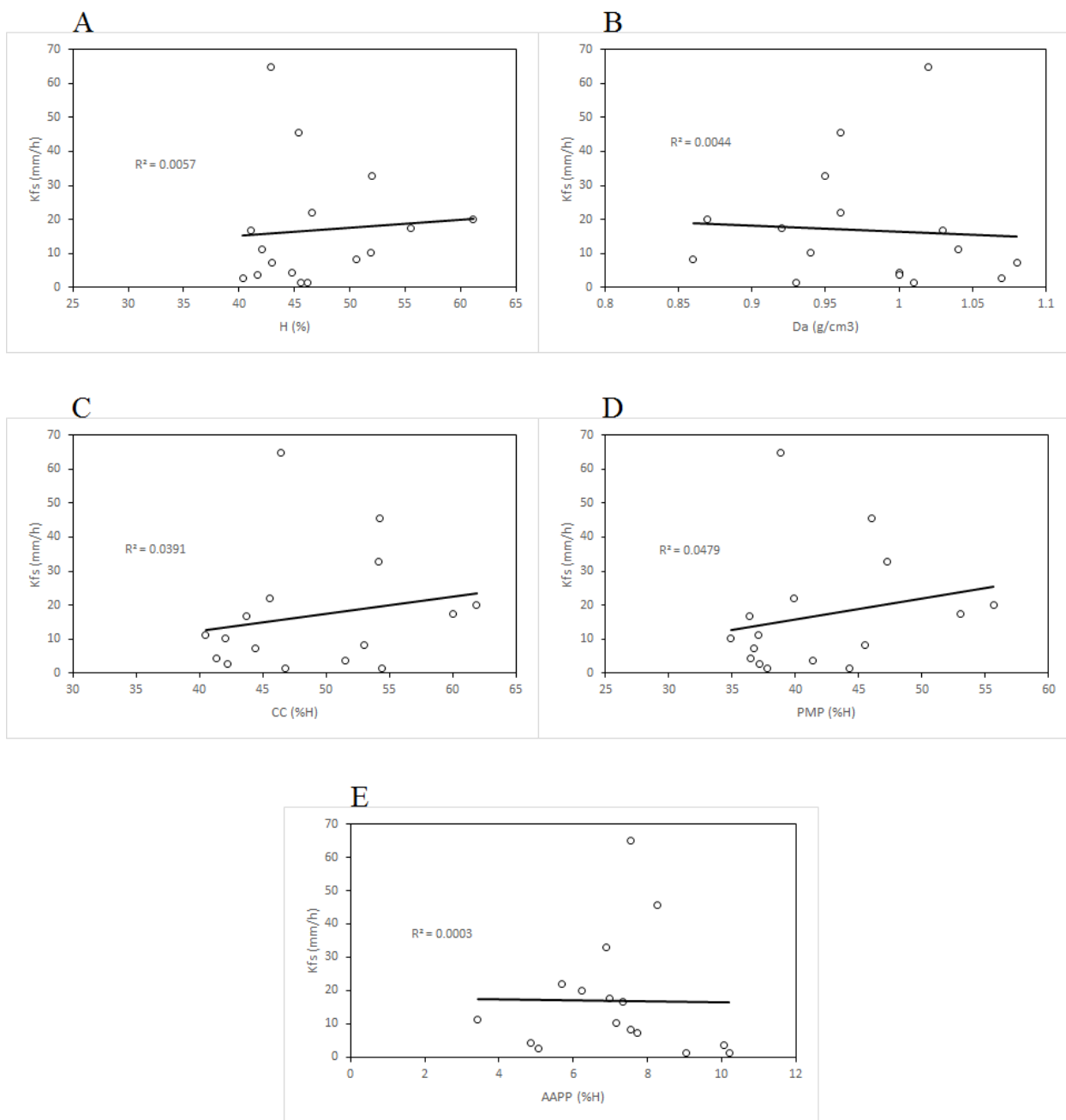


8.2 Gráficos de correlación de las propiedades hidrofísicas con los valores de la  $K_{fs}$  por cada sitio estudiado. Contenido de humedad inicial y  $K_{fs}$  (gráfica A), densidad aparente y  $K_{fs}$  (gráfica B), capacidad de campo y  $K_{fs}$  (gráfica C), punto de marchitez permanente y  $K_{fs}$  (gráfica D), agua aprovechable para las plantas y  $K_{fs}$  (gráfica E).

Bosque



# Café



# Caña

