



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN BOSQUES Y
PRADERA DE ALTA MONTAÑA DE AMECAMECA,
ESTADO DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G A

P R E S E N T A

ADRIANA CASTRO ALONSO

DIRECTOR DE TESIS: M EN C. EFRAIN R. ÁNGELES CERVANTES

Proyecto financiado por PAPIIT IN-217300

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2009



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.

Happiness is what you think, what you say, and what you do are all harmony
Mahatma Gandhi

A mi mamá

y

*A los que se han marchado dejando su rastro y su amor,
a ellos que aun desde lejos me dan su cariño y su calor
(Ma. Luisa Flores, Mauro Alonso y Fernando Alonso)*

Agradecimientos

A Dios

Por darme la vida y la familia que tengo, y por permitirme lograr un triunfo más.

A mi madre

Por ayudarme a hacer posible un logro más el cual comparto contigo ya que tú eres mi apoyo incondicional este no será el último pero sí el más importante.

Gracias por la fe que depositaste en mí y dármelo todo sin esperar a cambio más que el orgullo de hacer de mí una triunfadora.

A mis tías Natalia, Esperanza y Rosa María gracias por confiar en mí y a toda mi familia por siempre estar ahí de todo corazón gracias.

A la UNAM

A la que orgullosamente pertenezco desde mi paso por el CCH-Sur y la carrera de biología de la FES Zaragoza, gracias por todos los conocimientos que adquirí en la máxima casa de estudios y por el orgullo de ser universitaria.

Al M. en C. Efraín R. Ángeles Cervantes

Por su amistad y sus consejos que siempre los tomaré muy en cuenta hoy y siempre, por su ayuda en la realización de este trabajo y gracias por compartir sus conocimientos con cualquiera que se los pide eso solo lo hace un gran maestro. Pero sobre todo gracias por ser como es.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores

Una de las personas más importantes en mi formación académica y personal, gracias por su amistad, sus consejos y conocimientos.

A los maestros M. en C. Manuel F. Rico Bernal, M. en C. Efraín R. Ángeles Cervantes, M. en C. Ma. de Jesús Sánchez Colín, Dr. Gerardo Cruz Flores y M. en C. Sonia Rojas Chávez por su apoyo para la mejora de este trabajo y su colaboración como jurado.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN-217300 por la apoyo económico otorgado para la realización de esta tesis.

A un gran compañero y amigo Enrique Suastegui Méndez por su apoyo y colaboración en campo para la realización del presente trabajo y por su amistad.

A mis amigas Norma Matías, Norma Zaragoza y Araceli Cazares porque aunque nos separemos es una amistad por siempre.

Y a todos los que no terminaría de nombrar y que estuvieron en los buenos y malos momentos a lo largo de la carrera y durante toda la vida.

ÍNDICE	Pág.
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	viii
I. Introducción	1
Marco teórico	2
• Infiltración	3
• Capacidad de infiltración	3
• Conductividad hidráulica	4
• Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados	5
• Métodos para evaluar infiltración y conductividad hidráulica	6
• Método utilizando el Permeámetro Guelph	6
• Antecedentes	9
II. Interrogantes e hipótesis	11
III. Objetivo	12
IV. Material y método	13
• Zona de estudio	13
• Selección de sitios	18
• Determinación de la Conductividad hidráulica	21
• Análisis Estadístico	22
V. Resultados	25
• Bosque de <i>Pinus</i>	25
• Bosque de <i>Abies</i>	29
• Pradera de alta montaña	35

VI. Discusión	36
VII. Conclusión	39
Literatura citada	40

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Ubicación y grado de deterioro del bosque de <i>Pinus</i> y de una pradera de alta montaña	19
Cuadro 2. Ubicación y grado de deterioro de los sitios de bosque de <i>Abies</i>	20
Cuadro 3. Formato de captura de datos de conductividad hidráulica	23
Cuadro 4. Conductividad hidráulica K_{fs} y potencial de flujo mátrico (Φ_m) en Pradera de Alta Montaña.	35
Figura 1. Ciclo hidrológico (Maderey 2005)	2
Figura 2. Determinación de la conductividad hidráulica saturada por el método del Permeámetro de Guelph. (Porta y López 2003)	7
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo.	17
Figura 4. Efecto de los incendios sobre la conductividad hidráulica del suelo en bosque conservado de <i>Pinus hartwegii</i> (BC) y bosque afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo México.	25
Figura 5. Potencial de flujo mátrico (Φ_m) del suelo de bosque conservado de <i>Pinus hartwegii</i> (BC) y bosque afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	26
Figura 6. Efecto de la regeneración sobre la conductividad hidráulica del suelo de bosque conservado de <i>Pinus hartwegii</i> (BC) y bosque regenerado de 12, 18 y 27 años (BREG12, BREG18 Y BREG27, respectivamente) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	27
Figura 7. Potencial de flujo mátrico del suelo bajo bosque conservado de <i>Pinus hartwegii</i> (BC); bosque regenerado de 12, 18 y 27 años (BREG12, BREG18 Y BREG27, respectivamente) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	28

Figura 8. Efecto del cambio de uso de suelo sobre la K_{fs} (conductividad hidráulica) de suelos de: bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y Pastizal inducido (PI) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	29
Figura 9. Potencial de flujo mátrico del suelo bajo bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y Pastizal inducido (PI) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	30
Figura 10. Efecto de incendios sobre la conductividad hidráulica del suelo de bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y bosque de <i>Abies</i> afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	31
Figura 11. Potencial de flujo mátrico del suelo en bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y bosque afectado por incendio de <i>Abies</i> (PT) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	32
Figura 12. Efecto de la tala en la conductividad hidráulica del suelo de bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y bosque de <i>Abies</i> afectado por tala (BT) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	33
Figura 13. Potencial de flujo mátrico del suelo en bosque de <i>Abies</i> con asociaciones <i>Abies-Quercus</i> (BCAQ) y <i>Quercus-Abies</i> (BCQA) y bosque afectado por tala de <i>Abies</i> (PT) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.	34

RESUMEN

Los bosques y la pradera de alta montaña son importantes en el servicio ambiental hidrológico, sin embargo no se ha evaluado los efectos que tienen la tala, incendios forestales y el cambio de bosque a pastizal inducido, sobre las propiedades hidrológicas del suelo de estas comunidades, por ello se ubicaron bosques de *Pinus*, *Abies* y Pradera de alta montaña, con diferente grado de deterioro y se eligieron 61 puntos de muestreo. En cada punto se determinó la conductividad hidráulica del suelo (K_{fs}) y Potencial de flujo mátrico con el permeámetro Guelph. Los resultados mostraron que el bosque de *Pinus hartwegii* presentó una K_{fs} de 63984 Lt/min/Ha, los incendios superficiales y el cambio a pastizal inducido reducen esta propiedad a un 10%, la regeneración del bosque contribuye a recuperar la conductividad hidráulica, en aproximadamente 30 años se vuelve a recuperar en un 90%. El bosque de *Abies* (Asoc. *Abies-Quercus*) presenta una K_{fs} de 544330 Lt/min/Ha, los incendios superficiales la reducen en un 90%, el cambio a pastizal inducido la reduce en un 99%, mientras que la tala la reduce en un 80%. El mínimo o nulo valor de K_{fs} se presentó en pradera de alta montaña lo que indica problemas de drenaje ocasionando la reducción de la infiltración e incremento de escurrimientos, y siendo los bosques conservados de *Abies* (Asoc. *Abies-Quercus*) la vegetación más importante en la recarga de los mantos freáticos.

Palabras clave: Conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico, cambio de uso de suelo, servicio hidrológico, ecohidrología.

INTRODUCCIÓN

Los bosques son importantes protectores de cuencas hidrológicas porque regulan el ciclo hidrológico, al mantener el caudal durante la temporada de sequía y control de inundaciones, y reducir al mínimo las descargas de sedimentos, nutrimentos (fósforo y nitrógeno), así como disminución de salinidad; el control de la erosión del suelo y sedimentación; la regulación de los niveles freáticos; el mantenimiento de hábitats acuáticos (Pagiola *et al.*, 2006).

Sin embargo, a nivel mundial, cada año se pierde una superficie estimada en 6 millones de hectáreas de bosques primarios. En México, de acuerdo al Inventario Forestal Nacional (2000) considera una superficie de 30.1 millones de ha de selvas y 32.8 millones de ha de bosques (Velásquez *et al.*, 2002). El cambio de uso de ecosistemas naturales o su transformación o a pastizales, potreros o terrenos agrícolas, puede deteriorar su función hidrológica, sin embargo no existen estimaciones con respecto a la pérdida de la función hidrológica.

Además, los bosques de *Pinus* y *Abies* presentan incendios frecuentes, en el período 1998-2006, en promedio se registraron 8.727 incendios forestales que afectaron un promedio de 287.281 hectáreas por año (CONAFOR, 1999). Los incendios forestales influyen en las propiedades hidrológicas del suelo, principalmente en la conductividad hidráulica, de la cual tampoco existen estudios al respecto, por lo que en este trabajo el objetivo fue determinar el efecto del cambio de uso del suelo e incendios sobre la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico del suelo.

MARCO TEORICO

Los problemas del agua y los bosques son dos de los retos ambientales más importantes de México. La sobreexplotación de sus acuíferos, la degradación de la calidad del agua y las altas tasas de deforestación ponen en riesgo el que las generaciones futuras cuenten con el capital natural suficiente para tener un bienestar creciente, algo que la sociedad del presente desea y por lo que realiza tantos esfuerzos.

El ciclo del agua o ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua para las plantas, animales y el hombre (figura 1). (Maderey, 2005)

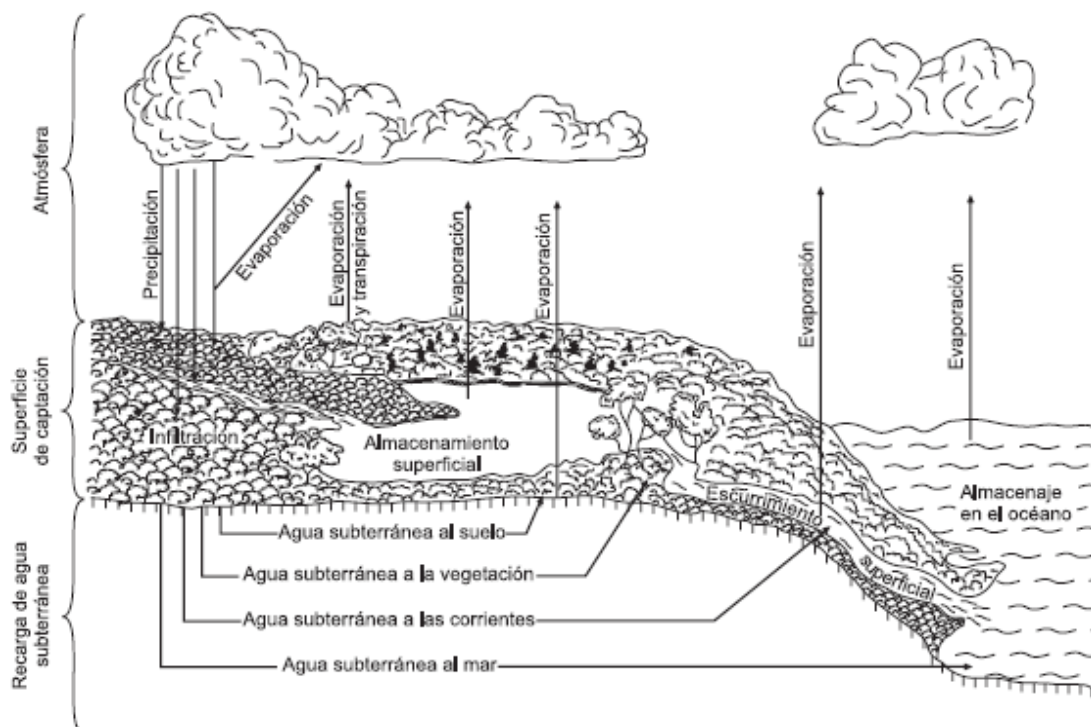


Figura 1. Ciclo hidrológico (Maderey, 2005)

El tema del ciclo del agua conduce a un planteamiento matemático: el balance hidrológico. Si se considera la cuenca de un río (unidad hidrogeográfica y geomorfológica básica para los estudios de hidrología) y un período de tiempo, es factible estimar el agua que entra y sale en el ciclo a través de dicha superficie y durante ese lapso (Maderey, 2005).

Se ha observado que la degradación del suelo que ocurre en las cuencas hidrográficas ha dado lugar a un flujo más irregular de las corrientes de agua con más

inundaciones y aguas barrosas en la estación lluviosa y un menor volumen y duración de las corrientes durante la época seca.

La tala de bosques, el pastoreo en laderas pronunciadas y los efectos compactantes de la maquinaria agrícola producen un exceso de escorrentía y erosión en las zonas templadas (FAO, 2005).

Los cambios en el uso de la tierra pueden, por lo tanto, afectar la cantidad de agua transportada y con ello la cantidad de agua que llega al subsuelo. El reemplazo de los bosques con pasturas o cultivos anuales puede aumentar el drenaje profundo y de esta manera proporcionar más flujos a las corrientes de agua. Los cambios en el manejo del suelo también pueden afectar la cantidad de drenaje profundo que reabastece el sistema subterráneo.

Infiltración

La infiltración es el proceso de entrada de agua en el suelo, es el volumen de agua que entra en una determinada sección transversal del suelo por unidad de tiempo [$L \cdot t^{-1}$] (SSSA, 2008). La infiltración depende de las condiciones de la superficie del suelo, del contenido de agua y de la conductividad hidráulica.

Según Hillel (1998), los factores que afectan la infiltración del suelo son:

- tiempo desde el inicio de la lluvia
- contenido inicial de agua en el suelo
- conductividad hidráulica saturada
- condiciones de la superficie
- profundidad del perfil de suelo y presencia de horizontes no homogéneos en cuanto a su textura.

Capacidad de infiltración

Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora. La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi constante a medida que la precipitación se prolonga, y es entonces cuando empieza el escurrimiento (Maderey, 2005). Si se aplica agua a determinada superficie de suelo, a una velocidad que se incrementa en

forma uniforme, tarde o temprano se llega a un punto en que la velocidad de aporte comienza a exceder la capacidad del suelo para absorber agua y, el exceso se acumula sobre la superficie, este exceso escurre si las condiciones de pendiente lo permiten.

La capacidad de infiltración conocida también como “infiltrabilidad del suelo” es simplemente el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a presión atmosférica. Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la infiltrabilidad, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada, esto nos dice que la velocidad de aporte determina la velocidad de infiltración, es decir, el proceso es controlado por el flujo. Sin embargo existe también la posibilidad que la velocidad de aporte exceda la infiltrabilidad del suelo y en ese mismo momento ésta última es la que determina la velocidad real de infiltración; de ese modo el proceso es controlado por las características del perfil (Gurovich, 1985).

La velocidad de infiltración depende de muchos factores, como ser el espesor del agua empleada para el riego o lluvia, la temperatura del agua y del suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas (Gavande, 1972),

Además la infiltración del agua posee un rol fundamental en los procesos de escorrentía como respuesta a una precipitación dada en una cuenca, dependiendo de su magnitud; lluvias de iguales intensidades pueden producir caudales diferentes, esto es de gran importancia práctica porque su velocidad determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión hídrica.

Conductividad hidráulica

Es el factor de proporcionalidad en la ley de Darcy que es la ecuación fundamental que describe el movimiento de agua en el suelo, este representa la habilidad del suelo de conducir agua y es equivalente al fluido del agua por unidad de gradiente de potencial hidráulico (SSSA, 2008).

La conductividad hidráulica es una de las propiedades del suelo para evaluar diferentes usos y predecir el destino de los materiales antropogénicos aplicados en el suelo. La textura, clase mineralógica, densidad, estructura de las rocas y la cementación influyen en la conductividad hidráulica de los horizontes (West *et al.*, 2007).

Las características del suelo que afectan a la conductividad hidráulica son la porosidad total, la distribución de poros, su tamaño y geometría. También afectan las propiedades del fluido tales como viscosidad y densidad, además del gradiente hidráulico (Baver *et al.*, 1973).

La conductividad hidráulica es una propiedad que caracteriza a los suelos, pero que no siempre constituye una constante, ya que es dependiente de propiedades tales como la agregación y estructura del suelo (Lozano *et al.*, 2005).

La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, que indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y naturaleza del mismo. Las utilidades del conocimiento del valor de la conductividad hidráulica, son innumerables, de ahí la importancia de su estimación. Dentro de estos beneficios se puede resaltar, que sirve como indicador de la hidrodinámica del agua subterránea y este entendimiento es fundamental para analizar problemas hidrogeológicos en relación con las obras civiles, como en presas y embalses; problemas hidrogeológicos en estudios geotécnicos y de minería y en el diseño de drenajes.

La conductividad hidráulica sirve para la definición de la interacción agua superficial – agua subterránea, esto permite realizar la valoración de las reservas y recursos subterráneos, porque ayuda a la estimación de la recarga, siendo insumo de los modelos precipitación – infiltración – recarga, procesos que se presentan en el tránsito de flujo por la zona parcialmente saturada. (Donado, 2004).

Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados

El movimiento del agua en el suelo se controla por dos factores: la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua, y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo. La ley de Darcy, relaciona la proporción de flujo con estos dos factores. El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo o la capacidad de los agregados para absorber agua es el cero. En la mayoría de los suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio del poro total está lleno con agua. El restante 5% está lleno con el aire atrapado (Lozano *et al.*, 2005).

Métodos para evaluar infiltración y conductividad hidráulica

Esta propiedad también ha sido relacionada con el riesgo de inundaciones donde Bens, *et al.*, (2007) realizaron una comparación de métodos con el infiltrómetro y el Permeámetro, con el primero el número de muestras es bajo y los valores de conductividad hidráulica que presenta son más altos, con el segundo el número de muestras es mayor y los valores son bajos, al realizar la comparación no se detectan diferencias significativas y concluyen que se deben realizar más mediciones. También señalan que las mediciones de conductividad hidráulica con el permeámetro requieren menor cantidad de agua y los cálculos son más sencillos en comparación con los obtenidos con el infiltrómetro.

Método utilizando el Permeámetro Guelph

Este método permite medir la conductividad hidráulica *in situ*, y el potencial de flujo mátrico del suelo. Es un Permeámetro de carga constante, mantenida por medio de un frasco de Mariotte, que permite medir la velocidad del flujo del agua en un sonde y en el suelo no saturado circundante (Porta *et al.*, 2003). El permeámetro Guelph, se utiliza para la medida en el campo en zona insaturada de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) y el potencial de flujo mátrico (ϕ_m), hasta una profundidad de 2 m.

Este método mide el flujo de recarga necesario para mantener una profundidad constante de agua en un pozo cilíndrico realizado por encima del nivel freático. Utilizando el principio de Mariotte para establecer y mantener el nivel del agua y medir la recarga correspondiente (figura 2).

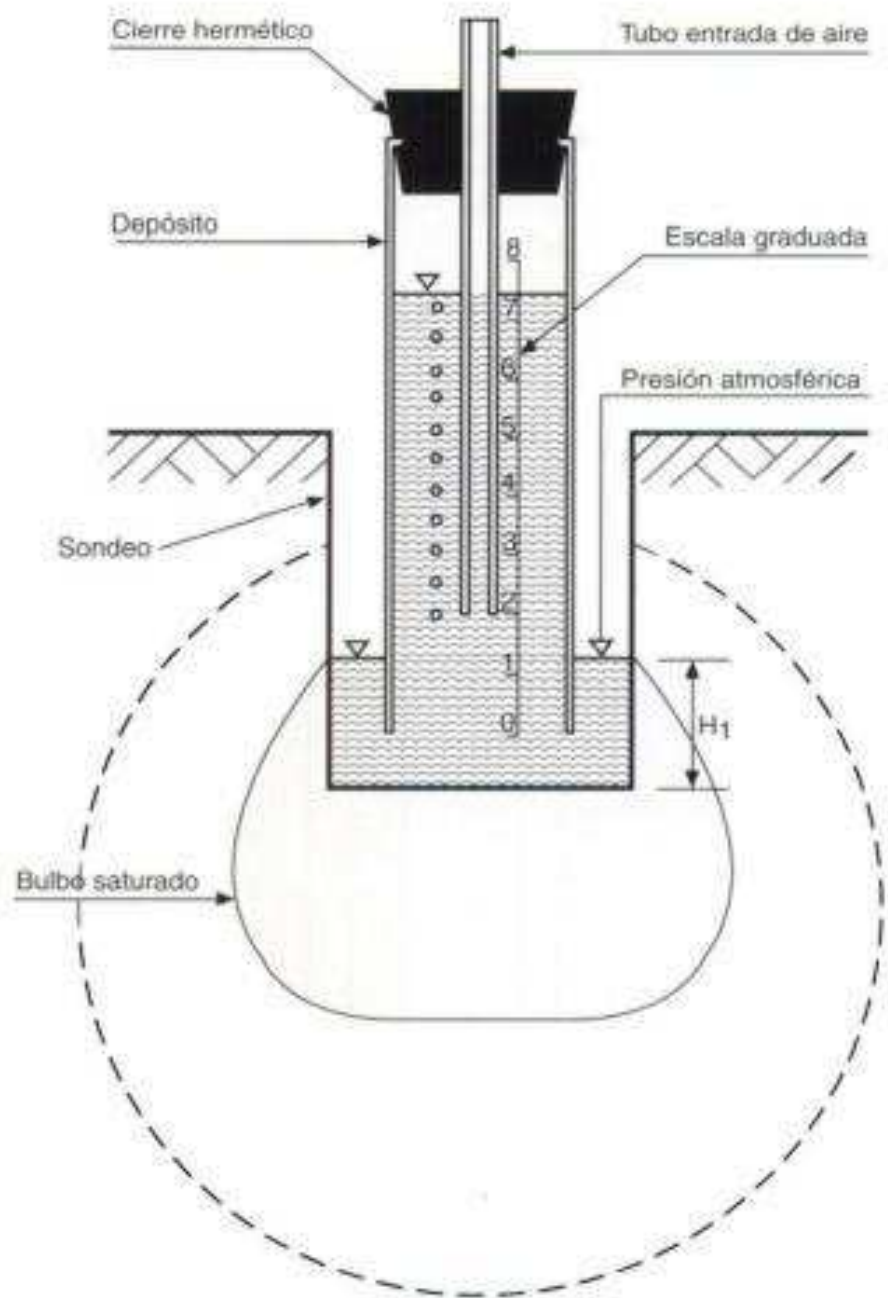


Figura 2. Determinación de la conductividad hidráulica saturada por el método del Permeámetro de Guelph. (Porta y López, 2003)

La recarga de flujo permanente desde un pozo cilíndrico, situado en un suelo uniforme e insaturado, se puede representar como:

$$Q_s = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \pi a^2 K_{fs} + \frac{2\pi H}{C} \phi_M$$

donde $Q_s(m^3s^{-1})$ es el flujo de recarga permanente, $H(m)$ es la carga hidráulica en el pozo, $K_{fs} (ms^{-1})$ es la conductividad hidráulica saturada de campo, $\phi_m (m^2s^{-1})$ es el potencial de flujo mátrico, $a(m)$ es el radio del pozo y C es un factor adimensional que depende de la relación H/a (Reynolds y Elrick, 1985).

El primer término de la ecuación anterior describe los efectos de la carga hidráulica en la zona saturada, el segundo los efectos de la gravedad, y el tercero la zona no saturada. Los dos primeros términos de la ecuación, representarían el componente saturado del flujo fuera del pozo y el tercero se referiría al componente insaturada o capilar del flujo.

La componente saturada del flujo crece en importancia relativa al incrementarse el radio del pozo (a), al aumentar la carga hidráulica en el pozo (H), al hacerse más gruesa la textura del suelo y también al incrementarse la humedad inicial del suelo.

Normalmente la K_{fs} es menor que la conductividad hidráulica saturada medida en laboratorio debido a que existen burbujas de aire atrapadas, las cuales quedan atrapadas en el suelo cuando se satura debido al proceso de infiltración, y resulta en un contenido en agua menor que bajo condiciones totalmente saturadas. La K_{fs} medida es más apropiada que la conductividad hidráulica saturada para la simulación de los procesos de infiltración debido a que representa más fielmente las condiciones de humectación en el campo. Reynolds y Elrick (1985) encontraron que los valores de K_{fs} son la media de las conductividades hidráulicas saturadas horizontales y verticales de muestras de suelo inalteradas.

Otra variable calculada con este método es el potencial de flujo mátrico ϕ_m , que se define como:

$$\phi_m = \int_{\psi_i}^0 K(\psi) d\psi \quad \psi_i \leq \psi \leq 0$$

donde $\psi(m)$ es el potencial mátrico en la porosidad del suelo, $\psi_i(m)$ es el potencial mátrico inicial en el suelo que rodea al pozo y $K(\psi)$ es la relación entre conductividad hidráulica y potencial mátrico al ser la última la medida de la capacidad del suelo de atraer agua, por

adsorción en las paredes de las partículas así como por capilaridad en los microporos, al atravesar una sección de área en una unidad de tiempo (Marshall *et al.*, 1996).

Otro parámetro necesario para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo es la C que es un coeficiente adimensional dependiente del radio del pozo, de la carga hidráulica y de la variación de Φ_m en profundidad y con la componente radial. Para poder calcularlo Reynolds y Elrick (1987) desarrollaron tres familias de curvas para calcular este factor en función de la relación H/a , estas tres familias son “suelos arenosos”, “suelos francos y arcillosos estructurados” y “suelos arcillosos desestructurados”, estas curvas parecen compensar adecuadamente el despreciar en las ecuaciones las interacciones gravedad capilaridad (Reynolds y Elrick, 1987).

Antecedentes

En México son escasos los trabajos acerca de las propiedades hidrológicas del suelo, destacando el de Oleschko y Chapa (1989) quienes encontraron en suelos tipo Andosol, que las propiedades hidrológicas, como la infiltración, conductividad hidráulica, sorptividad y capacidad de retención de humedad del suelo son seriamente afectadas por la labranza en comparación con suelos de bosques y suelos sin labranza, no explicando la causa ya que en el método utilizado, se altera la estructura original del suelo al trabajar en laboratorio.

Existen diversos factores ecológicos que pueden afectar la conductividad hidráulica. Imeson *et al.*, (1992) encontraron que los incendios forestales generan formación de sustancias hidrófobas en el suelo. En tanto Hallett y Young (1999) encuentran que los microorganismos segregan exudados hidrófobos y reducen la conductividad hidráulica de del suelo.

Actualmente existe controversia sobre los efectos de cambio de uso de suelo y la conductividad hidráulica. Al respecto Ilstedt *et al.*, (2007) realizaron un meta-análisis, acerca de la deforestación y la capacidad de infiltración, encontrando que en la mayoría de los trabajos revisados hubo un incremento de esta propiedad con la regeneración, aunque concluyeron que aun son muy escasos los trabajos relacionados con el cambio de uso de suelo y su regeneración. En contraste Zhou *et al.*, (2008) en un estudio de las propiedades hidrológicas de la superficie del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y con diversos

usos de suelo, encontraron que la conductividad hidráulica, es afectada principalmente por el cambio de uso de suelo, y los bosques presentan menor variación estacional.

Zimmermann y Elsenbeer (2008) estudiaron los efectos de disturbios naturales (deslizamientos de suelos) y efectos antropogénicos (cambios de uso de suelo de bosque a potreros) sobre la conductividad hidráulica y encontraron que la capa superficial registró los mayores cambios, no detectaron diferencias significativas por efectos de disturbios naturales, pero sí por efectos de cambios de uso, principalmente por ganadería. Encuentran que se requiere de una década de abandono de potreros para que estos recuperen su propiedad hidrológica.

INTERROGANTES

En México no existen estudios con respecto al cambio de uso de suelo de bosques templados y su efecto sobre la conductividad hidráulica del suelo, por ello en este trabajo se plantean las siguientes interrogantes:

- 1) ¿Los bosques de *Pinus*, *Abies* y Pradera de alta montaña, presentan la misma conductividad hidráulica y potencial de flujo mátrico del suelo?
- 2) ¿El cambio de uso de suelo de bosque a zonas de pastizal inducido afecta la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico del suelo?
- 3) ¿El disturbio antropogénico por tala afecta la conductividad hidráulica del suelo?
- 4) ¿Los incendios afectan la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico del suelo?
- 5) ¿La regeneración del bosque recupera la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico del suelo?

Para ello se plantearon las siguientes hipótesis y objetivos de trabajo.

HIPÓTESIS

- 1) Los bosques de *Pinus*, *Abies* y la pradera de alta montaña presentan diferente actividad biológica, por lo que la porosidad del suelo presentará diferencias que se reflejarán en la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico.
- 2) Los disturbios por cambio de uso, tala e incendios generan deshidratación de andosoles, compactación y sustancias hidrófobas, por lo que estas zonas presentarán menor conductividad hidráulica y potencial de flujo mátrico con respecto a los bosques.
- 3) La regeneración de los bosques incrementa las propiedades hidrológicas y mostrarán una tendencia hacia la recuperación de las propiedades hidrológicas.

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el efecto del cambio de uso del suelo e incendios sobre la conductividad hidráulica saturada y el potencial de flujo mátrico del suelo en el área de influencia de Parque Nacional Izta-Popo Amecameca, Estado de México.

OBJETIVO PARTICULAR

- Determinar la conductividad hidráulica saturada y el potencial de flujo mátrico del suelo en los bosques de *Pinus*, *Abies* y Pradera de alta montaña conservados.
- Estimar el efecto de disturbio (tala, incendio o cambio de uso de suelo) sobre la conductividad hidráulica saturada y el potencial de flujo mátrico en bosques de *Pinus* y *Abies*.
- Evaluar el efecto de la regeneración natural sobre la conductividad hidráulica saturada y el potencial de flujo mátrico en bosques de *Pinus*.

MATERIAL Y MÉTODO

Zona de estudio

Ubicación. El estudio se realizó en los bosques comunales de Amecameca los cuales son el parteaguas de una amplia zona de captación que alimenta y distribuye sus recursos hídricos tanto a la Cuenca de México, como al oriente del estado de Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra de Río Frío; pero también a la Cuenca que alimenta los valles de Cuernavaca, Cuautla y Yautepec en el Estado de Morelos, por lo que la conservación de la cubierta vegetal y el sustrato edáfico, es de importancia trascendental para regular la infiltración de agua al subsuelo y la intensidad de los escurrimientos, así como para suministrar el líquido a las numerosas comunidades establecidas en las partes bajas de las cuencas para su consumo doméstico, pero también para la realización de actividades agrícolas, pecuarias e industriales (Figura 3).

Geología. Esta área natural se localiza sobre el Sistema Neovolcánico Transmexicano, comprende la topografía del lugar por el volcán Iztaccíhuatl, de siete kilómetros de longitud, se distinguen de Norte a Sur, tres alturas: la cabeza, con 5146 metros de altura; el pecho, con 5286 metros y los pies, con 4740 metros; el Popocatepetl, es uno de los estratovolcanes, tiene la forma de un cono truncado hacia la cima. Está formado por una combinación de lavas, brechas, tobas y depósitos piroclásticos sin consolidar, basalto labradorítico, andesita de hiperstena y traquita (Macías 2005).

Edafología. Las unidades de suelo presentes en el área son suelos asociados con su origen volcánico, solo variando el grado de desarrollo hay presencia de Litosoles, Cambisoles, Regosoles, Fluvisoles y Andosoles siendo este el tipo de suelo predominante (CONANP, 2009), son suelos derivados de cenizas volcánicas y se han definido como suelos minerales que presentan un horizonte A de color entre pardo oscuro y negro, con un espesor promedio de 30 cm de estructura migajón fina o granular, con un contenido de MO de cerca del 8% en promedio y niveles superiores al 30% en los miembros más oscuros del grupo, texturas franco arenosa y pH moderadamente ácido. Se presentan suelos húmedos a perhúmedos con temperaturas variadas. En condiciones naturales presentan vegetación diversa dependiendo

del clima donde se desarrollen, puede ser de bosque templado húmedo a bosque tropical; en México son de amplia distribución a lo largo del eje Neovolcánico sosteniendo asociaciones vegetales de *Quercus*, *Pinus* y *Abies* (Cruz, 2000; WRB, 2000).

La buena estabilidad de los agregados de los Andosoles y su alta permeabilidad al agua hacen a estos suelos (relativamente) resistentes a la erosión hídrica. Excepciones a esta regla son los tipos de Andosol altamente hidratados que se secan drásticamente, por ejemplo: después de la deforestación. El material de suelo de la superficie se desmorona en gránulos duros (“granulación de alta montaña”) que es fácilmente removido con los escurrimientos superficiales. La dificultad para dispersar material en Andosoles causa problemas en el análisis de textura, por lo que se recomienda tener precaución al interpretar estos datos (WRB, 2000).

Por su contenido de materia orgánica y la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar andosoles húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas; también pueden formar andosoles vítricos en zonas con vegetación de coníferas cuando presentan más del 60% de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas (CONANP, 2009).

Clima. La variedad de climas abarca desde el templado húmedo hasta el muy frío, con lluvias en verano y la estación mas secas en invierno con ligeras variaciones en la precipitación y porcentaje de lluvia invernal.

La oscilación térmica anual varía entre los 5.0 °C y 18.0 °C, siendo el mes mas caluroso junio. La temperatura media del mes más frío varía entre -3.0°C y 18 °C y del mes más caliente entre los 6.5 °C y 20.0 °C.

Con temperatura media anual de 11.1 °C, registrándose los valores mas bajos en enero, febrero y diciembre, y los más altos en abril, mayo, junio, julio y agosto; la temperatura del mes más caliente es de 22.0 °C. Las heladas se presentan de noviembre a febrero.

La precipitación anual promedio es de 964.1 mm con presencia de canícula en agosto, siendo los meses más lluviosos junio y julio; el periodo de menor precipitación de noviembre a marzo, el número de días con lluvia en promedio es de 90 a 119.

La acción de vientos provenientes del golfo en el área, mantienen una humedad atmosférica entre el 50 y 60%, con presencia de neblinas. Los vientos dominantes presentan una dirección Este a Oeste. (Aguilar y Plateros, 2003)

Vegetación. El Parque Nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21,000 hectáreas de bosque conservado que representan 52.72% de la superficie total del parque), sino en la diversidad de su flora y fauna.

La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales de vegetación. Los bosques de coníferas son la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal alpino, vegetación herbácea de no más de 50 cm de altura que colinda con las nieves perpetuas (CONANP, 2009).

Hidrología. Los recursos hídricos que nacen en el Parque Nacional son originados principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial, abundante en la región, por arriba de los 1,000 mm anuales. Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa. También se produce gran filtración de agua que va a alimentar corrientes subterráneas, los ecosistemas de la Sierra efectúan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del Valle de Puebla-Tlaxcala y del valle Cuautla-Cuernavaca.

Fauna. En este Parque Nacional habitan 465 especies, de las cuales 23 son endémicas y 30 se encuentran bajo algún criterio de protección en la NOM-059-SEMARNAT-2001. Dentro del parque se encuentran 16 familias, 37 géneros y 51 especies de mamíferos. Ocho especies son endémicas; cuatro están bajo protección especial y una está amenazada. Los roedores son los mejor representados, incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros, como gato montés, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar; con menos especies se encuentran los insectívoros (musarañas), y finalmente los lagomorfos (conejos).

Se tienen registradas dos especies de víboras de cascabel *Crotalus tricseriatus* y *Sistrurus ravus*, esta última endémica y protegida. También se distribuyen especies como el alicante del Popocatepetl o dragoncito (*Barisia imbricata*), endémica y protegida; lagartijas como *Sceloporus aeneus*, *S. Mucronatus* y *S. grammicus*, protegida; víboras como *Thamnophis eques*, que se encuentra amenazada; *Thamnophis scalaris*, conocida como culebra listonada de montaña, especie endémica y amenazada.

Los anfibios están representados por los órdenes *Caudata* y *Salientia*; comprende tres familias: *Plethodontidae*, *Ambystomaitidae* y *Hylidae* y seis especies. El tlaconete leproso o salamandra (*Pseudoeurycea leprosa*) es una especie amenazada y endémica; el tlaconete regordete (*Pseudoeurycea cephalica*) está amenazado; la salamandra pie plano (*Chiropoterotriton chiropoterus*) es una especie endémica y protegida; el ajolote (*Ambistoma altamirani*) es endémico, mientras que la rana plegada (*Hyla alicata*) es una especie amenazada y endémica.

Algunas aves que se encuentran en la región son gavilancillo, aguilillas, correcominos, codorniz, lechuza, búho, cuervo, cenizote, jilguero, calandria, gorrión, azulejo, tórtola, coquito, chillón, tigrillo, primavera, carpintero, colibrí, chochoyota, seseto, cardenal, cacaxtle o chara, tordo y mulato. El grupo está representado por 10 órdenes, divididos en 31 familias, 104 géneros y 162 especies. De ellas, seis especies son endémicas y siete están protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2001, el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), la codorniz coluda (*Dendrortyx macroura*); el tecolote serrano (*Glaucidium gnoma*), el vencejo nuca blanca (*Streptoprocne semicollaris*), el clarín norteño (*Myadestes townsendi*), el mirlo pinta (*Ridgwayia pinicola*) y el gorrión serrano (*Xenospiza Bailey*); mientras que el tecolote cornudo (*Bubo virginianus*), se encuentra amenazado.

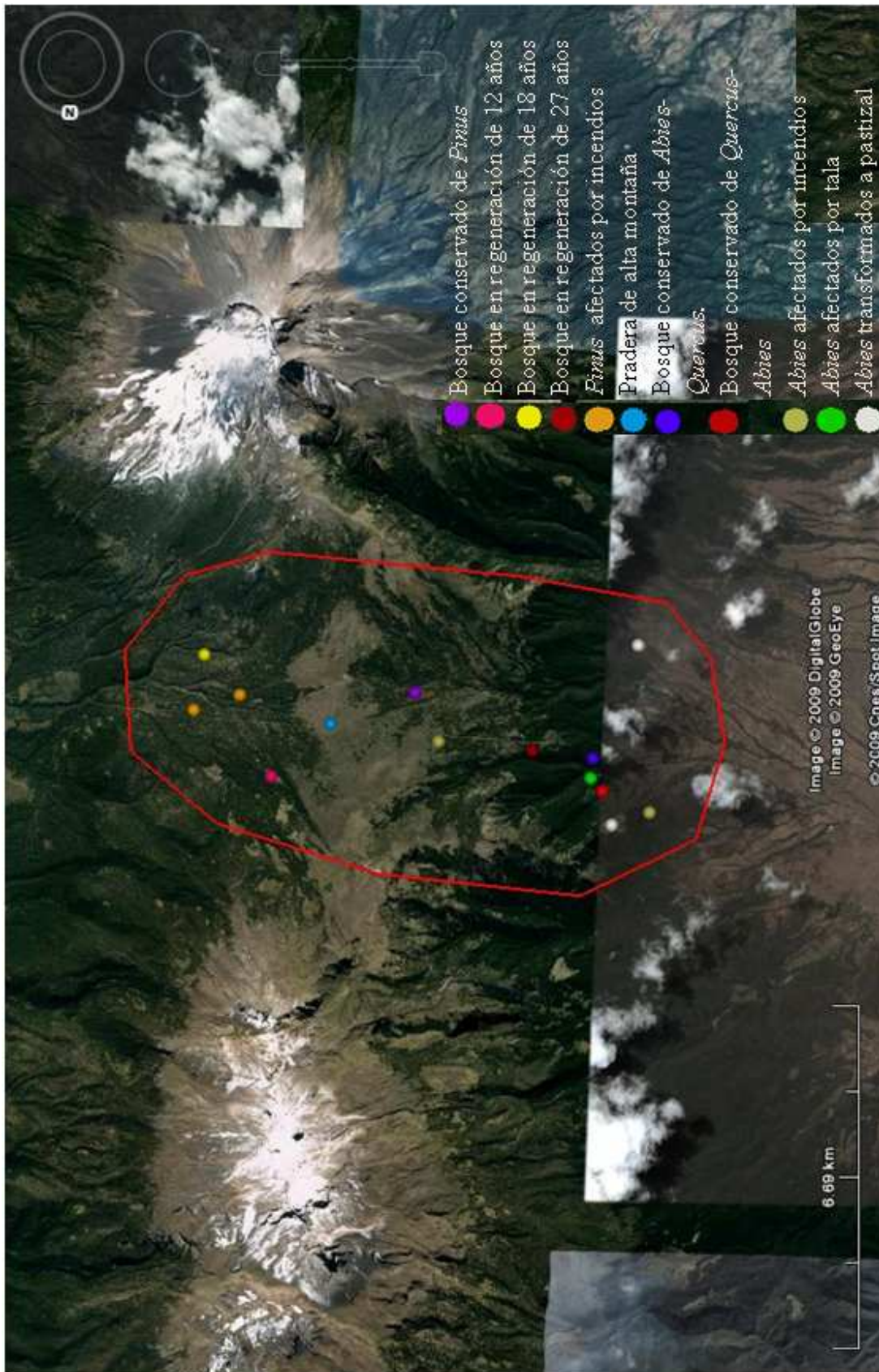


Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo.

Selección de sitios.

Se eligieron bosques de *Abies religiosa* y bosques de *Pinus hartwegii* con diferente grado de conservación, así como en una pradera de alta montaña, pertenecientes a la comunidad de Amecameca.

Se determinaron los siguientes grados de deterioro, considerando las siguientes características:

- Conservado. No muestra vestigios de tala (ausencia de tocones) o de incendios, bosques generalmente densos, en pradera de alta montaña solo presencia de zacatonal sin indicios de alteraciones como incendios.
- Talado. Hay presencia de tocones y residuos de ramas, existen pocos árboles adultos, bosques generalmente abiertos.
- Con incendio. Presenta vestigios de incendios recientes en la corteza de los árboles y en el estrato herbáceo.
- Pastizal inducido. Con apoyo de los pobladores se obtuvo el tipo de vegetación anterior y el tiempo en el que ocurrió el cambio.
- Con regeneración. Hay presencia de individuos jóvenes de manera natural sin haber sido reforestados, la edad del arbolado se determino con base en el conteo de verticilos.

En el bosque de Pino (Cuadro 1) se llevaron a cabo mediciones en bosque conservado, bosques afectados por incendio así como bosques que se encontraban en regeneración con árboles de 12, 18 y 27 años. La edad del arbolado se determino con base en el conteo de verticilos principales y con apoyo de los pobladores de la zona.

Para el caso del bosque de *Abies* (Cuadro 2) se reconocieron bosques conservados de *Abies* con árboles jóvenes de *Quercus* (bosque de *Abies-Quercus*), así como bosques conservados de *Quercus* con árboles de *Abies* (bosque de *Quercus-Abies*), bosques de *Abies* afectados por incendios, por tala y bosques transformados a pastizales.

También se considero una pradera conservada de alta montaña debido a que no presentaba vestigios de incendios, tala, pastoreo entre otros disturbios. De acuerdo con Rzedowski y Rzedowski (2001) esta pradera está conformada por especies de pastos de

pocos centímetros de altura, como *Festuca amplissima*, *Muhlenbergia macroura*, *Stipa ichu* y *Eryngium* spp. Se restringe en las montañas y volcanes más altos de la República Mexicana, a más de los 3,500 msnm, por arriba del límite de distribución de árboles y cerca de las nieves perpetúas.

Cuadro 1. Ubicación y grado de deterioro del bosque de *Pinus* y de una pradera de alta montaña

Vegetacion	Asociación vegetal	Grado de deterioro	Número de mediciones	Área (ha)	Latitud	Longitud	Altitud	
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	<i>Pinus</i> - Pastizal	Conservado	5	2325	--	--	--	
	<i>Pinus</i> - Pastizal Inducido	Afectado por incendio	10	3	19°05'0.06.6"	98°37'04.7"	3550	
					19°5'24.1"	98°37'35.5"	3583	
			12 años	2	0.3	19°6'15.5"	98°37'58.9"	3692
	<i>Pinus</i> - Pastizal inducido	Con regeneración	18 años	3	0.2	19°05'52.2"	98°40'54.5"	3341
27 años			6	0.2	19° 4' 59.3"	98° 37' 10.4"	3506	
Pradera de Alta Montaña		Conservado	5	1425	19°5'41.7"	98°38'35.6"	3670	

Cuadro 2. Ubicación y grado de deterioro de los sitios de bosque de *Abies*

Vegetación	Asociación vegetal	Grado de deterioro	Número de mediciones	Área (ha)	Latitud	Longitud	Altitud
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	<i>Abies-Quercus</i>	Conservado	3	850	19° 6' 6.0"	98°41' 40.1"	2933
	<i>Quercus-Abies</i>	Conservado	3		19° 6' 6.0"	98°41' 40.1"	2933
					18°57'26.2"	98° 43' 00.6"	2731
	<i>Abies</i>	Afectado por incendio	8	2	19°07'24.11"	98°43'10.8"	2761
					19° 6' 6.0"	98°41' 40.1"	2933
	<i>Abies</i>	Afectado por tala	3	2	19° 6' 6.0"	98°41' 40.1"	2933
	<i>Abies</i>	Transformado a Pastizal inducido	5	0.5	19° 6' 6.0"	98°41' 40.1"	2933
					19°4'42.3"	98°42'2.7"	2902

Determinación de la conductividad hidráulica

En cada sitio de estudio se ubicaron al menos 3 puntos de muestreo, considerados representativos. El número de puntos de muestreo estuvo determinado por la disponibilidad de fuentes agua para el permeámetro, pedregosidad y abundancia de raíces, del sitio (limita el número de toma de muestras) y el tiempo que toma cada lectura, cada punto de muestreo tuvo una distancia mínima 15 m entre cada punto.

Se realizaron mediciones de conductividad hidráulica y potencial mátrico con el permeámetro de Guelph modelo 2800, el cual determina la cantidad de agua que el suelo puede absorber por unidad de superficie y por unidad de tiempo expresada en cm/hora. Esto nos indica los litros de agua de lluvia que se infiltran en la zona de estudio.

Para la medición de la conductividad hidráulica en campo se hizo una evaluación y preparación del suelo al retirar la hojarasca hasta dejar expuesto el suelo. Posteriormente se realizó una perforación de 15 cm con los aditamentos incluidos en el permeámetro; se removio una cantidad de suelo con un taladro en sentido de las manecillas del reloj, el suelo se extrajo y con otra herramienta, la cual simula un vaso de volumen conocido y constante, se uniformiza el volumen de agujero. En el orificio se introduce un cepillo para simular la estructura de los poros propios del suelo y a continuación se introduce el permeámetro ensamblado.

El primer dato que se obtiene es con un nivel de 5 cm de agua en el hoyo y se midió la velocidad a la que se disminuye el agua del reservorio hasta que se estabilizó en un tiempo constante (H_1) al menos en tres intervalos consecutivos. Para la segunda lectura, el nivel del hoyo se estabilizo a 10 cm y se repitió el proceso de medición (H_2). Para estandarizar las mediciones se realizó la conversión a cm/min las cuales fueron R_1 y R_2 respectivamente con las cuales se obtuvo la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), el potencial de flujo mátrico y la sorptividad. (Cuadro 3).

Posteriormente se realizaron los siguientes cálculos de K_{fs} y Φ_m con las siguientes formulas:

Formulas:

$$R_1' = R_1/60 = \text{cm/seg}$$

$$R_2' = R_2/60 = \text{cm/seg}$$

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs})

$$K_{fs} = [(0.0041)(\text{Constante del reservorio})(R_2')] - [(0.0054)(\text{Constante del reservorio})(R_1')]$$

Donde R_1 = Lectura constante a un nivel de 5 cm.

R_2 = Lectura constante a un nivel de 10 cm.

Potencial de flujo mátrico (Φ_m)

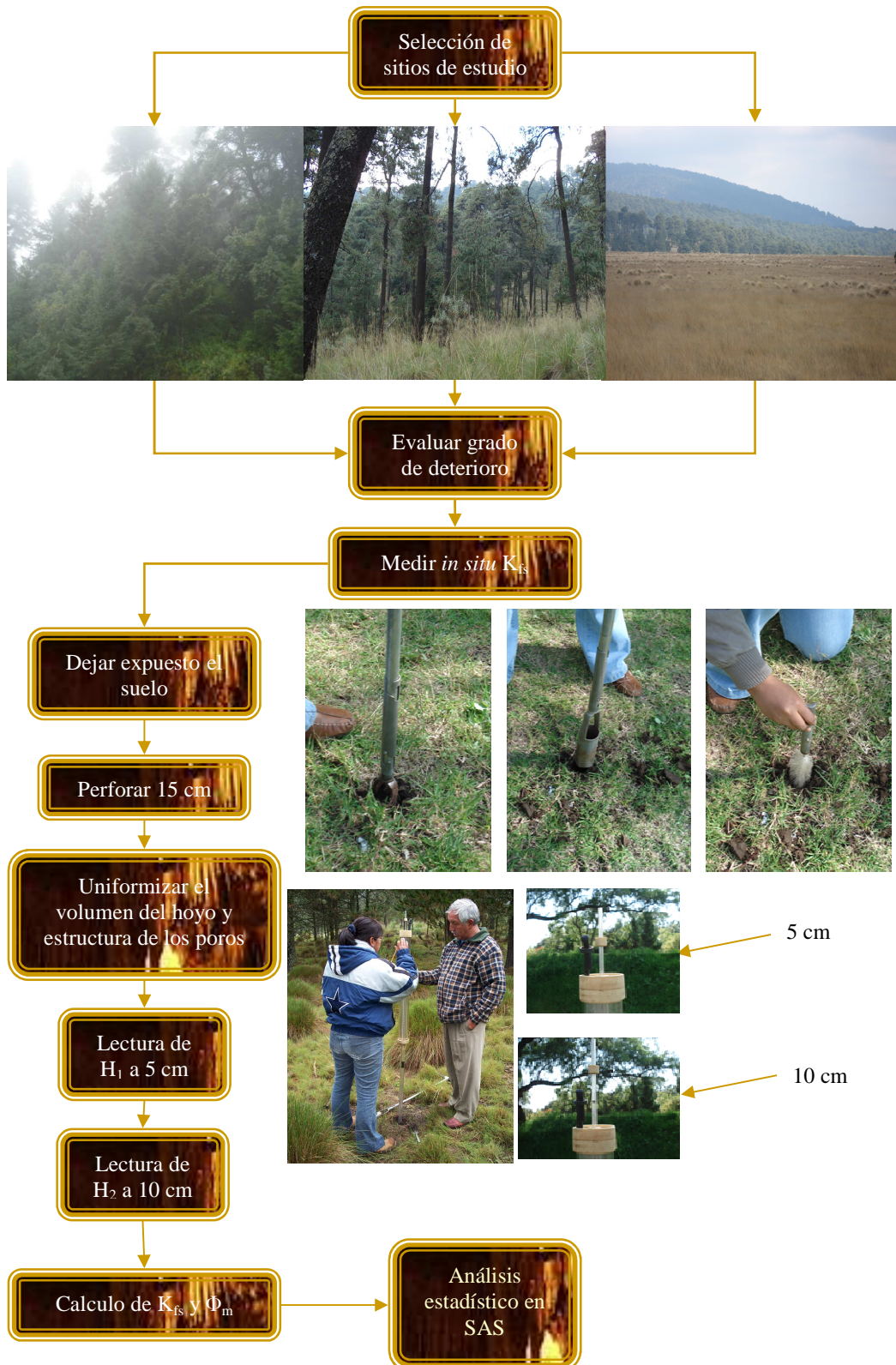
$$\Phi_m = [(0.0572)(\text{Constante del reservorio})(R_1')] - [(0.0237)(\text{Constante del reservorio})(R_1')]$$

Con esto se determinó la cantidad de agua que el suelo puede absorber por unidad de superficie y por unidad de tiempo expresada en cm/hora. Esto nos indicó los litros de agua de lluvia que se infiltraron en la zona de estudio.

Análisis Estadístico

Para detectar los efectos del cambio de uso de suelo sobre la conductividad hidráulica y potencial de flujo mátrico; se realizó un análisis de varianza con una prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05 entre sitios con diferente grado de deterioro, para determinar si las diferencias fueron significativas. El análisis se hizo con el programa SAS.

Diagrama de flujo



RESULTADOS

Se realizaron un total de 53 registros de los cuales 26 fueron en bosque de *Pinus*, 22 en bosque de *Abies religiosa* y 5 en pradera de alta montaña.

Bosque de *Pinus*

Efecto de los incendios

El bosque Conservado (BC) registro el mayor valor de K_{fs} ($0.0136 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.0172$) (media \pm desviación estándar) y el bosque afectado por incendio (BISUP) registro el menor valor de K_{fs} , $0.000689 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.00059$ (figura 4). Aun cuando existe una disminución promedio de casi un 90%, no se detectan diferencias significativas, debido a la desviación estándar tan grande.

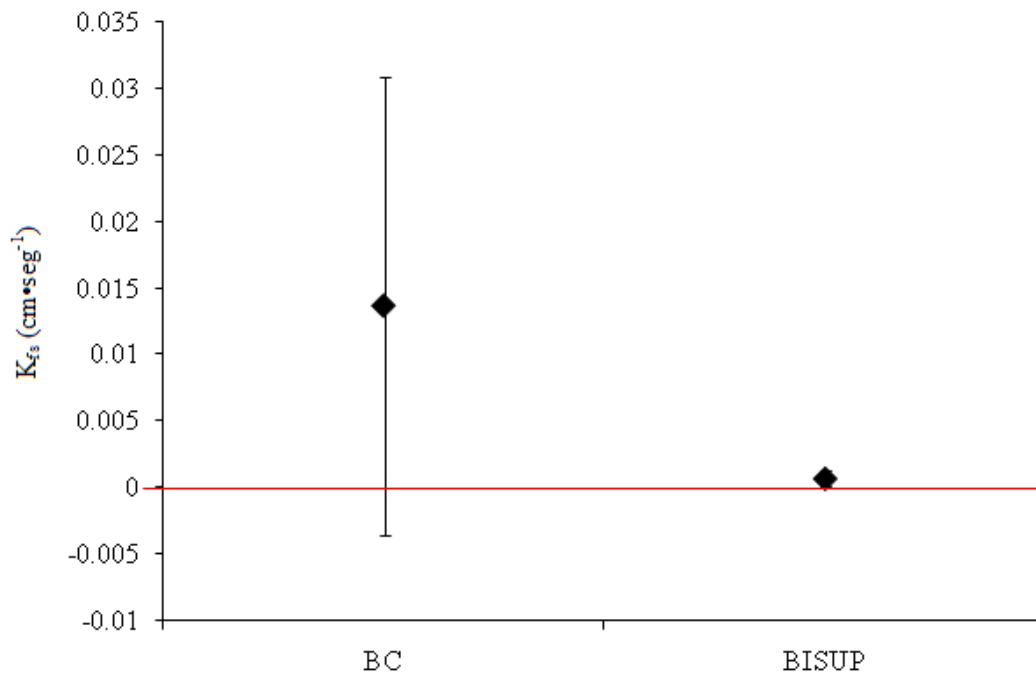


Figura 4. Efecto de los incendios sobre la conductividad hidráulica (K_{fs}) del suelo en bosque conservado de *Pinus hartwegii* (BC) y bosque afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo México.

En contraste en el bosque afectado por incendio, el potencial de flujo mátrico (Φ_m) se incremento, con respecto al bosque no afectado, presentando valores de $0.245232 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 1.5897$ y $0.2177 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.18766$ respectivamente (figura 5).

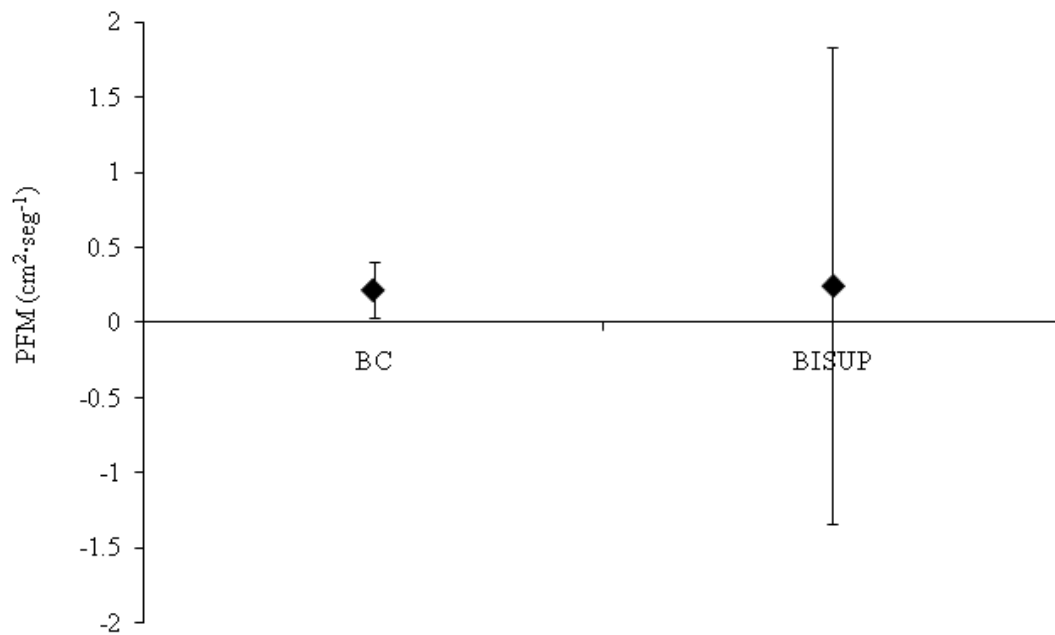


Figura 5. Potencial de flujo mátrico (PFM) del suelo de bosque conservado de *Pinus hartwegii* (BC) y bosque afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

Regeneración del bosque-Propiedades hidrológicas

La conductividad hidráulica se incrementó en forma proporcional con la edad de la regeneración del bosque, ya que registro valores de $0.00073 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.0003404$; $0.00251 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.001857$; y $0.00956 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.010639$, en bosques de 12, 18 y 27 años, respectivamente y en aproximadamente 30 años se recuperara la conductividad hidráulica (figura 6).

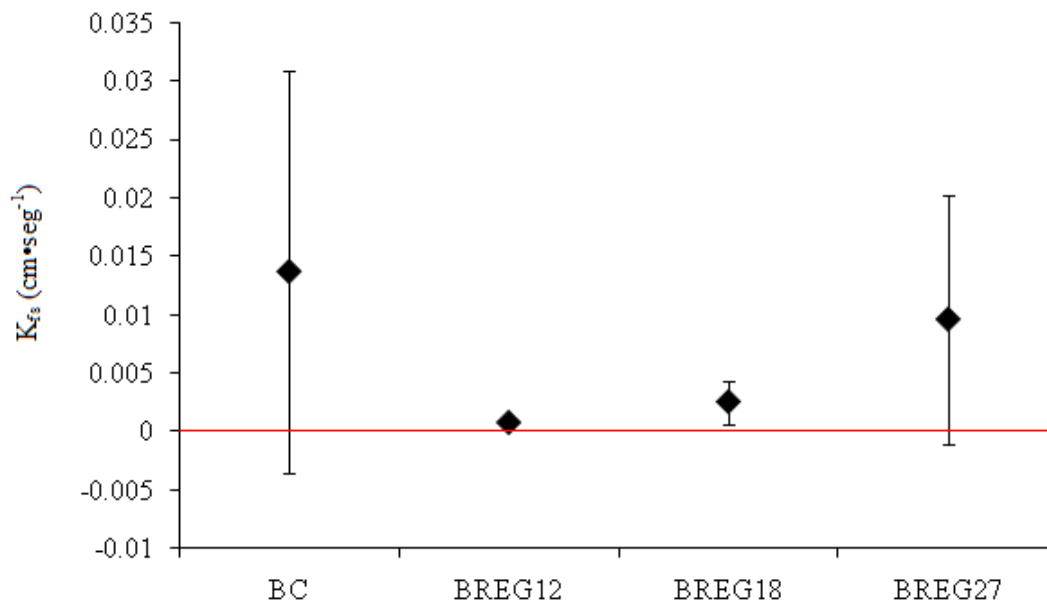


Figura 6. Efecto de la regeneración sobre la conductividad hidráulica del suelo de bosque conservado de *Pinus hartwegii* (BC) y bosque regenerado de 12, 18 y 27 años (BREG12, BREG18 Y BREG27, respectivamente) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

En bosques con regeneración el potencial de flujo mátrico aumenta al igual que en la conductividad hidráulica de $0.09099 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.2882$ (media \pm desviación estándar); $0.10360 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.001967$ (media \pm desviación estándar) y $0.172230 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.057988$ (media \pm desviación estándar) en bosques con 12, 18 y 27 años respectivamente (figura 7).

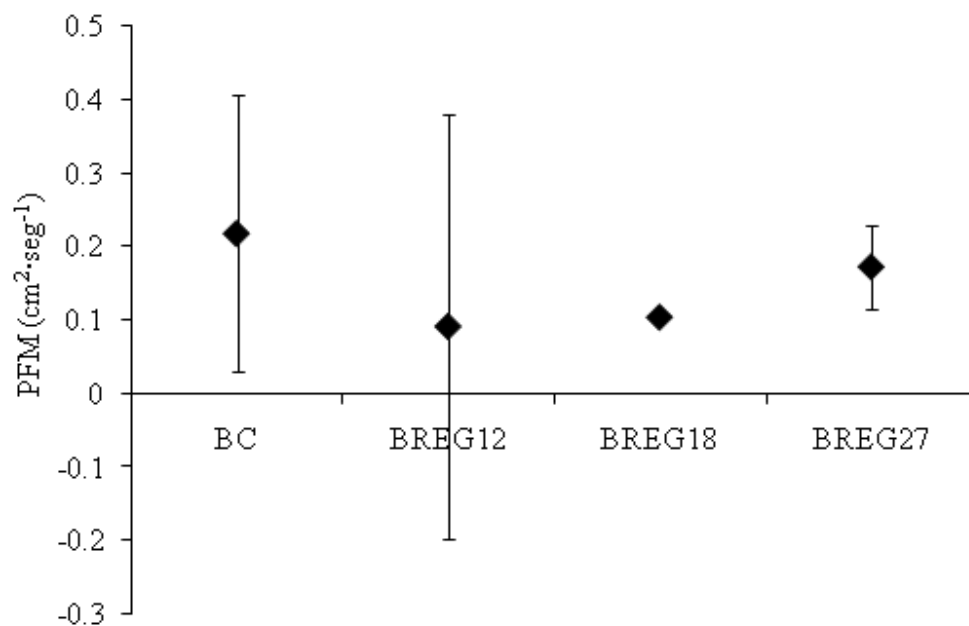


Figura 7. Potencial de flujo mátrico del suelo bajo bosque conservado de *Pinus hartwegii* (BC); bosque regenerado de 12, 18 y 27 años (BREG12, BREG18 Y BREG27, respectivamente) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

Bosque de *Abies*

Efecto del cambio de uso de suelo sobre K_{fs}

El bosque conservado de *Abies-Quercus* presento la mayor K_{fs} de $0.091 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.053215$ (media \pm desviación estándar) (figura 8) seguidas del bosque conservado de *Quercus-Abies* y el bosque de *Abies* totalmente deteriorado (pastizal inducido) registro el menor valor ($0.01918 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.03149$ (media \pm desviación estándar); y $0.001402 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.001373$ (media \pm desviación estándar); respectivamente). Con respecto al bosque conservado este ultimo presenta una disminución significativa del casi 99% (-0.089562 , $P \pm 0.05$) en esta propiedad

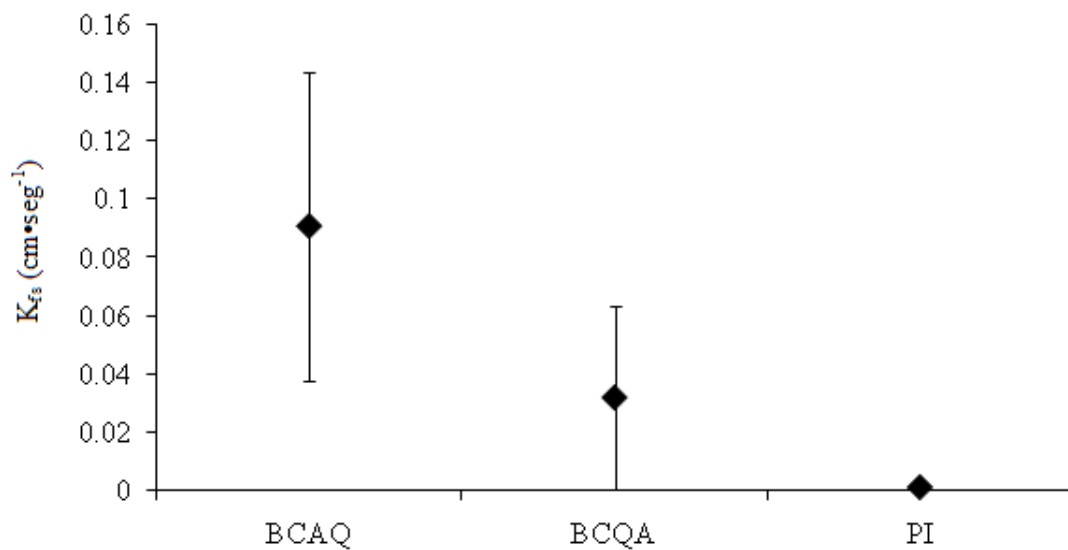


Figura 8. Efecto del cambio de uso de suelo sobre la K_{fs} (conductividad hidráulica) de suelos de: bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y Pastizal inducido (PI) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo, México.

Con respecto al potencial de flujo mátrico no siguió el mismo patrón que la conductividad hidráulica; el bosque conservado de *Quercus-Abies* fue el que presentó el mayor potencial de flujo mátrico, por el contrario el bosque conservado de *Abies-Quercus* fue el que presentó el menor valor, ($1.138168 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.726914$ (media \pm desviación estándar): $-0.0694176 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.36876$ (media \pm desviación estándar), respectivamente), el pastizal inducido registró $0.13297 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.025808$ (media \pm desviación estándar) (figura 9).

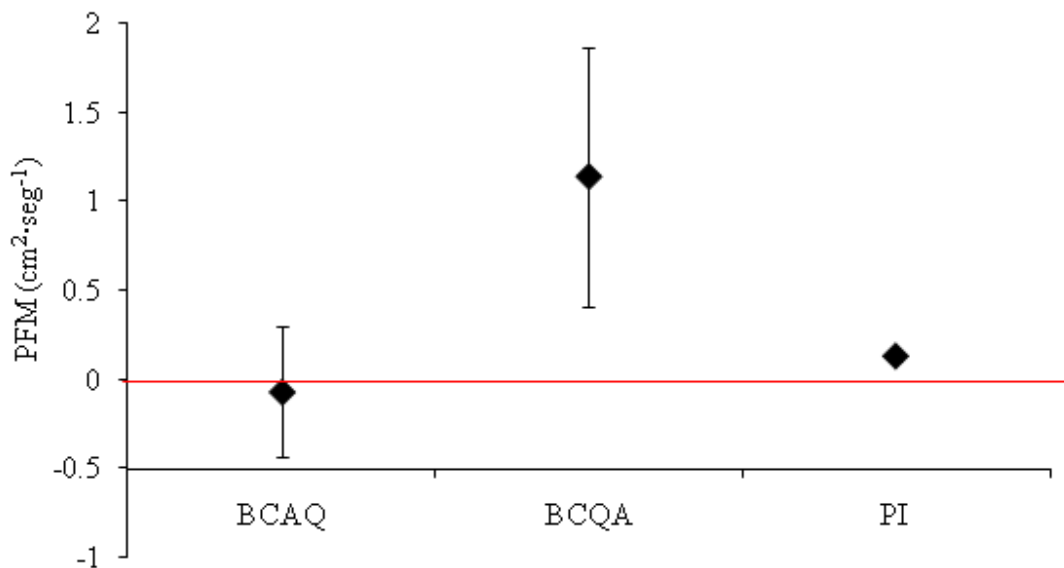


Figura 9. Potencial de flujo mátrico del suelo bajo bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y Pastizal inducido (PI) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

Efecto de los incendios

El bosque afectado por incendio superficial, en 2004, muestra que estos incendios disminuyen significativamente (-0.080912 , $P \pm 0.05$) en un 90% la conductividad hidráulica, con respecto al bosque no afectado $0.0140 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.01398$ (media \pm desviación estándar); 0.091 ± 0.05321 (media \pm desviación estándar) respectivamente (figura 10).

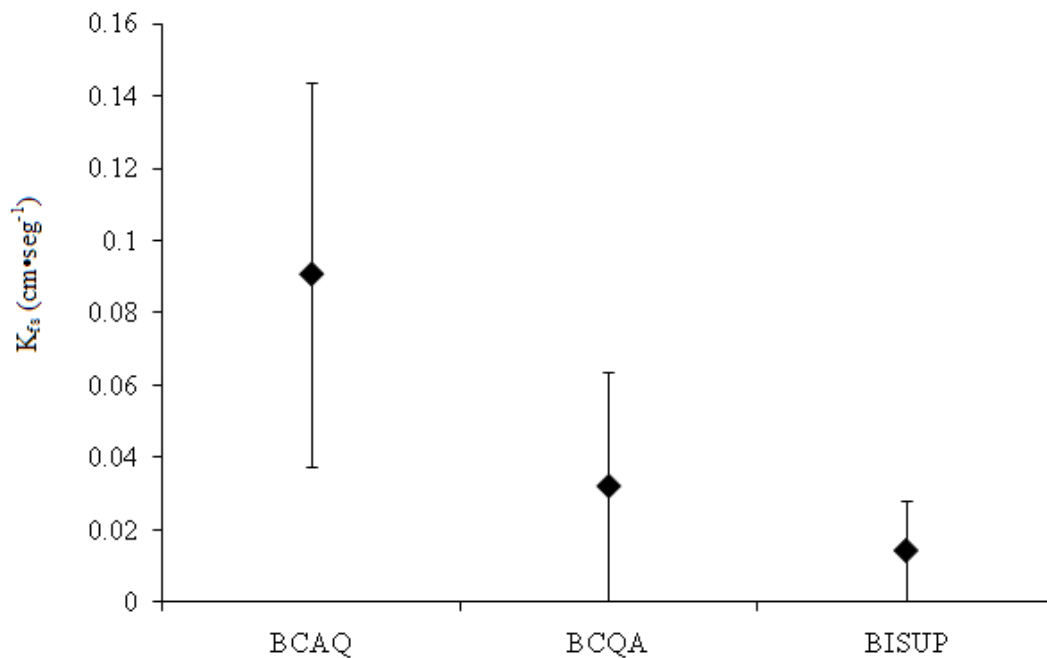


Figura 10. Efecto de incendios sobre la conductividad hidráulica del suelo de bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y bosque de *Abies* afectado por incendio (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

El potencial flujo mátrico en bosques afectados por incendio toma un valor medio con respecto a los bosque de *Abies* con asociaciones *Quercus-Abies* (BCQA) y *Abies-Quercus* (BCAQ) respectivamente con un valor de $0.46013 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.706812$ (media \pm desviación estándar) (figura 11).

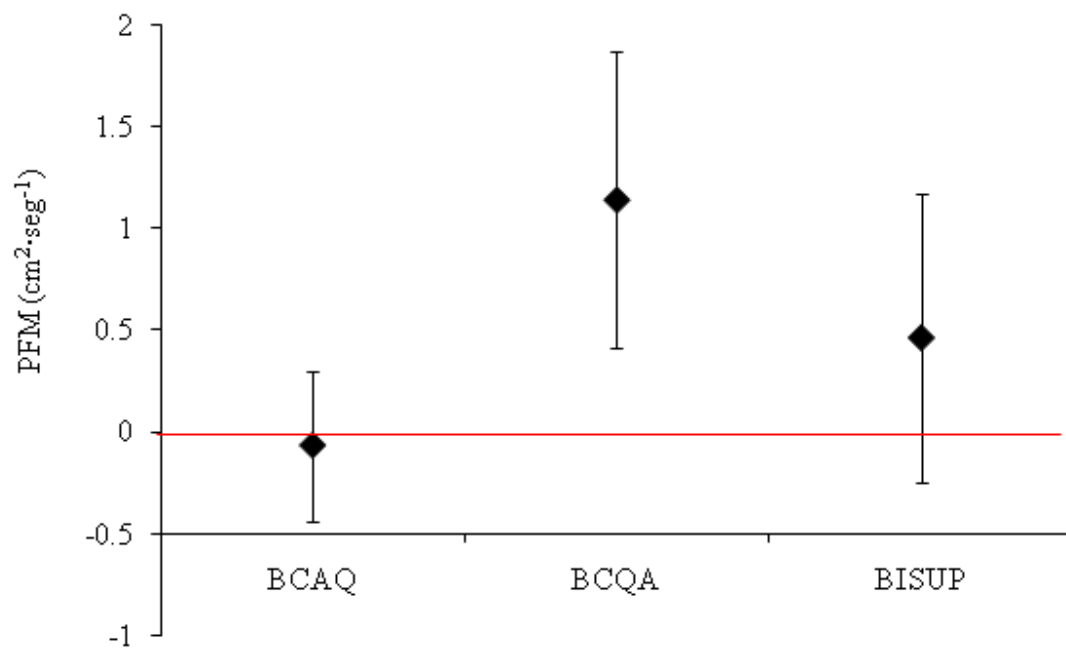


Figura 11. Potencial de flujo mátrico del suelo en bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y bosque afectado por incendio de *Abies* (BISUP) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

Efecto de la Tala.

El suelo del bosque afectado por tala, registro una disminución significativa (-0.076471 , $p \pm 0.05$) de la conductividad hidráulica hasta un 10%, con respecto al bosque conservado desde $0.091 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.05321$ (media \pm desviación estándar); hasta $0.019 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.0077$ (media \pm desviación estándar) respectivamente (figura 12).

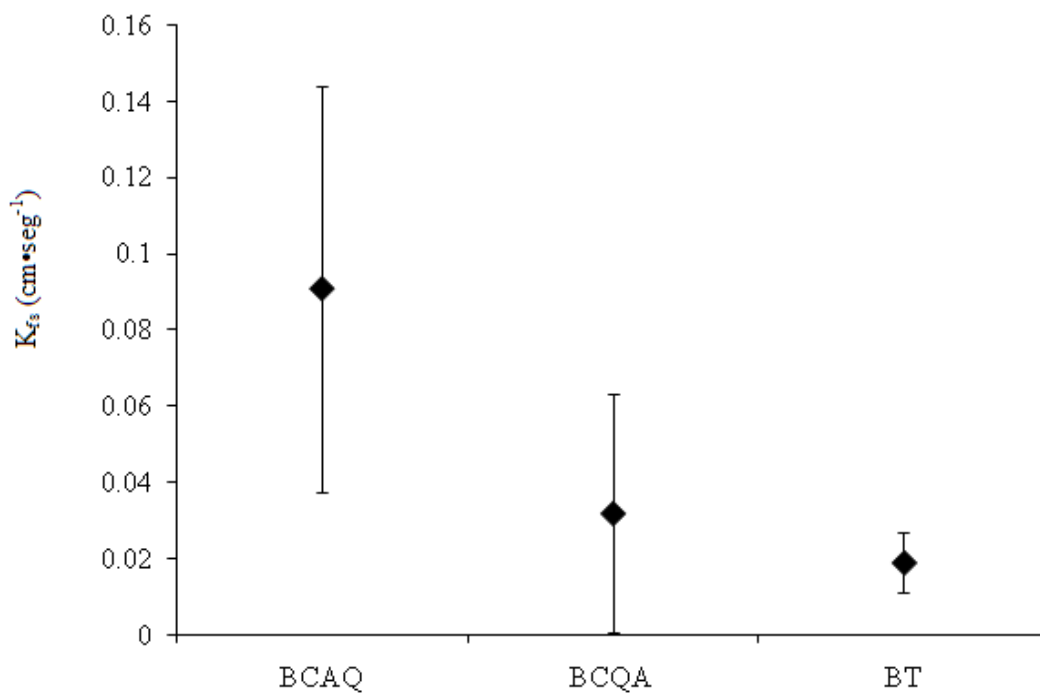


Figura 12. Efecto de la tala en la conductividad hidráulica del suelo de bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y bosque de *Abies* afectado por tala (BT) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

El bosque afectado por tala presenta un potencial de flujo mátrico de $0.01712 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \pm 0.04093$ (media \pm desviación estándar) (figura 13).

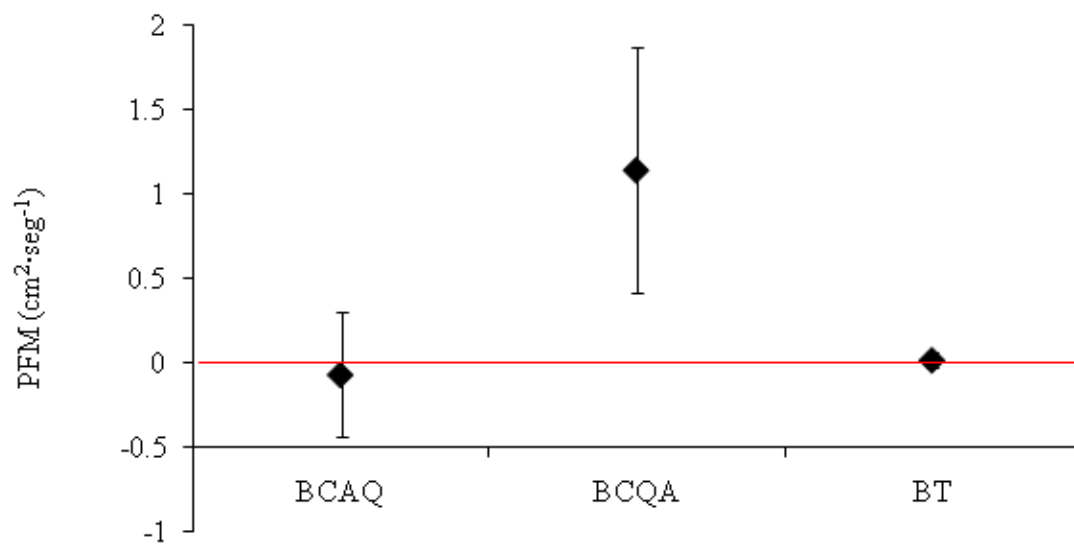


Figura 13. Potencial de flujo mátrico del suelo en bosque de *Abies* con asociaciones *Abies-Quercus* (BCAQ) y *Quercus-Abies* (BCQA) y bosque afectado por tala de *Abies* (BT) en el Área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. México.

Pradera de alta montaña

La pradera de alta montaña de *Muhlenbergia macroura* presento valores negativos en la conductividad hidráulica ($-0.00292015 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1}$) con una desviación estándar de 0.007816 lo que nos indica problemas de drenaje, también presento el valor de potencial de flujo mátrico más alto incluso de todas las localidades evaluadas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Conductividad hidráulica K_{fs} y potencial de flujo mátrico (Φ_m) en pradera de alta montaña (PAM).

Vegetación	K_{fs} $\text{cm}\cdot\text{seg}^{-1}$	Φ_m cm^2/seg
PAM	-0.00292015	1.29870668

K_{fs} = Conductividad hidráulica saturada

Φ_m = Potencial de flujo mátrico

DISCUSIÓN

Bosques de Pinus

Los bosques relativamente conservados presentaron el mayor valor promedio en conductividad hidráulica, $0.0136 \text{ cm}\cdot\text{seg}^{-1} \pm 0.01772$ ($81816 \pm 103204 \text{ L}\cdot\text{min}\cdot\text{ha}^{-1}$), lo que puede atribuirse a la textura franco-arenosa que presentan los suelos de estos bosques, (Granados 2003). Este tipo de textura proporciona una gran cantidad de macroporos, lo que se ha señalado como el factor más importante en el flujo del agua en el suelo (Reynolds *et al.*, 1995; Angulo-Jaramillo *et al.*, 1997; Cameira *et al.*, 2003). Otro factor que puede afectar la conductividad hidráulica es la vegetación con la gran emisión de raíces de diferente tamaño y forma, así como a la actividad de la fauna edáfica (Capowiez Y. *et al.*, 2009 Yao S. *et al.*, 2009 y Zarea M. J. *et al.*, 2009).

La alta variabilidad de la K_{fs} , parece deberse a la variabilidad de historia de disturbios en las zonas y a la diferente edad del arbolado de cada sitio, lo cual también se ha reportado en bosques europeos (Bens *et al.*, 2007 y Zhou *et al.*, 2008).

El disturbio antropogénico causado por fuego, en el bosque de pino afectado por incendio superficial, reduce en un 90% la conductividad hidráulica, esto es a solo $5780 \text{ L}\cdot\text{min}\cdot\text{ha}^{-1}$, pero también causa un aumento en el potencial de flujo mátrico. La disminución en la conductividad hidráulica y el incremento del potencial de flujo mátrico puede atribuirse según Rab (1996) a que los incendios, cuando alcanzan temperaturas mayores a $220 \text{ }^\circ\text{C}$, generan compactación de suelo, disminuyen los macroporos y la conductividad hidráulica pero aumenta el porcentaje de microporos y por tanto de retención de humedad.

Oleschko y Chapa, 1989, han registrado en Andosoles del centro de México, que la alta retención de humedad se pierde de manera irreversible cuando son sometidos a procesos de secado o deshidratación, en zonas de cultivo, debido al cambio estructural por la deshidratación de minerales como alofano e imogolita.

El disturbio por tala excesiva de bosques de pinos o su cambio a uso pecuario, a través de quemas, genera zonas de pastizal (Challenger 1998; Rzedowski 2001), en estas zonas la K_{fs} presenta valores mínimos, nulos o negativos, lo que indica que los problemas de drenaje alcanzan su máxima expresión (Reynolds 1985).

El proceso de regeneración de estos bosques favorece la recuperación de la conductividad hidráulica, ya que a mayor edad del arbolado se incrementa el valor de K_{fs} , y

los resultados mostrados indican que a una edad aproximada de 30 años esta propiedad del suelo se recupera. La recuperación de la K_{fs} se puede atribuir a que las raíces de pino fracturan el suelo compactado, además la hojarasca de pino tiene efectos alelopáticos sobre el zacatal ocasionando su mortalidad. Las raíces muertas de los zacatales incrementan la generación de espacios porosos, que aunado al incremento de la MO proporcionada por las raíces y por consecuencia al incremento de la micro y meso fauna edáfica, en conjunto generan una mejor estructura del suelo, permitiendo una mayor conductividad hidráulica y una mayor retención de humedad. Capowiez Y. *et al.*, 2009 Yao S. *et al.*, 2009 y Zarea M. J. *et al.*, 2009).

Bosques de Abies

Los bosques de *Abies* con sus asociaciones con encinos, registraron la mayor conductividad hidráulica y la mayor retención de humedad, con una media de $0.091 \pm 0.053215 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ ($544331 \pm 319293 \text{ L} \cdot \text{min} \cdot \text{ha}^{-1}$), así como un PFM de $0.5343 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$. Estos valores de K_{fs} y PFM se puede atribuir a que estos bosques se presentan en suelos con mayor contenido de material andesítico, que por su origen volcánico, presenta ciertas características, principalmente el tipo de roca, denominado piedra pómez: una multitud de poros y células cerradas dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. Su porosidad le permite absorber y retener el agua.

Cuando los bosques de oyamel se talan, disminuye la K_{fs} en un 90%, lo que se atribuye en parte a que el suelo queda más expuesto al sol ocasionando la deshidratación de los minerales alofano e imogolita, los cuales pierden volumen y por tanto su capacidad de absorción de agua (Campos *et al.* 2001). Además el incremento de hojarasca y ramas producto de la tala, genera una emisión de aceites y resinas, sustancias hidrófobas, lo que ocasionan además una reducción de la absorción de humedad de los agregados y por ello también disminuye el PFM.

Cuando los bosques de oyamel talados son afectados además por incendios, una práctica tipo rosa-tumba-quema, disminuye aún más su K_{fs} , pero su potencial de flujo mátrico se incrementa. Tal comportamiento puede deberse a que los incendios de este bosque generan compactación de suelo, reduciendo la macroporosidad, pero incrementan los poros de retención de agua (mesoporos y microporos), además las altas temperaturas del

incendio posiblemente destruyen las sustancias hidrófobas, y por tal motivo los agregados incrementan su capacidad de absorción de agua, como han encontrado DeBano (1998) y Doerr (2000) y Shakesby (2006).

Cuando los bosques de oyamel son transformados y cambia su uso de suelo forestal a uso pecuario, quedando como un pastizal inducido, en este la conductividad hidráulica disminuye hasta en un 99%, la K_{fs} que presenta es de $6958 \pm 5526 \text{ L}\cdot\text{min}\cdot\text{ha}^{-1}$, y el PFM tiene un valor medio de $0.1329 \pm 0.0258 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$. Estos bajos valores pueden explicarse si se considera que además de la deshidratación de mineral, compactación de agregados por tala e incendios, hay compactación por la actividad ganadera, pero además estos bosques también fueron recientemente sometidos a quemas controladas para eliminar arbolado plagado y enfermo, por lo que esta técnica de recuperación, no parece recuperar las propiedades hidrológicas del suelo, ni la restauración del bosque, es un problema físico del suelo.

Pradera de alta montaña

Mostro la mínima conductividad hidráulica y el mayor valor de potencial de flujo mátrico lo que indica que hay mayor retención de humedad atribuida a la tixotropía.

CONCLUSIONES

El disturbio antropogénico ocasionado por fuego en bosques de pino y oyamel, así como la tala de los bosques de oyamel ocasionan una disminución drástica, hasta en un 99%, del servicio ambiental hidrológico de los bosques comunales como zonas de recarga de acuíferos.

El mínimo valor de K_{fs} en zonas de pradera, indica que esta zona genera ríos, pero su función en la recarga de mantos freáticos debe ser estudiada con mayor profundidad.

El incremento en la K_{fs} de los bosques de pino durante su proceso de regeneración, indican que la K_{fs} se recupera cuando el arbolado alcanza 30 años aproximadamente.

Los bosques conservados de *Abies religiosa* o sus asociaciones con *Quercus*, registran los mayores valores de K_{fs} , por lo que son la vegetación más importante en la recarga de mantos freáticos y por lo tanto el de mayor valor en el servicio ambiental hidrológico.

LITERATURA CITADA

1. Aguilar V., Plateros G.P., 2003. *Monitoreo de Vegetación y Fauna en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan*. En: Memoria de la XIX Presentación de Trabajos de Investigación, Producción y Servicio de la Universidad Autónoma Chapingo. Dirección General de Investigación y Postgrado. Chapingo, México. pp.: 111-125.
2. Angulo-Jaramillo R., Moreno F., Clothier B.E., Thony J.L., Vachaud G., Fernandez-Boy E., Cayuela J.A., 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61, 27–32.
3. Baver L.D., Gardner N.H., Gardner W.R. 1973. *Física de Suelos*. Editorial UTHEA, 1ª edic. México.
4. Bens O., Wahl N.A., Fischer H. y Hüttl R.F. 2007. Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research*. **126**:101–109.
5. Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*. **70**:131-140.
6. Campos C.A., Oleschko K., Cruz H.L. Etchevers B. y Hidalgo M. C. 2001. Estimación de Alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de Montaña del Volcán Cofre de Perote. *Terra* **19**:105-116.
7. Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* **41**:711–717.
8. Challenger A. 1998. *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado Presente y Futuro*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre, S.C. México.
9. CONAFOR. 1999. *Informe de Incendios Forestales*. CONAFOR, México, D.F., 20 pp.
10. Cruz F.G. 2000. *Fertilidad del suelo y Nutrición vegetal: un enfoque ecológico*. Biología FES Zaragoza UNAM. México.

11. Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* **51**:33-65.
12. Donado L. D., 2004. “*Modelo de conductividad hidráulica en suelos*”. Tesis de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
13. FAO., 2001. *Conservation agriculture – Case studies in Latin America and Africa*. En: FAO Soils Bulletin No. 78. FAO, Roma. ISBN 92-5-104625-5.
14. FAO., 2005. *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. Boletín de Suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación No. 79 ISSN 1020-0657
15. Gavande S. A., 1972. *Física de Suelos*. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. p 199–232.
16. Granados D. M. R., 2003. *Calidad del suelo y estado nutrimental del género **Pinus** en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl*. Tesis de licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM; México.
17. Gurovich L. 1985. *Fundamentos y diseño de sistema de riego*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición, San José, Costa Rica. Capítulo 6. p. 143-168.
18. Hallett P.D. y Young 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*. **50**:35-40.
19. Hillel D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego.
20. Ilstedt U., Malmer A., Verbeeten E, Murdiyarso D. 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management* **251**:45-51.
21. Imeson A.C., Verstraten J.M., Van Mulligen E.J. y Sevink J. 1992. The Effects of Fire and Water Repellency on Infiltration and Runoff under Mediterranean Type Forest. *CATENA* **19**:345 361

22. Lozano J, Madero E., Tafur H., Herrera O., Amézquita E. 2005. La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el Valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA. *Acta Agronómica*, **54**:3 Colombia.
23. Macías J.L. 2005. *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario LVII:3.
24. Maderey R. L. 2005. *Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico Instituto de Geografía*. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Textos Universitarios, :1, México.
25. Marshall T.J., Holmes J.W., Rose C.W. 1996. *Soil Physics*. 3^o edition Cambridge University Pres
26. NOM-059-SEMARNAT-2001. *Norma Oficial Mexicana*. Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestre – Categorías de Riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación, Segunda sección de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
27. Oleschko K. y Chapa Guerrero J.R. 1989. Structural dynamics of a Mollic Andosol of Mexico under tillage. *Soil and Tillage Research*, **15**:25-40.
28. Pagiola S., Bishop J. y Landell-Mills N. 2006. *La venta de servicios Ambientales forestales Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) Instituto Nacional de Ecología (INE). 2^a edic. México.
29. Porta C.J. y López Acevedo R.M. 2003. *Edafología para la Agricultura y el medio ambiente: Para la Agricultura y el medio ambiente*. 3^o edic. Mundi-Prensa Libros, 2003
30. Rab M.A., 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*. **84**:159-176.
31. Reynolds W. D., Elrick D.E. 1987. A laboratory and numerical assessment of the Guelph Permeameter method. *Soil Science* **144**:292-299.

32. Reynolds W.D. y Elrick D.E. 1985. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*. **140**:292-301.
33. Reynolds W.D., Gregorich E.G., Curnoe W.E., 1995. Characterization of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. *Soil and Tillage Research*. **33**:117–131
34. Rzedowski J., Rzedowski G. C. de, y colaboradores., 2001. *Flora Fanerogámica del Valle de México*. 2ª ed. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Patzcuaro, Michoacán. México.
35. Shakesby R.A., Doerr S.H. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* **74**:269-30.
36. Velásquez A. Mas J. F., Díaz Gallegos J.R. 2002. Patrones y tasas de Cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* **62**:21-37 Instituto Nacional de Ecología DF, México.
37. West L.T. Abreu M.A., Bishop J.P. 2007. Saturated hydraulic conductivity of soils in the Southern Piedmont of Georgia, USA: Field evaluation and relation to horizon and landscape properties. *CATENA*. **73**:174–179.
38. Word Referente Base of Soil Resources (WRB). 2000. *International Society of Soil Science*. International Soil Reference and Information Centre. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
39. Yao S., Qin J, Peng X., Zhang B. 2009. The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil in China. *Ecological Engineering*. **35**:723-734.
40. Zareaa M. J., Ghalavanda A., Goltapehb E.M., Rejalic F., Zamaniyand M. 2009. Effects of mixed cropping, earthworms (*Pheretima sp.*), and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on plant yield, mycorrhizal colonization rate, soil microbial biomass, and nitrogenase activity of free-living rhizosphere bacteria *Pedobiologia* **5**:223-235.
41. Zhou X., Lin H.S. 2008. White E.A. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *CATENA* **73**:180–188.

42. Zimmermann B., Elsenbeer H. 2008. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance. *Journal of Hydrology* **361**:78– 95.
43. CONANP. <http://iztapopo.conanp.gob.mx> [Consulta 10/01/09]
44. FAO., 2007. *Situación actual de los bosques en el mundo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma [en línea] <http://www.fao.org/docrep/009/a0773s/a0773s00.htm> [Consulta 27/02/08].
45. SSSA. 2008. *Definitions of Soil Science Society of America* <https://www.soils.org/sssagloss/> [Consulta 29/11/08]