



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

***ECOHIDROLOGÍA DE UNA PRADERA
DE ALTA MONTAÑA EN EL PARQUE
NACIONAL IZTA-POPO***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:

SANDRA EDITH ALDANA PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN R. ANGELES CERVANTES

ASESORA EXTERNA:

DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

Proyecto financiado por: PAPIIT-IN-217308



Junio de 2012



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.

TODO

*Sí para recobrar lo recobrado
tuve que haber perdido lo perdido,
sí para conseguir lo conseguido
tuve que soportar lo soportado.*

*Sí para estar ahora enamorado
fue menester haber estado herido,
tengo por bien sufrido lo sufrido,
tengo por bien llorado lo llorado.*

*Porque después de todo he comprendido
que no se goza bien de lo gozado
sino después de haberlo padecido.*

*Porque después de todo he comprobado
que lo que tiene el árbol de florido
vive de lo que tiene sepultado.*

Santa Teresa de Ávila

DEDICATORIA

A mi maravillosa familia.

A mi mamá, Ma. Concepción Pérez Osorio, quién ha sido mi mayor fortaleza, mi máximo ejemplo de lucha y entereza ante cualquier adversidad. A ti mami, porque sin tu apoyo, entrega, dedicación y cariño, no hubiera sido posible alcanzar esta meta. A ti debo la vida y la satisfacción de cumplir este sueño; este triunfo es de las dos. Te amo mamita!!!

A mi hermana, Miriam Beatriz. A ti hermanita, por enseñarme que es la fuerza, valentía y convicción, por todo tu cariño y apoyo y por todos los inolvidables e increíbles momentos que hemos vivido juntas. Te amo Pingo!!!

A mi hermanita, Nancy Ivonne. A ti peque, por tu gran nobleza e inteligencia que te han caracterizado siempre; por ser uno de mis mayores motivos de seguir adelante y una de mis mas grandes razones de lucha, uno de mis mayores apoyos. Te amo, nunca lo olvides!!!

A mi sobrino, Ángel Gabriel. Pequeño hermoso, llegaste a colmar de bendiciones esta familia. A ti también, por iluminar y llenar de alegría todos los días con tu sonrisa y porque a través de tu inocencia y tu mirada seguimos descubriendo lo maravillosa que es la vida. Te adoro mi bebé!!!

A mi tía Argelia y a mis primas Karla Jaqueline, Paola Argelia y Jessica Ardel, por todos los grandes y bellos momentos que hemos vivido juntas. Las quiero un montón chamacas!!! Y que viva el ochoamiento!!!

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida y permitirme cumplir este objetivo.

A la UNAM, institución que ha sido mi segunda casa y me dio la oportunidad de realizar mis estudios profesionales. México, Pumas, Universidad!!!...

Al Dr. Efraín R. Angeles Cervantes, por darme la oportunidad de realizar mi tesis profesional y por transmitirme sus experiencias profesionales y conocimiento.

A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, por ser parte fundamental en este trabajo y por sus enseñanzas profesionales.

A los profesores: M. en C. Manuel F. Rico Bernal, Dra. Rosalva García Sánchez y M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo y sus observaciones con el fin de mejorarlo.

A mi maravillosa familia... A ti mamá, por todo el esfuerzo y sacrificios que has hecho con tal de ayudarme y apoyarme para cumplir esto que es mi máximo logro en la vida. A ustedes hermanitas, que siempre me han apoyado incondicionalmente. Y por supuesto, al pequeñito Gabis, por darnos muchas nuevas e increíbles experiencias y tanta felicidad.

A la Familia Pérez Zúñiga, por siempre, a pesar de todo, estar presentes.

A la Familia Ponce Espinoza, por su apoyo en momentos difíciles y por su gran amistad durante tantos años.

A mi gran amiga Alejandra G. Mecalco Martínez, por brindarme tu amistad incondicional, darme tu apoyo y ser mi consejera; gracias por todos los gratos momentos juntas. Te quiero amiwi!!!

A mis compañeros de generación por muchos buenos momentos que pasé durante la carrera. En especial a mis amigos B. Berenice Herrera León, J. Lizeth Melo Hinojosa, J. Antonio González Olmedo y Raziél K. Rodríguez González.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, por su colaboración en el trabajo de campo y/o por los momentos tan agradables que se han compartido. A Ericka Roxana, Adriana Vallejo, Juan Poblano, Tania González, Diana Jiménez, Sacnité Chávez, Elizabeth González, Jesús Lugo, Diana Celene, Marisol Martínez, Pedro Lorenzo, Armando, Yanin, Valeria, Mariana Zamudio, Steph, Luis. También a Anayeli Mora, Diana Moreno.

A mis amigos Cereza J. Rosas, Paty Amézquita y Jonathan Santiago, porque a pesar del tiempo y la distancia hay amistades que perduran.

A todas y cada una de las personas que se han cruzado en mi camino y me han brindado su amistad, su apoyo o algún consejo. A quienes en algún momento han ayudado o tenido algún gesto amable con mi familia. A Fray Ricardo Navarro Galindo. A Angélica Maya Lazcano.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	III
INDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	1
2.1 Importancia ecológica e hidrológica del PNIP	3
2.2 Pradera de alta montaña (PAM)	3
2.3 Andosoles	5
2.4 Propiedades químicas y mineralógicas de los Andosoles	6
2.5 Propiedades hídricas del suelo	6
2.6 Micromorfología	8
2.7 Hidróxidos y corrección de acidez de suelos	15
	16
3. PROBLEMÁTICA	18
4. OBJETIVOS GENERALES	19
4.1 OBJETIVOS PARTICULARES	19
5. ZONA DE ESTUDIO	20
5.1 Parque Nacional Izta-Popo (PNIP)	20
5.2 <i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	24
6. MÉTODO	25

6.1 Selección de sitios de muestreo	25
6.2 Diagnóstico de las propiedades hídricas	26
6.3 Determinación de la hidrofobicidad, diagnóstico de la acidez y requerimientos de alcalinizante	28
6.4 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos	30
a) Propiedades hídricas	30
b) pH y densidad aparente	31
c) Desarrollo de <i>P. hartwegii</i>	32
6.5 Análisis de datos	33
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
7.1 Diagnóstico de las propiedades hídricas	34
7.2 Determinación de la hidrofobicidad, diagnóstico de la acidez y requerimientos de alcalinizante	38
7.3 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos	42
a) Propiedades hídricas	42
b) Análisis nutrimental	49
c) pH y densidad aparente	49
d) Desarrollo de <i>P. hartwegii</i>	54
8. DISCUSIÓN GENERAL	60
9. CONCLUSIONES	61
10. ESTUDIOS A FUTURO	63
11. LITERATURA CITADA	62

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Clasificación del WDPT.	29
Cuadro 2. Clasificación de suelos en cuanto a su pH (NOM-021-RECNAT-2000).	29
Cuadro 3. Procedimiento para determinar requerimientos de alcalinizante.	30
Cuadro 4. Número de unidades de muestreo por cada tratamiento.	32
Cuadro 5. Propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) de un Andosol de PAM del PNIP.	35
Cuadro 6. Nivel de nutrimentos del suelo de PAM del PNIP.	44
Cuadro 7. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) de un Andosol de PAM del PNIP.	49
Cuadro 8. Características de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. (media \pm desviación estándar) en PAM del PNIP.	56
Cuadro 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el desarrollo de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. (media \pm desviación estándar) en PAM del PNIP.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Vista aérea del Parque Nacional Izta-Popo.	20
Figura 2. Ubicación de sitios de muestreo en Paso de Cortés, Parque Nacional Izta-Popo.	25
Figura 3. Individuos de <i>Pinus hartwegii</i> con desarrollo deficiente en los sitios de muestreo en zonas reforestadas en 1998.	26
Figura 4. Permeámetro Guelph.	28
Figura 5. Conductividad hidráulica en otras PAM de México, en Andosoles a nivel internacional y en otros tipos de vegetación.	36
Figura 6. Requerimientos de alcalinizante para un suelo de PAM del PNIP.	41
Figura 7. Curva de equilibrio de KOH 0.04 N.	41
Figura 8. Efecto de la adición de hidróxidos en la conductividad hidráulica saturada del suelo de una PAM del PNIP.	45
Figura 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el potencial de flujo mátrico del suelo de una PAM del PNIP.	45
Figura 10. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la infiltración superficial (0 a 5 cm de prof.) del suelo de una PAM del PNIP.	46
Figura 11. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la infiltración a una profundidad de 5 a 10 cm del suelo de una PAM del PNIP.	46
Figura 12. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el contenido de humedad del suelo de una PAM del PNIP.	47
Figura 13. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el porcentaje de porosidad (secciones delgadas) del suelo de una PAM del PNIP.	47

Figura 14.	Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas con luz semicruzada, que muestran un Andosol vítrico de PAM del PNIP.	50
Figura 15.	Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de KOH.	51
Figura 16.	Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$.	52
Figura 17.	Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	53
Figura 18.	Efecto de la adición de hidróxidos sobre el pH del suelo de una PAM del PNIP.	55
Figura 19.	Efecto de la adición de hidróxidos sobre la densidad aparente del suelo de una PAM del PNIP.	55

RESUMEN

Las praderas de alta montaña del Parque Nacional Izta-Popo son consideradas zonas de recarga de acuíferos, sin embargo, no existen estudios sobre las propiedades hídricas de los suelos ni su relación con la vegetación. A pesar de que los Andosoles son suelos con alta productividad, en esta zona se ha observado que individuos de reforestaciones realizadas en años anteriores presentan escaso desarrollo, por lo que se propone como hipótesis que existen alteraciones en las propiedades hídricas y una fuerte acidez, y el uso de hidróxidos es una alternativa de solución, por lo que los objetivos de este trabajo fueron: i) Determinar las relaciones ecohidrológicas entre las propiedades hídricas del suelo y el crecimiento de *Pinus hartwegii* Lindl. en una pradera de alta montaña y ii) Evaluar el uso de hidróxidos en la restauración de propiedades hídricas de un Andosol, con el fin de mejorar el desarrollo de *P. hartwegii*. En las praderas de alta montaña de Paso de Cortés se obtuvieron *in situ* 36 registros de K_{fs} e infiltración, y se determinó el nivel de hidrofobicidad por el método WDPT. Se colectaron muestras de suelo para conocer su estado nutrimental, su pH real y potencial, densidad aparente y porcentaje de humedad, así como muestras de suelo inalteradas para su análisis micromorfológico. Se evaluó el efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídricas, acidez y desarrollo de *P. hartwegii*; para ello se aplicaron KOH y $Al(OH)_3$ en concentraciones de 25, 30 y 35 ppm y $Ca(OH)_2$ a 10, 15 y 20 ppm, en el suelo con individuos de *P. hartwegii*. Los resultados mostraron que el suelo de esta zona es ligeramente hidrófobo y fuertemente ácido (pH=3.83), lo que favorece la disponibilidad de Al^{3+} , su toxicidad y, debido a que forma complejos, ocasiona su floculación y limita la disponibilidad del agua, lo que en su conjunto provoca escaso crecimiento de plantas de *P. hartwegii*. La adición de hidróxidos disminuyó el nivel de hidrofobicidad y modificó la microestructura del suelo, de microagregados entre granos a bloques subangulares, provocando un cambio favorable sobre las propiedades hídricas. El tratamiento de KOH a una concentración de 35 ppm incrementó la K_{fs} de 118.68 a 1029 $L \cdot seg^{-1} \cdot Ha^{-1}$, la tasa de infiltración a una profundidad de 5-10 cm de 8170 a 10 433.33 $L \cdot seg^{-1} \cdot Ha^{-1}$. El KOH a 30 ppm aumentó la porosidad total de 22 a 34.58 %. La longitud foliar se incrementó con KOH a 25 ppm, de 7.18 a 13.52 cm. Este trabajo demuestra que el uso de hidróxidos es una alternativa viable para la restauración del servicio ambiental hidrológico y tener un mayor éxito en las reforestaciones.

Palabras clave: Andosol, conductividad hidráulica, infiltración, hidrofobicidad, *Pinus hartwegii*.

1. INTRODUCCIÓN

Las praderas de alta montaña se consideran como tanques de almacenamiento de agua y zonas de recarga de acuíferos (CONANP, 2009). Estas praderas están dominadas por zacatonales y sus raíces emiten sustancias que incrementan la acidez del suelo (Pajares *et al.*, 2004; Chagué-Goff *et al.*, 2010) lo que permite altas concentraciones de Al^{+++} en los sitios de intercambio iónico (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001; Mourier *et al.*, 2008), y en consecuencia se generan condiciones adversas o tóxicas para las plantas; además, alteran las propiedades hídricas del suelo debido a que se forman complejos que floculan y limitan el movimiento y almacenamiento del agua y la recarga de acuíferos.

Algunas deficiencias o problemas del suelo, tales como la acidez, compactación o disminución de las propiedades hídricas, comúnmente suelen corregirse mediante la utilización de sales básicas o hidróxidos.

Por otra parte, las propiedades hídricas del suelo que permiten el flujo del agua y por lo tanto el servicio ambiental hidrológico son: conductividad hidráulica, infiltración, sorptividad, retención de humedad, densidad aparente, potencial de flujo mátrico (Lipiec *et al.*, 2009). También se ha señalado que el tamaño, forma y distribución de poros (Shaxson y Barber, 2005) y la hidrofobicidad influyen en la penetración del agua al suelo y en su disponibilidad (Duque-Zapata *et al.*, 2004).

En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y Anexas (PNIP), se ubican praderas de alta montaña y zacatonales sobre Andosoles, los cuales son suelos que presentan altos valores en las propiedades hídricas, debido a su composición mineralógica, y se ubican dentro de los más productivos a nivel mundial (Shoji *et al.*, 1993; Prado *et al.*, 2007); sin embargo, esta productividad y sus propiedades se pierden cuando el suelo es deshidratado por efecto del sol o por incendios.

La pradera de alta montaña de Paso de Cortés anteriormente era bosque de *Pinus* y se ubica en una zona de recarga de acuíferos (Almeida-Leñero *et al.*, 2007) y la vegetación e incluso en las reforestaciones de *Pinus hartwegii* Lindl. muestran problemas en su desarrollo. Es probable que en esta zona, como ocurre en otros Andosoles del Eje Neovolcánico, existan alteraciones en las propiedades

hídricas y problemas de acidez del suelo; sin embargo, no existen estudios al respecto, por lo que surgen las siguientes interrogantes:

¿Qué valores presentan las propiedades hídricas del suelo (infiltración, conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico, retención de humedad y densidad aparente) de las praderas de alta montaña del PNIP?

¿Qué hidróxido (KOH , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y en que concentración, puede disminuir la acidez, mejorar las propiedades hídricas del suelo de las praderas y favorecer el crecimiento de *Pinus hartwegii*?

Las respuestas a estas interrogantes permitirá determinar las propiedades hídricas del suelo, y evaluar alternativas de solución para incrementar el desarrollo de *P. hartwegii*, así como desarrollar estrategias para restaurar el servicio ambiental hidrológico en el origen de la cuenca hidrológica del Pánuco, en uno de los principales sistemas montañosos de la Faja Volcánica Transmexicana.

2. ANTECEDENTES

La ecohidrología es la ciencia que estudia las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota, enfocadas al manejo equilibrado del sistema. Los ecohidrólogos conciben una regulación del hidrosistema, utilizando simultáneamente los procesos ecológicos e hidrológicos para salvaguardar la integridad ecológica global en condiciones alteradas (Diez-Hernández, 2008).

Asimismo, se enfoca a las vinculaciones entre las plantas y el ambiente abiótico a partir del ciclo hidrológico, interacciones mutuas importantes en muchos ecosistemas. Un aspecto importante de la investigación en ecohidrología es la evaluación y predicción de la presencia de especies vegetales o tipos vegetacionales en relación con la hidrología o condiciones hidrogeoquímicas del hábitat (Peters *et al.*, 2005).

2.1 Importancia ecológica e hidrológica del PNIP

La región de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y la Sierra Nevada es de enorme importancia desde el punto de vista de la prestación de servicios ambientales, en donde sus boques son clave para la captación de dióxido de carbono, la generación de oxígeno y la regulación del clima.

La ubicación del parque en el centro del Eje Volcánico Transversal le confiere una serie de características propias de la confluencia de las regiones neártica y neotropical, como son alta biodiversidad y la presencia de endemismos. Aunado a esto, su marcado gradiente altitudinal, que va de 3,000 msnm a 5,500 msnm (con la segunda y tercera cumbres más altas de México) ha generado las condiciones para que en poco espacio ocurra una gran diversidad de ecosistemas: bosques mixtos de pino, oyamel y encino, pradera de alta montaña (muy rara en un país intertropical) y glaciares.

Además, las boscosas montañas del PNIP captan y filtran el agua que abastece a dos importantes cuencas hidrológicas: la cuenca del Pánuco y la cuenca del Balsas, al mismo tiempo que generan una vigorosa red hidrográfica

fundamental para el suministro de agua de las poblaciones, zonas industriales y valles agrícolas vecinos.

Los recursos hídricos que nacen en este parque nacional son originados principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial que generalmente es mayor a 1000 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, permitiendo la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del Valle de Puebla-Tlaxcala y del Valle Cuautla-Cuernavaca.

El parteaguas de la Sierra Nevada es el origen que divide las aguas tributarias del Océano Atlántico (Golfo de México) de las del Océano Pacífico, formando dos de las más importantes cuencas de nuestro país (la del Valle de México y la del alto Balsas), y varias subcuencas que abastecen comunidades y municipios que rodean el parque nacional. Hacia la parte occidental descienden gran cantidad de arroyos que van a desembocar al norte de la Sierra Nevada en la antigua zona lacustre de la subcuenca Chalco y Lago de Texcoco, los cuales, a través del Gran Canal del Desagüe son tributarios del Río Tula y a su vez éste del Pánuco que desemboca en el Golfo de México. Hacia el sur de la Sierra Nevada las corrientes que descienden contribuyen a formar el Río Cuautla que alimenta la subcuenca del Río Nexapa tributaria de la cuenca del Balsas.

En la vertiente oriental los escurrimientos conforman la subcuenca del Río Atoyac, tributaria también de la cuenca del Balsas, misma que desemboca en el Océano Pacífico.

Los escurrimientos superficiales y subterráneos de la Sierra Nevada, conforman las trayectorias fluviales, subcuencas y cuencas hidrológicas que permiten la vida humana y la actividad económica en un sinnúmero de asentamientos, desde el México central (la región más poblada del país), hasta las desembocaduras (CONANP, 2009); de ahí su importancia hidrológica, ya que 17 millones de personas viven de la extracción de los acuíferos formados en las laderas de los volcanes (Contreras, 2006), razón por la cual, la protección y

conservación de los ecosistemas de la Sierra Nevada adquiere gran relevancia (CONANP, 2009); sin embargo, Castro-Alonso (2009) registró problemas de infiltración y conductividad hidráulica en los zacatonales y praderas de alta montaña en el PNIP. Asimismo, en esta zona se ha observado que existen plantaciones de *P. hartwegii*, los cuales presentan escaso desarrollo, por lo que es necesario realizar investigaciones más particulares acerca de las propiedades hídricas del suelo, de la importancia de la acidez del suelo y su corrección para la recuperación de la productividad de los zacatonales y bosques, así como de su servicio ambiental hidrológico.

2.2 Pradera de alta montaña (PAM)

En cuanto a la terminología usada, Rzedowski (1978) denomina este tipo de vegetación como pastizal alpino o zacatonal alpino. En México, su distribución está restringida a las montañas y volcanes más altos, desarrollándose por encima del límite altitudinal de los bosques de coníferas, de los 3800 a los 4500 m de altitud (SEMARNAT, 2000; Almeida *et al.*, 1994).

En el centro de México ocupa las laderas altas de las principales montañas, coincidiendo con el área de distribución de dos principales tipos de vegetación: el pinar abierto de *Pinus hartwegii* y el pastizal subalpino. De acuerdo con la clasificación climática de Köpen, modificado por García (1981), el clima corresponde al tipo ET (frío). Las precipitaciones superan los 1300 mm anuales, con dos estaciones: una seca de noviembre a marzo y una humedad de mayo a octubre. La nieve se presenta durante el invierno. La temperatura es inferior a los 10 °C en todos los meses del año. La composición y estructura del pastizal está dada por pastos altos y amacollados de *Festuca toluensis*, *Muhlenbergia macroura* y *M. nigra*, entre otras especies, genéricamente conocida como zacatonales, son un elemento principal del paisaje (García-Romero, 2004).

La hidrología de las praderas de alta montaña, tiene características específicas debido a las circunstancias climáticas especiales, a los suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, a la topografía, formada por la acción de los glaciares, y a la capacidad de la

vegetación para almacenar y absorber agua del aire (van der Hammen, 2008). En general, las praderas de alta montaña se desarrollan en suelos derivados de cenizas volcánicas o Andosoles (Poulenard *et al.*, 2001; De Bièvre, 2006)

2.3 Andosoles

El término deriva del japonés *An*=oscuro y *Do*=suelo. Son suelos formados por materiales ricos en vidrio volcánico, de color oscuro; característicos de los afloramientos de cenizas volcánicas y formados fundamentalmente por complejos alófono-humus. Se les encuentra sobre rocas eruptivas consolidadas, con elementos vítreos que al ser alterados liberan suficiente cantidad de elementos amorfos susceptibles de fijar la materia orgánica (Duchaufour, 1984).

En estos suelos la materia orgánica desempeña un papel esencial; además, los compuestos minerales amorfos la estabilizan y la protegen contra la biodegradación microbiana, lo que provoca su acumulación en el perfil. Esta formación masiva de complejos órgano-minerales amorfos, es independiente de la vegetación y está regida exclusivamente por el factor clima (principalmente por la humedad constante del clima desprovisto de periodo seco) y por el factor material mineral, que es siempre de naturaleza volcánica (Porta y López, 2003)

Los dos componentes fundamentales de los Andosoles son minerales amorfos y la materia orgánica humificada, resultante de procesos de insolubilización de los precursores; y los alófonos, silicatos de alúmina mal cristalizados (Duchaufour, 1984; García-Calderón *et al.* 2007).

2.4 Propiedades químicas y mineralógicas de los Andosoles

La formación de un Andosol es un proceso muy rápido resultante de la gran área superficial de la ceniza volcánica que es el material materno, la cual bajo condiciones húmedas se comporta en forma única, El proceso principal es la hidrólisis que intemperiza la ceniza volcánica inicialmente en palagonita amarilla, parda o anaranjada. Se piensa que la palagonita es un aluminosilicato amorfo que contiene calcio, magnesio y potasio, pero que, cambia con rapidez a alófono.

Después de la hidrólisis se forman también óxidos amorfos y microcristalinos de hierro y aluminio, que están distribuidos en el suelo con bastante uniformidad.

La ceniza volcánica está compuesta de minerales fragmentados y de ellos predomina el vidrio volcánico, el cual muestra muy poca resistencia al intemperismo químico. Por su composición, los minerales secundarios que se forman son aluminosilicatos no cristalinos en los que predominan alófano, imogolita y ferrhidrita y acomplejaciones de humus-aluminio.

El termino alófano es el nombre genérico que se da a un grupo de minerales no cristalinos del tamaño de la arcilla y que incluye en su composición química silicio, aluminio y agua ($Al_2SiO_5 \cdot nH_2O$). Es un aluminosilicato no cristalino que no tiene una composición química definida, pero presenta una relación atómica Al/Si entre 1 y 2. Con base en esto, en la naturaleza existen alófanos ricos en aluminio (Al/Si=2:1) y ricos en silicio (Al/Si=1:1). Los que muestran abundante aluminio están ligados a la imogolita por tener el mismo arreglo atómico y composición química pero diferente morfología y los que ostentan exceso de silicio tienen silicatos polimerizados y algunos grupos ortosilicatos. Se señala que el alófano y la imogolita se forman en ambientes edáficos que presentan pH_{H_2O} entre 4.9 y 7.0 (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001).

El alófano se encuentra en muchos suelos, pero es común en los formados de materiales volcánicos. Los elementos del ambiente que controlan la formación del alófano son primordialmente el material geológico, la vegetación y el clima.

En condiciones naturales los suelos con alófano poseen un volumen grande pero cuando acontece una deshidratación esta disminuye de manera notable. La cantidad de agua que requieren estos suelos es muy alta, y es resultado del volumen grande y de poros pequeños que predominan. Los suelos con alófano conservan una carga eléctrica permanente baja y una carga eléctrica alta subordinada al pH, por lo que se les califica de carga eléctrica variable.

El otro proceso principal es la humificación parcial de la materia orgánica y la formación del complejo estable con alófano. Este tipo de suelos se desarrolla en condiciones aeróbicas y tienen un flujo de agua hacia abajo, pero debido al

contenido alto de alófono tienen una elevada capacidad de retención de agua (FitzPatrick, 1985).

La acumulación de carbono orgánico es otra propiedad de muchos Andosoles. La estabilidad de la materia orgánica parece que ocurre por la formación de complejaciones del aluminio con el humus y por la adsorción de las sustancias húmicas al alófono o la imogolita. Estos procesos tienen una participación importante en la formación de horizontes melánicos y fúlvicos.

Los Andosoles son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como un alto contenido de materia orgánica; 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 de 60% de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas (CONANP, 2009).

Las propiedades de los Andosoles están fuertemente determinadas por la naturaleza de su fracción coloidal. Se ha observado que en ambientes fríos y húmedos, la fracción coloidal de estos suelos está constituida por complejaciones de humus-aluminio o por alófono/imogolita. Las complejaciones humus-aluminio se forman principalmente en ambientes ricos en carbono orgánico y que presentan pH ácido (Porta y López, 2003).

2.5 Propiedades hídricas del suelo

La vitalidad de un bosque y su función hidrológica depende de las propiedades hídricas del suelo. El movimiento de agua en el suelo está en función de sus propiedades hídricas, las cuales determinan la capacidad de este de conducir y almacenar el agua. Las propiedades hídricas del suelo son: conductividad hidráulica, infiltración, potencial de flujo mátrico, permeabilidad, abundancia y tamaño de poros y densidad aparente (van der Salm *et al.*, 2007).

A nivel mundial se han realizado diversos estudios relacionados con las propiedades hídricas en Andosoles.

Conductividad hidráulica (K) y permeabilidad. La conductividad hidráulica es un parámetro que mide la habilidad del suelo para transmitir agua y cuantifica la habilidad del material para transmitir agua bajo condiciones estándar y en unidades (presión, longitud, área). La conductividad hidráulica bajo condiciones saturadas es llamada *Conductividad hidráulica saturada* (K_{sat}) y es la condición más fácil de evaluar. Este dato de referencia es el que más se utiliza para comparar el movimiento del agua en diferentes suelos. La conductividad hidráulica es un coeficiente matemático específico (cuantitativo) que relaciona la tasa de movimiento de agua al gradiente hidráulico (USDA, 2002).

Los métodos e instrumentos para determinar la K_{fs} son variados. Fontes *et al.* (2004) realizaron mediciones de la conductividad hidráulica de un Andosol europeo, en monolitos de suelo y a través de la ecuación de Mualem–van Genuchten, registrando valores de 120 y 150 $cm\ dia^{-1}$, además, que la medición de este parámetro en laboratorio no resulta confiable debido a que las propiedades de los alófanos contenidos en el suelo cambian cuando este se seca. Touma *et al.* (2007) obtuvieron la conductividad hidráulica saturada con un infiltrómetro de un solo anillo a partir de ecuaciones e indican que la medición de la K_s tiene un error de aproximadamente 10% al valor obtenido que fue de 15.37, 1.317, 0.21 y 0.044 $cm\ hr^{-1}$ para suelos arenosos, arenoso-limoso, limoso y arcilloso respectivamente; mientras que De Bièvre *et al.* (2006) determinaron *in situ* la conductividad hidráulica para un Andosol de los Andes de Ecuador, por medio de un infiltrómetro de tensión, y obtuvieron valores entre 0.52 a 5.3 $mm\ hr^{-1}$.

Recientemente también se ha utilizado el permeámetro Guelph, el cual permite realizar registros de K_{fs} , potencial de flujo mátrico e infiltración *in situ*; con ello es posible obtener mediciones con mayor precisión y también comparar estas propiedades en diferentes sitios y zonas ecológicas.

La K_{fs} es afectada por uso de suelo o incendios forestales. Al respecto Poulénard *et al.* (2001) realizaron ensayos de lluvia en dos praderas de alta montaña de Ecuador y estimaron indirectamente la K_{fs} entre 60 y 70 $mm\ hr^{-1}$, y encuentran que la K_{fs} se reduce en las zonas agrícolas o afectadas por incendio. En otro estudio, en suelos de origen volcánico bajo diferentes rotaciones de cultivo

en el Valle Central, Chile, Sandoval *et al.* (2007) realizaron mediciones de parámetros hidráulicos encontrando que los valores de K_{fs} variaron entre 0.14 y 1.13 cm h^{-1} .

También, la conductividad hidráulica puede ser afectada por la acidez del suelo. Nakagawa e Ishiguro (1994) determinaron el efecto del pH en la conductividad hidráulica saturada de un Andosol alofánico, y encontraron que a pH muy ácido o muy básico, la K_{fs} disminuye. Resultados similares fueron hallados por Ishiguro y Nakajima (2000) quienes adicionaron soluciones de HNO_3 y H_2SO_4 a un Andosol alofánico, registrando valores de $1.7 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ para HNO_3 a pH 3, 7.5×10^{-5} para HNO_3 a pH 4, 1.1×10^{-5} para H_2SO_4 a pH 3 y 6.9×10^{-6} para H_2SO_4 a pH 4, concluyendo que la conductividad hidráulica disminuye drásticamente por las condiciones ácidas del suelo.

Infiltración. Es el proceso de entrada, generalmente vertical, de agua a través de la superficie del suelo. Con el agua penetran en el suelo las sustancias que lleva disueltas y en suspensión. Al iniciarse una lluvia, un riego o llegar una corriente de agua sobre el suelo seco, la entrada tendrá lugar en condiciones no saturadas, principalmente bajo la influencia de los gradientes de potencial matricial por diferencias en el contenido de aguas, y en menor medida, de la gravedad.

La velocidad de infiltración es la tasa o velocidad a la que el agua entra en el suelo en cada instante. Es la cantidad de agua infiltrada por unidad de superficie y de tiempo (Porta y López, 2003).

En el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México, Ángeles-Cervantes (2010) reportó una infiltración de $194 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ para un Andosol de la zona de bosque no afectado.

Castro-Alonso (2009), para una pradera de alta montaña del Parque Nacional Izta-Popo, reportó una conductividad hidráulica de $0.002 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ y un potencial de flujo mátrico, más alto que en los bosques conservados, con valor de $1.29 \text{ cm}^2/\text{seg}$.

Potencial de flujo mátrico (Φ_m) y Sorptividad (S). El potencial de flujo mátrico es la medida de la habilidad del suelo para atraer el agua, por fuerza de capilaridad, en una unidad de área y por una unidad de tiempo. La sorptividad es la medida de la habilidad del suelo de absorber un líquido; en general, un valor alto de S indica un gran volumen de agua que ha sido absorbido y que ha ocurrido rápidamente. Estas son, esencialmente, dos maneras de describir un mismo fenómeno (Soilmoisture Equipment Corp., 1991).

Cuando el suelo no está saturado, el agua se encuentra sometida, por una parte, a la acción de la fuerza de gravedad, haciendo que se desplace a zonas más profundas, y por otra parte, a una serie de fuerzas de retención, que tienden a fijar sus moléculas a la pared del suelo. El potencial de flujo mátrico entonces será el balance entre el agua que desciende y la que queda retenida en un determinado lugar.

En suelos de origen volcánico de Chile, Sandoval *et al.* (2007) registraron que el potencial de flujo mátrico (Φ_m) oscila entre 0.36 y 3.6 cm²·h⁻¹.

Densidad aparente. Es la razón de la masa del suelo al volumen total según Baver *et al.* (1980). La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo y se calcula con el peso seco del suelo dividido por su volumen. Este volumen incluye el volumen de las partículas del suelo y el volumen de los poros entre las partículas del suelo. La densidad aparente es típicamente expresada en g/cm³ (USDA, 2008).

Al respecto Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) reportaron para un Andosol de Texcoco, Edo. de México, una densidad aparente menor a 1 g cm⁻³. En tanto que Campos-Cascaredo *et al.* (2001) estudiaron un Andosol de montaña del volcán Cofre de Perote, registrando para la densidad aparente valores de entre 0.31 y 1.0 g cm⁻³. Asimismo, señalan que los valores bajos de densidad aparente y la formación de microagregados estables al agua en un Andosol de montaña, sustentan una porosidad alta, y por lo tanto una permeabilidad alta.

Abundancia y tamaño de poros. La porosidad es una de las propiedades del suelo con mayor importancia, ya que varios procesos tales como el movimiento del agua, la capacidad de retención de agua y su disponibilidad para las plantas, dependen de su tamaño, distribución, continuidad y porcentaje dentro del perfil. El grado de estructura presente en un suelo dado determina la cantidad y dimensiones de los poros. En general, se define el espacio poroso como la fracción del volumen del suelo ocupada por los componentes líquido y gaseoso. Generalmente, este espacio poroso representa más o menos un 50% del volumen total de un suelo cercano al ideal. Existen dos clases principales de poros según sus dimensiones: poros grandes no capilares y poros pequeños capilares. Mientras que los primeros no retienen el agua por capilaridad, los segundos sí efectúan fuertemente esta retención. En efecto, en un suelo saturado de agua, el conjunto de sus vacíos (porosidad total) está lleno de agua. Esta se escurre por gravedad de los espacios más grandes que entonces se llenan de aire (fracción gaseosa). Cuando el suelo cesa de escurrir, el conjunto de espacios llenos de aire constituyen la macroporosidad (no capilar). Los espacios más pequeños o capilares retienen aún el agua y su volumen representa la microporosidad o porosidad capilar (López, 2000).

La variación en el tamaño y su abundancia tiene una influencia importante sobre el tipo de actividades que ocurren dentro de los poros del suelo. Los poros que varían entre 0.0002 y 0.05 mm de diámetro retienen agua que puede ser absorbida por las plantas; se llaman poros de almacenamiento; mientras que los poros más pequeños, o poros residuales, retienen tan fuertemente el agua que las plantas no la pueden extraer de los mismos. Los poros mayores de 0.05 mm de diámetro, conocidos como poros de transmisión, permiten que el agua drene a través del suelo y permita la entrada de aire a los mismos a medida que el agua es drenada. Los espacios de poros también son necesarios para que las raíces penetren libremente al suelo a fin de tomar nutrientes y agua; estos tienen diámetros de 0.1 a 0.3 mm (Shaxson y Barber, 2005).

Índice de repelencia e hidrofobicidad del suelo. Ésta es una propiedad del suelo dependiente de la humedad en el mismo, y es más pronunciada con

condiciones secas ya que con humedad alta se inducen cambios en la conformación molecular de las sustancias orgánicas responsables de la hidrofobia. La repelencia al agua en los suelos tiende a incrementarse durante las estaciones secas y a decrecer o a desaparecer completamente, después de fuertes precipitaciones o durante periodos extensos con altos contenidos de agua en el suelo. En general, cuando se ponen a secar muestras de suelo, éstas se pueden tornar repelentes al agua, aún cuando con la humedad de campo no lo sean. Este comportamiento lleva a definir dos tipos de repelencia al agua: la repelencia real, aquella que se presenta en el suelo en condiciones de campo; y la repelencia potencial, la que se presenta cuando el suelo es sometido a secado en el laboratorio, generalmente al aire o al horno (Dekker y Ritsema, 1994)

Se consideran hidrófobos a los suelos que repelen el agua. Una delgada capa de suelo sobre o debajo de la superficie del suelo mineral puede volverse hidrófoba tras los efectos del calor intenso. La capa hidrófoba es el resultado de una sustancia cerosa derivada del material de una planta quemada durante un incendio. La sustancia cerosa penetra el suelo como un gas y se solidifica después de enfriarse, formando un recubrimiento ceroso alrededor de las partículas del suelo. Los suelos con esta característica reducen su capacidad de infiltración de agua (USDA, 2000).

La repelencia al agua (hidrofobicidad) en los suelos es una propiedad con mayores repercusiones en el crecimiento de las plantas, en la hidrología superficial y subsuperficial, y en la erosión del suelo (Doerr, 2000). En general, la repelencia incrementa con aumentos de la materia orgánica y disminuye con aumentos en los contenidos de arcilla y limo de los suelos (Cuevas-Becerra, 2006). Además, la repelencia al agua en el suelo, reduce la infiltración y la disponibilidad de agua para las plantas; incrementa la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión; asimismo, puede deteriorar su estructura; generar grandes pérdidas en la producción agropecuaria y forestal. La repelencia también tiene una alta variabilidad y se expresa con mayor intensidad cuando el suelo está seco (Jaramillo, 2006).

Con el fin de analizar la incidencia de la hidrofobicidad sobre la infiltración del agua en suelos arenosos, Moral-García *et al.* (2002), efectuaron una serie de ensayos empleando infiltrómetros o permeámetros de succión, revelando en sus resultados que la hidrofobia tiene una importante acción en contra del transporte del agua hacia los horizontes más profundos del suelo, manteniéndose en superficie y generando el fenómeno de escorrentía. También Duque-Zapata *et al.* (2004) mencionaron que la repelencia al agua en Andosoles, reduce notablemente la velocidad de infiltración. Por su parte, Lipiec *et al.* (2008), estudiaron los efectos de la compactación del suelo en la sorptividad y en la repelencia al agua, concluyendo que las propiedades hidráulicas de los agregados dependen de las interacciones entre el nivel de compactación, el tamaño de agregados y a la profundidad.

Retención de humedad o humedad relativa. Esta propiedad es de gran importancia para el proceso edafogénico así como para la vida de las plantas (López, 2000). Es el desplazamiento del agua a lo largo de los poros capilares y depende de la cohesión de las moléculas del líquido y de su adhesión a las paredes del capilar; un líquido que humedece a un sólido tiene mayor adhesión que cohesión. Por lo tanto, la capilaridad es un fenómeno importante para el estudio de la retención de humedad del suelo; ésta última depende de la tensión superficial del agua, de las características del suelo y del ángulo de contacto entre el agua y las partículas del suelo (Leal *et al.*, 2002).

Las fuerzas de absorción son consecuencia del carácter bipolar de la molécula de agua y de la descompensación eléctrica existente en la superficie de los coloides (partículas de arcilla que como consecuencias del lavado del terreno han perdido los cationes quedando su superficie cargada negativamente). Son fuerzas electrostáticas que retienen a las moléculas de agua formando una película sobre la superficie de coloides. A la energía, consecuencia de estas fuerzas, se le denomina potencial de adsorción.

En las proximidades del nivel freático cesa el flujo descendente y se produce un efecto conocido en física con el nombre de capilaridad. La existencia

de poros de muy pequeño diámetro implica un ascenso del agua procedente de la zona saturada a través de ellos dando origen a lo que se llama franja capilar.

El fenómeno de capilaridad es directamente proporcional a la tensión superficial entre el agua y el aire contenidos en los capilares y a la atracción molecular entre el agua y las paredes de la fase sólida. Asimismo, es inversamente proporcional al peso específico del agua y al radio del capilar. Como consecuencia de la capilaridad, la presión en esta zona es inferior a la atmosférica. Las fuerzas capilares originan el potencial capilar (Leal *et al.*, 2002).

A la suma del potencial de adsorción y del potencial capilar se le denomina potencial mátrico o potencial matricial, y es igual al potencial de succión cuando el efecto del potencial osmótico es despreciable (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006).

Todas las propiedades hídricas varían de acuerdo al tipo de suelo, en la zona de estudio predominan los Andosoles, que son suelos con características muy particulares.

2.6 Micromorfología

Es una rama de la Ciencia del Suelo que se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes, rasgos y fábricas de los suelos a un nivel microscópico (Bullock *et al.*, 1999).

Debido a que la infiltración y la conductividad hidráulica pueden ser afectadas por la estructura del suelo y su microestructura, se deben contemplar estudios sobre la micromorfología de suelos, los cuales pueden revelar los efectos de diversos procesos sobre los poros del suelo. Al respecto Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) trabajaron en un suelo de cenizas volcánicas en Texcoco, Edo. de México, reportando una estructura granular y granular muy porosa (migajosa) para los horizontes superficiales y de bloques subangulares para los horizontes más profundos.

Para un Andosol de montaña en el volcán Cofre de Perote, Campos-Cascaredo *et al.* (2001) reportaron una estructura granular fina, granular muy fina y de bloques subangulares. Prado *et al.* (2007) encontraron una estructura de

bloques subangulares en un Andosol de la zona de Valle de Bravo, Edo. de México.

Pires *et al.* (2007) utilizaron el análisis micromorfológico en tres diferentes suelos de Brasil sometidos a diversas secuencias de ciclos de humedecimiento-secado, y así comprobar los cambios en el tamaño, tipo y distribución de poros después de estos procesos; mientras que Angeles-Cervantes (2010) encontró que en el bosque no afectado del Parque Nacional El Chico, los agregados presentan una estructura de bloques subangulares y poros tipo fisura y los incendios superficiales ocasionan colapsamiento de agregados, compactación de suelo, reducción de la infiltración y K_{fs} , lo que explica el bajo desarrollo de los individuos de oyamel en estos sitios.

2.7 Hidróxidos y corrección de acidez de suelos

Los hidróxidos están presentes de forma natural en los Andosoles. Los feldespatos ($AlSi_3O_8$), al reaccionar con silicatos en ambientes acuosos, forma hidroxialuminosilicatos, ya sea alófano ($Al_4Si_3O_{12} \cdot nH_2O$), imogolita ($Al_4Si_2O_{10} \cdot 5H_2O$), y pueden dar origen a caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) o haloisita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$) y si pierden silicatos dan origen a la gibsita ($Al(OH)_3$) (Aguirre-Gómez, 2001). El hidróxido de potasio existe en forma del mineral denominado mica, principalmente como biotita, el cual representa su mayor fuente para las plantas. También el hidróxido de calcio se encuentra presente en los Andosoles como productos derivados de calcita (Thompson y Ukrainczyk, 2002).

Los problemas de acidez en los suelos se resuelven comúnmente con la utilización de sales básicas o hidróxidos que permiten corregir algunas deficiencias del suelo. Al respecto Breuer y Schwertmann (1999) realizaron una investigación con suelos de zonas semiáridas de Camerún y concluyeron que con la adición de hidróxido de aluminio al suelo es posible revertir el proceso de compactación.

Se han utilizado mejoradores químicos, como yeso, para modificar la textura del suelo e incrementar la conductividad hidráulica (Harrison *et al.*, 1992), $Ca(OH)_2$ para incrementar el pH (Rangel *et al.*, 1996) y para aumentar la densidad aparente (Zazueta *et al.*, 2001) en Andosoles, o $Al(OH)_3$ en suelos forestales de

Japón para formar complejos órgano-minerales con el C, los cuales protegen al suelo del proceso de acidificación (Funakawa *et al.*, 2008).

Por lo anterior se considera que el uso de hidróxidos puede ser una alternativa para corregir problemas de acidez, compactación e hidrofobicidad del suelo, sin embargo estos aspectos no se han investigado en Andosoles de México, sobre todo en regiones con importancia hidrológica, como es el caso del Parque Nacional Izta-Popo.

3. PROBLEMÁTICA

En el Parque Nacional Izta-Popo, Castro-Alonso (2009) evaluó las propiedades hidrológicas con el permeámetro Guelph, y encontró para el bosque de *Pinus hartwegii* una K_{fs} de 63 984 L/min/ha, para la pradera de alta montaña reportó problemas de drenaje debido a los bajos valores de K_{fs} e indicó que en este sitio el suelo tiene una mayor retención de humedad en comparación con las zonas de bosque conservado, ya que el potencial de flujo mátrico fue de 1.298 cm²/seg; sin embargo, existe un problema con la regeneración del bosque. Se han realizado plantaciones de *Pinus hartwegii* con una baja supervivencia y un escaso crecimiento. Esta zona se considera zona de recarga de acuíferos, lo que hace necesario realizar investigaciones sobre las relaciones entre las propiedades hídricas del suelo y el desarrollo de la vegetación, cuyos resultados permitan proponer estrategias de recuperación de propiedades hídricas y el crecimiento del bosque de *Pinus hartwegii*. Con base en lo anterior los objetivos de este trabajo son:

4. OBJETIVOS GENERALES

- ❖ Determinar las relaciones ecohidrológicas entre las propiedades hídricas del suelo y el crecimiento de *Pinus hartwegii* en una pradera de alta montaña.
- ❖ Evaluar el uso de hidróxidos en la restauración de propiedades hídricas de un Andosol.

4.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Evaluar las propiedades hídricas de un Andosol de pradera de alta montaña (K_{fs} , infiltración, Φ_m , retención de humedad y densidad aparente)
- ❖ Determinar la hidrofobicidad y la acidez potencial del suelo de una pradera de alta montaña.
- ❖ Elegir el tipo de hidróxido y su concentración necesaria para mejorar las propiedades hídricas del suelo, así como el pH y el crecimiento de *Pinus hartwegii*.

5. ZONA DE ESTUDIO

5.1 Parque Nacional Izta-Popo (PNIP)

Los volcanes Popocatepetl (5452 m) e Iztaccíhuatl (5286 m) (Figura 1) se localizan en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana y forman parte de la subprovincia de los volcanes y Lagos del Anáhuac. El Popocatepetl se ubica geográficamente entre 18° 59' - 19° 04' N y 98° 42' - 98° 30' W, mientras que el Iztaccíhuatl en 19° 05' - 19° 18' N y 98° 32' - 98° 45' W; ambos abarcan 92 998 ha. Estos volcanes están situados a 45 km al SE de la Ciudad de México, y conforman la Sierra Nevada, alineamiento montañoso alargado con orientación N-S de cerca de 100 km de longitud, que corresponde con el parteaguas de las cuencas del Balsas y del Pánuco. El territorio de ambos volcanes, comprendido por encima de la cota de los 3600 m, constituye el PNIP, y sus cimas forman el límite de los estados de México, Puebla y Morelos (Almeida-Leñero *et al.*, 2007).



Figura 1. Vista aérea del Parque Nacional Izta-Popo.

Clima. En la cima de estos volcanes, por el relieve y a altitudes superiores de los 4000 a los 5000 m, se registra un clima frío subhúmedo de alta montaña E(T)HC (w_2), con temperatura media anual entre -2 a 5 °C y la del mes más caliente entre 0 y 10 °C, denominado clima de los pastizales alpinos; en esta zona el suelo permanece cubierto de nieve todo el año y no hay vegetación aparente. Por debajo de los 4000 m se presentan un clima semifrío subhúmedo Cb' (w_2) (w)

ig; el más frío de los templados con temperatura media anual de 5 a 12 °C, la del mes más frío de 3 a 18 °C, el verano es fresco y corto.

La precipitación del mes más seco es menor a 40 mm, porcentaje de lluvia invernal menor de 5% de la anual y menos de cuatro meses con temperatura mayor de 10 °C; los dos tipos climáticos presentan lluvias en verano. Para toda la zona, el mes más frío es febrero con una temperatura promedio de 2.8 °C y el más caliente abril, con 5.8 °C. El régimen pluviométrico presenta dos temporadas definidas: invierno seco (diciembre-abril) y verano lluvioso (mayo-octubre), donde se recibe más de 85% de la precipitación total anual. La precipitación es mayor a 800 mm (Almeida-Leñero *et al.*, 2007).

Geología. El Popocatepetl es producto del vulcanismo del Mioceno, con desarrollo máximo en el Pleistoceno, cuando se cubrieron de glaciares que descendieron a altitudes inferiores a los 2800 m. Presenta cenizas del Cuaternario originadas por la actividad volcánica que persiste hasta la actualidad.

El volcán Iztaccíhuatl es un estratovolcán alargado de 7 km de longitud, cuya forma asemeja una mujer recostada. Su origen es consecuencia de la formación de la fractura de Humboldt. Durante el Oligoceno Superior y Mioceno se formó la montaña de N-S. Posteriormente, del Plioceno Medio al Superior surgen lavas del tipo andesita porfídica muy abundantes que constituyen el macizo montañoso que hoy conocemos (Almeida-Leñero *et al.*, 2007)

Edafología. Los suelos presentes en los municipios aledaños al PNIP se clasifican en seis grandes grupos de acuerdo con la clasificación de la FAO: Leptosoles, Regosoles, Andisoles o Andosoles, Cambisoles, Phaeozems y Fluvisoles (CONANP, 2009).

En el Parque Izta-Popo se presentan los siguientes tipos de Andosoles (Contreras, 2006):

- Húmico: Se forman en cenizas volcánicas y en laderas húmedas y templadas con intemperismo avanzado. Suelos ricos en alófanos con contenidos altos de materia orgánica.
- Mólico: Se forman en laderas bajas, cálidas y secas en el material de piroclástica antigua. Son Andosoles con horizontes A, B, y C con una saturación muy alta.
- Ócrico: Por medio de la erosión y la pérdida de humus los Andosoles mólicos se transforman por medio de actividades agrícolas en Andosoles ócricos.
- Vítrico: Suelos poco desarrollados formados a partir de cenizas recientes.

Los suelos presentes en todo el parque estarán siempre asociados con su origen volcánico, solo variando el grado de desarrollo (CONANP, 2009).

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 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).

La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud. Los bosques de coníferas son la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal alpino (CONANP, 2009). Las praderas de alta montaña son comunidades que se restringen a elevaciones que van entre 2 900 y 3 500 m y que generalmente ocupan claros dentro de los bosques de *Abies* y *Pinus*. Tiene una altura de 15 cm, con presencia de pequeños pastos y hierbas (Velázquez, 1999). El zacatonal alpino de la región central de México se encuentra entre el límite superior de los bosques de *Pinus hartwegii* y el inferior de las áreas periglaciares sin vegetación (3 950 – 4 500 m) (Almeida-Leñero *et al.*, 2007).

En estos sitios predominan gramíneas que rara vez exceden los 30 cm de alto o estoloníferas de los géneros *Agrostis*, *Bromus*, *Calamagrostis*, *Festuca*, *Muhlenbergia* y *Poa* y ciperáceas como *Carex peucophila*.

Fauna. Los bosques y pastizales de esta zona son un importante reservorio de fauna silvestre, los cuales presentan, según la CONANP (2009), altos endemismos que se atribuyen a las características fisiográficas y topográficas de la misma.

Dentro del parque se encuentran 16 familias, 37 géneros y 51 especies de mamíferos; ocho especies son endémicas, cuatro bajo protección especial y una amenazada. El conejo zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*) es una de las especies más características de la zona, y se encuentra en la categoría de endémica y protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2001; otras especies protegidas son *Sorex saussurei*, *Myotis velifer* y *Dipodomys phillipsi*; entre los mamíferos endémicos se encuentran la musaraña *Cryptotis goldmani*, los conejos *Sylvilagus floridanus* y *Sylvilagus cunicularius*, el ratón de los volcanes *Neotomodon alstoni* y *Peromyscus difficilis*; mientras que el tejón *Taxidea taxus* es una especie amenazada.

Se encuentran 10 especies de reptiles pertenecientes a 7 géneros en 5 familias. Se tienen registradas dos especies de víbora de cascabel, *Crotalus triseriatus* y *Sistrurus ravus*, la última endémica y protegida; existen también culebras y lagartijas. 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 scalaris*, conocida como culebra listonada de montaña, especie endémica y amenazada; la culebra cola larga *Thamnophis eques* también se encuentra amenazada.

El grupo de los anfibios está representado por tres órdenes, tres familias y 6 especies, las cuales se encuentran dentro de las categorías endémica, amenazada y protegida. El tlaconete leproso o salamandra (*Pseudoeurycea leprosa*) es una especie amenazada y endémica; el tlaconete regordete

(*Pseudoeurycea cephalica*) está amenazado; la salamandra pie plano (*Chiropterotriton chiropterus*) es una especie endémica y protegida; el ajolote (*Ambistoma altamirani*) es endémico, mientras que la rana plegada (*Hylap licata*) es una especie amenazada y endémica.

Las aves que se encuentran en la región corresponden a 10 órdenes, 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 baileyi*); mientras que el tecolote cornudo (*Bubo virginianus*), se encuentra amenazado (CONANP, 2009).

5.2 *Pinus hartwegii* Lindl.

Calderón de Rzedowski y Rzedowski (2001) mencionan que este árbol tiene de 5 a 25 m de altura; un tronco de corteza dura y áspera de hasta 75 cm de diámetro de color pardo oscuro tornándose grisáceo; presenta 4 o 5 hojas en cada fascículo (a veces 3 o 6), rígidas, de 6 a 18 cm de largo, de color verde claro. En el Valle de México se encuentra entre 2600 y 4200 m de altitud, con frecuencia integrando los bosques que forman el último nivel arbóreo de la vegetación. Se ha colectado de Epazoyucan a Tlalpan y Amecameca; fuera del Valle se extiende de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León a la República del Salvador.

6. MÉTODO

6.1 Selección de los sitios de muestreo

Se ubicaron tres sitios en el puerto montañoso conocido como Paso de Cortés, ubicado entre los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl ($19^{\circ} 05' 26''$ N y $98^{\circ} 38' 41''$ W), aproximadamente a 3650 msnm (Figura 2).



Figura 2. Ubicación de sitios de muestreo (rectángulos rojos), en Paso de Cortés, Parque Nacional Izta-Popo. El círculo muestra las instalaciones de CONANP. Imagen Satelital, de Google Earth.com.

En esta zona se realizaron reforestaciones en 1998 y las plantas muestran deficiencias en su crecimiento (Figura 3); tales como, quedar en estado cespitoso, escaso crecimiento interverticilar, bajo crecimiento en la longitud foliar y de yemas apicales. En los sitios de muestreo, la longitud de las hojas es de 7.1 cm; sin embargo, Calderón de Rzedowski y Rzedowski (2001) mencionan que llegan a medir hasta 18 cm.



Figura 3. Individuos de *Pinus hartwegii* con desarrollo deficiente en los sitios de muestreo en zonas reforestadas en 1998.

6.2 Diagnóstico de las propiedades hídricas

*La conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), se determinó *in situ*, utilizando el permeámetro Guelph-2800KI. Este instrumento se basa en el principio del bulbo húmedo constante, opera con el principio de sifón de Mariotte y puede estimar la conductividad hidráulica saturada, de acuerdo con el procedimiento de Reynolds y Elrick (1985). Estas medidas pueden ser utilizadas para relacionarlas con la porosidad de suelo (Reatto *et al.*, 2007).*

Procedimiento: Se realizó un agujero de 10 cm de profundidad con los implementos del aparato (Figura 4) y se realizaron lecturas a un nivel de 5 cm cada minuto hasta obtener lecturas constantes (R1). Posteriormente, el nivel del agua se ubicó en los 10 cm y se procedió a obtener nuevamente las lecturas constantes (R2). A partir de estos datos se utilizan las siguientes ecuaciones:

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs}):

$$K_{fs} = [(0.0041)(X)(R_2)] - [(0.0054)(X)(R_1)] = \text{_____ cm/seg}$$

Potencial de flujo mátrico (Φ_m):

$$\Phi_m = [(0.0572)(X)(R_1)] - [(0.0237)(X)(R_2)] = \text{_____ cm}^2/\text{seg}$$

Donde:

R1= lectura constante a un nivel de 5 cm

R2= lectura constante a un nivel de 10 cm

X = 35.22 = constante del reservorio (dada por el permeámetro)

La *tasa de infiltración* también se registró con el permeámetro Guelph, ya que R2 es igual a la velocidad de infiltración en la superficie.

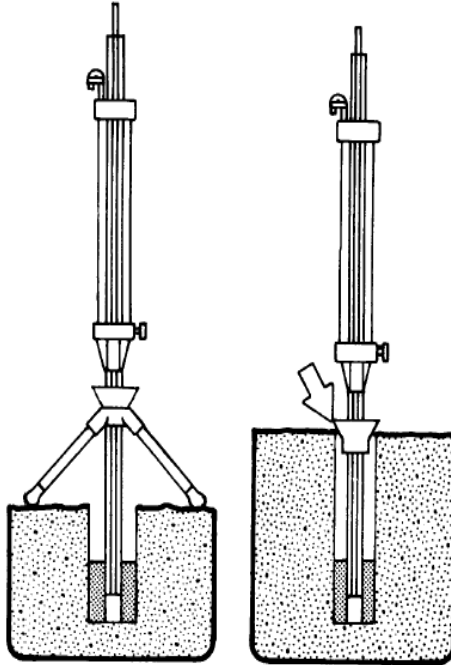


Figura 4. Permeámetro Guelph (Soilmoisture Equipment Corp., 1991)

El porcentaje de humedad del suelo se estimó en base a la diferencia del peso fresco y del peso seco de las muestras de suelo de los tubos utilizados para densidad aparente.

6.3 Determinación de la hidrofobicidad, diagnóstico de acidez y requerimientos de alcalinizante

El nivel de hidrofobicidad o de persistencia a la repelencia al agua se determinó aplicando en campo el método WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo), descrito por Duque-Zapata *et al.* (2004). En este método se coloca una gota de agua en la superficie del suelo y se registra el tiempo, en segundos, que tarda en penetrar completamente en el suelo; posteriormente se clasifica este suelo con respecto a su nivel de hidrofobicidad (Cuadro 1), de acuerdo con lo propuesto por Dekker y Jungerius (1990).

Cuadro 1. Clasificación del WDPT.

Valores del WDPT (seg)	Nivel de persistencia de la repelencia al agua	Clase de persistencia
< 5	No repelente	0
5 – 60	Ligeramente repelente	1
60 – 600	Fuertemente repelente	2
600 – 3600	Severamente repelente	3
> 3600	Extremadamente repelente	4

Diagnóstico de la acidez. El pH real se determinó con el potenciómetro digital en relación 1:2, con H₂O. Este parámetro se realizó en base al método electrométrico el cual se basa en la determinación de la actividad del ión H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H⁺. La determinación del pH potencial se realizó por medio de KCl (1 M) relación 1:2 por medio del método electrométrico y se recomienda para estudios relacionados con suelos ácidos según la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de suelos en cuanto a su pH (NOM-021-RECNAT-2000).

CLASIFICACIÓN	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Requerimiento de alcalinizante. Consiste en calcular la cantidad de reactivo necesaria para elevar la reacción del suelo una unidad a partir del pH original; se realizó de acuerdo con Velasco (1983): se utilizaron 7 matraces Erlenmeyer, cada uno con 10 g de suelo, añadiendo las cantidades del mejorador químico (hidróxido 0.04 N) y de agua destilada como se indica en el Cuadro 3; inmediatamente

después se añadió 4 gotas de cloroformo para prevenir el desarrollo bacteriano, se taparon y se dejaron reposar por un periodo 4 días agitando por lo menos una vez al día. Al final de este periodo se determinó el pH de las suspensiones para posteriormente construir una curva de equilibrio utilizando la ordenada para los diversos valores de pH obtenidos y la abscisa para los diversos volúmenes de alcalinizante que se utilicen.

Los hidróxidos que se utilizaron son: KOH (25, 30 y 35 ppm), $Al(OH)_3$ (25, 30 y 35 ppm) y $Ca(OH)_2$ (10, 15 y 20 ppm).

Para la corrección de la acidez, se seleccionó el hidróxido que requiera de la mínima concentración y que eleve en mayor proporción el pH.

Cuadro 3. Procedimiento para determinar requerimientos de alcalinizante, según Velasco (1983)

SUELOS ARENOSOS		
Matraz	ml H₂O	ml OH (0.04 N)
1	10	0
2	9	1
3	7.5	2.5
4	6	4
5	4.5	5.5
6	3	7
7	1.5	8.5

6.4 Evaluación del efecto de adición de hidróxidos

a) Propiedades hídricas

Se evaluó el efecto de la adición de hidróxidos sobre:

La conductividad hidráulica (K_{fs}), infiltración, y potencial de flujo mátrico en tres puntos de cada tratamiento, con el Permeámetro Guelph, descrito anteriormente.

Análisis micromorfológico. La porosidad total se determinó por el método de secciones delgadas (Bullock *et al.*, 1999). En cada sitio de estudio, se colectaron 3 muestras inalteradas del suelo de los primeros 5 cm del suelo, con cajas tipo Kubiena. Las cajas se dejaron secar lentamente a la sombra durante 4 semanas; posteriormente, se les aplicó resina poliéster insaturada y monómero-estirenos con una relación 7:3 para su endurecimiento. Una vez endurecidas las muestras se cortaron y se colocaron en portaobjetos (6 x 9 cm) y se pulieron hasta 30 μ m de espesor.

Las secciones delgadas fueron analizadas bajo un microscopio petrográfico marca Olympus BX51 con compensador, con luz semicruzada, para que el espacio poroso se torne de color gris, ya que existen cristales de color blanco (feldespatos) que se confunden con el espacio poroso. Se analizaron entre 9 y 12 imágenes representativas por cada sección delgada.

Para la determinación de la porosidad total y del efecto de la adición de hidróxidos sobre la porosidad, cada imagen se analizó con ayuda del programa *Image Proplus vers. 6*.

Con el análisis de las imágenes se registró la morfología de agregados, de acuerdo con el sistema de Bullock *et al.* (1999).

b) pH y densidad aparente

Muestreo de suelo. En cada sitio se tomaron 2 kg de suelo, de 0 a 5 cm de profundidad, ya que en esta capa se detectan los cambios en las propiedades del suelo (Candan y Broquen, 2009). Las muestras se llevaron a laboratorio, se dejaron secar a temperatura ambiente y se tamizaron, para posteriormente realizar los análisis correspondientes.

El Ca, Na, K, Mg se determinaron por espectroscopia de absorción atómica (Zapata y Ángeles, 2004), con el fin de conocer el estado nutrimental del suelo de esta zona.

Se evaluó el pH con el potenciómetro digital en relación 1:2, con H₂O, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

La densidad aparente se determinó por medio del método del cilindro, de acuerdo con lo establecido por USDA (2001). Este método consiste en introducir verticalmente en el suelo un cilindro de metal de aproximadamente 3 cm de diámetro por 5 cm de altura, con el fin de extraer una pequeña muestra inalterada de suelo; para extraer esta muestra, con una pala de mano se quitó el suelo que rodea al cilindro y después con una navaja se eliminó el exceso de suelo que sobresale de los límites del mismo; se selló con cinta adhesiva para impedir que se escapara la muestra de suelo. Posteriormente, en el laboratorio, se quitó la cinta de un solo extremo, se pesó el cilindro junto con la muestra de suelo, obtuvo así el peso inicial o peso fresco de la muestra; se secó la muestra en la estufa a una temperatura aproximada de 70 °C hasta obtener un peso seco constante, teniendo así el peso final o peso seco.

c) Desarrollo de *P. hartwegii*

En campo se ubicaron árboles con un desarrollo deficiente y se aplicó en el suelo Ca(OH)_2 (10, 15 y 20 ppm), KOH (25, 30 y 35 ppm), Al(OH)_3 (25, 30 y 35 ppm), eligiendo cinco árboles para cada una de estas concentraciones, más cinco testigos, obteniendo un total de 60 individuos o unidades de muestreo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Número de unidades de muestreo por cada tratamiento.

Tratamiento	Concentración (ppm)	Número de plantas
Testigo	0	15
KOH	25	5
	30	5
	35	5
	35	5
Al(OH)_3	25	5
	30	5
	35	5
Ca(OH)_2	10	5
	15	5
	20	5

De cada planta seleccionada se registró al final de la época seca (mes de abril), con un vernier, la longitud y diámetro de las yemas apicales y la longitud de las hojas. También se registró la altura (de la base del suelo hasta la yema apical), y para la biomasa se cortó 1 brote y hojas de la parte apical de cada árbol.

6.5 Análisis de datos

Los datos obtenidos en porcentaje (porosidad, humedad) fueron transformados de acuerdo con Zar (1999) para cumplir con los requerimientos del análisis estadístico. Se realizaron pruebas de comparación de medias (T student) y análisis de varianza de una vía (ANOVA), para detectar diferencias significativas entre los tratamientos, a un nivel de 0.05. El análisis de imágenes para micromorfología se realizó con el programa *Image Proplus vers. 6*. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en SAS (1998).

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Diagnóstico de las propiedades hídricas

En la zona de pradera de alta montaña del PNIP, la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) tiene una media de 118.68 (± 52.75) $L \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, equivalente a 42.72 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$. La tasa de infiltración en la superficie (0-5 cm de profundidad) registró un valor promedio de 9975.26 (± 4219.84) $L \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, equivalente a 3600 (± 1512) $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$; mientras que a una profundidad de 5 a 10 cm se redujo a 8170 (± 3013.63) $L \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, que equivalen a 3024 (± 1080) $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$. Para el caso del potencial de flujo mátrico se obtuvo un valor de 0.086 (± 0.036) $\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$. El contenido de humedad en el suelo resultó con una media de 1.43 (± 1.38) %; en tanto, la densidad aparente se registró con un valor de 0.56 (± 0.07) $\text{g} \cdot \text{cm}^3$. El análisis de secciones delgadas mostró que el suelo de esta zona tiene una porosidad total de 22.07% (± 7.01). En el Cuadro 5 se reportan las propiedades hídricas de un Andosol de PAM del PNIP.

De acuerdo con los resultados, el valor de K_{fs} del suelo de PAM del PNIP es la media más alta registrada para Andosoles de pradera de alta montaña de México; sin embargo, para esta misma zona Castro-Alonso (2009) registró un valor más bajo de 7.2 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$, lo que indica que existe una variabilidad en estos suelos. La K_{fs} de esta zona se ubica en el intervalo registrado a nivel nacional (Figura 5): 40 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en Cofre de Perote, Veracruz (Muñoz-Villers *et al.*, 2011); 39.44 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en el Pico de Orizaba (Mora *et al.*, 2011); y en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco 14.8 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ (Martínez y Ángeles, 2011) y 8.88 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ (Jiménez-Cruz, 2011).

A nivel internacional, se han obtenido valores de 60-70 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en Ecuador (Poulenard *et al.*, 2001); 50-62 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en Europa (Fontes *et al.*, 2004); 1.4-11.3 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en Chile (Sandoval *et al.*, 2007); 0.52-5.3 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ en los Andes de Ecuador (De Bièvre *et al.*, 2006) (Figura 5).

En general, los valores de K_{fs} de las PAM, son muy bajos comparados con otros tipos de vegetación (Figura 5); por ejemplo, para un bosque conservado de

Cuadro 5. Propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) de un Andosol de PAM del PNIP.

K_{fs}	Infiltración (prof.)		Φ_m	Retención de humedad	Porosidad total	D. A.	pH
	5 cm	10 cm					
mm-hr ⁻¹	L-seg ⁻¹ ·Ha ⁻¹	L-seg ⁻¹ ·Ha ⁻¹	cm ² ·seg ⁻¹	%	%	g-cm ³	
42.72 (± 18.9)	9975.26 (± 4219.84)	8170 (± 3013.63)	0.086 (± 0.036)	1.43 (± 1.38)	22.07 (± 7.01)	0.56 (± 0.07)	3.83 (± 0.38)

K_{fs} : Conductividad hidráulica; Φ_m : Potencial de flujo mátrico; D A: Densidad aparente.

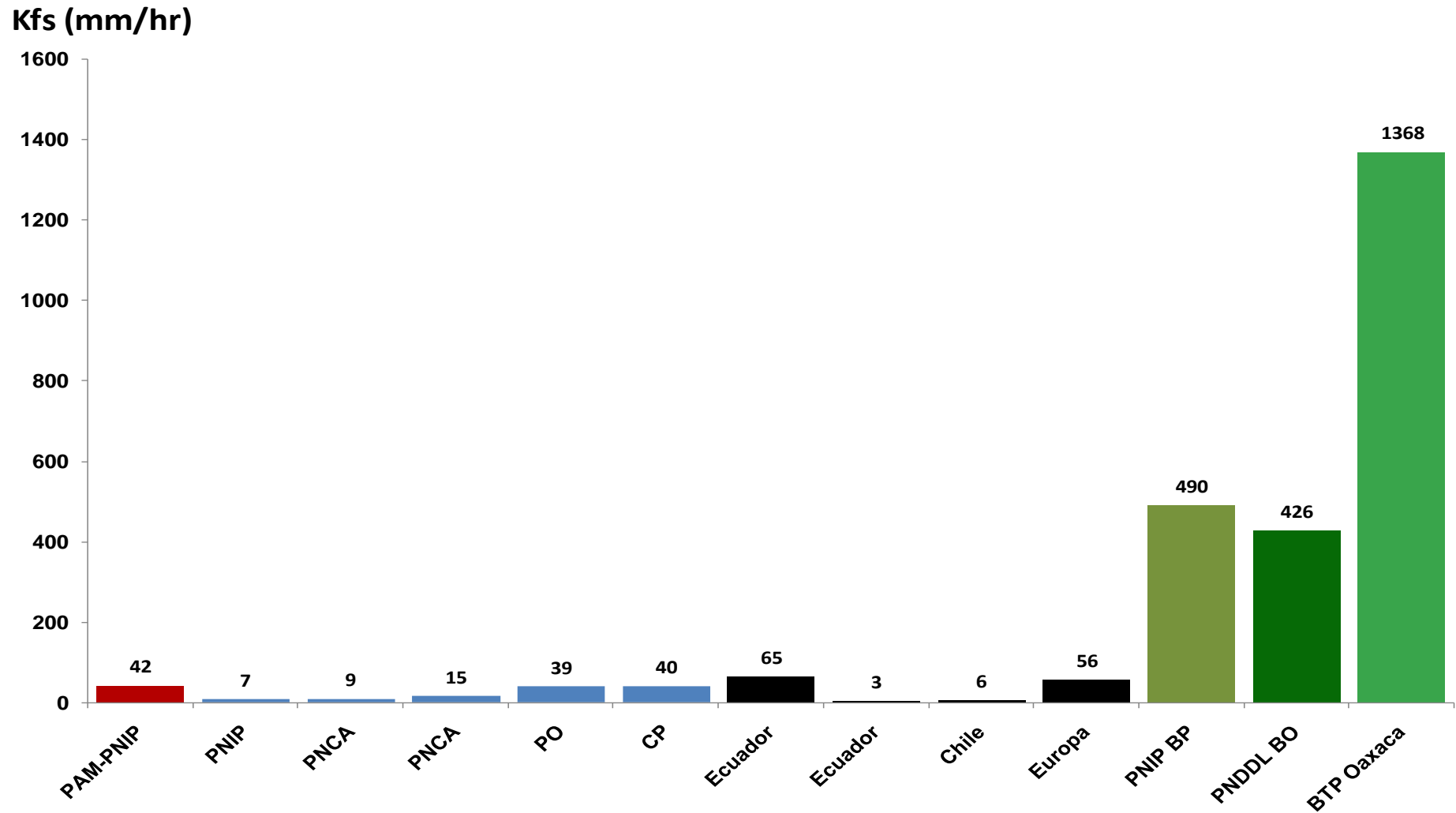


Figura 5. Conductividad hidráulica en otras PAM de México, en Andosoles a nivel internacional y en otros tipos de vegetación. PNCA: Parque Nacional Cumbres del Ajusco, PO: Pico de Orizaba, CP: Cofre de Perote, PNDDL: Parque Nacional Desierto de los Leones, BP: Bosque de *P. hartwegii*, BO: Bosque de oyamel, BTP: Bosque Tropical Perennifolio.

Pinus hartwegii en el Parque Nacional Izta-Popo (Castro-Alonso, 2009) y para un bosque de oyamel del Parque Nacional Desierto de los Leones (González-Vargas, 2011) se reportaron 490 y 426 mm·hr⁻¹, respectivamente; mientras que en un bosque tropical perennifolio de Oaxaca se registró un promedio de 1368 mm·hr⁻¹ (Chávez-Barrera, 2011).

Los resultados mostraron que la tasa de infiltración superficial tiene una media de 3600 mm·hr⁻¹, y 3024 mm·hr⁻¹ a una profundidad de 10 cm, lo que indica que existen problemas de drenaje, ya que la tasa de infiltración disminuye en 20% conforme aumenta la profundidad. Estos valores son más altos que los reportados por Castro-Alonso (2009), quien para la misma zona registró una infiltración superficial de 972 mm·hr⁻¹ y de 288 mm·hr⁻¹ para una profundidad de 5 a 10 cm. Esta diferencia en los datos puede atribuirse a tres factores: a) la variabilidad natural del suelo, b) su temperatura y c) a la época de muestreo. Por ejemplo, en invierno la temperatura del aire del suelo es baja y por lo tanto, su movimiento es más lento; en tanto que, en primavera la temperatura del suelo es mayor y la salida del aire es más rápida, incrementando así la infiltración y la conductividad hidráulica; sin embargo, esto requiere una comprobación experimental en campo.

Los resultados de infiltración obtenidos en ambas profundidades (0-5 y de 5 a 10 cm) en la PAM del PNIP, también son mayores a los registrados en otros pastizales de alta montaña de México: 360 y 792 mm·hr⁻¹ para el Pico de Orizaba (Mora *et al.*, 2011); 130 y 864 mm·hr⁻¹ en la cima (Martínez y Ángeles, 2011) y 6160 y 2916 mm·hr⁻¹ en la parte baja del Parque Nacional Cumbres del Ajusco (Jiménez-Cruz, 2011).

En general, estos valores de infiltración superficial y a una profundidad de 5 a 10 cm son bajos en comparación con un bosque de *Pinus* conservado: 3348 y 504 mm·hr⁻¹, respectivamente (Castro-Alonso, 2009); y bosques de encino y oyamel del Parque Nacional El Chico, cuyos valores oscilan entre 3838 y 10138 mm·hr⁻¹ (García-Plata *et al.*, 2011).

Con respecto al Φ_m , este suelo presentó una media de $0.086 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, valor más bajo que el reportado ($1.29 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$) en la misma zona por Castro-Alonso (2009) y a nivel nacional es uno de los más altos ya que se han reportado $0.003 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ (Jiménez-Cruz, 2011), $0.02 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ (Martínez y Ángeles 2011) para el Parque Nacional Cumbres del Ajusco; y $0.0039 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ en el Pico de Orizaba (Mora *et al.*, 2011).

A nivel internacional, el valor sigue siendo el más alto ya que en suelos volcánicos de Chile, este parámetro oscila entre 0.001 y $0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ (Sandoval *et al.*, 2007).

Comparado con otros tipos de vegetación, estos valores de Φ_m representan el 1%, con respecto a los registrados en un bosque tropical perennifolio de Oaxaca, en donde se registraron $0.33 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ (Chávez-Barrera, 2011).

El valor de contenido de humedad del suelo (1.43%) es el más bajo registrado para praderas de alta montaña; por ejemplo, en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco Jiménez-Cruz (2011) reportó 15 % de humedad, 5.98 y 26% en zacatonales del Pico de Orizaba (Mora *et al.*, 2011); sin embargo, estos valores son bajos comparados otros tipos de vegetación, como el bosque tropical perennifolio de Oaxaca, donde Chávez-Barrera (2011) reporta 40.1 %.

7.2 Determinación de la hidrofobicidad, diagnóstico de acidez y requerimientos de alcalinizante.

De acuerdo con las pruebas realizadas en campo utilizando el método WDPT, el tiempo que tardó una gota en penetrar al suelo fue de 8.66 seg (± 8.11), con lo cual se puede clasificar a este suelo como *ligeramente repelente al agua*, de acuerdo con el sistema propuesto por Dekker y Jungerius (1990); sin embargo, el grado de repelencia no es tan severo comparado con otros sitios; por ejemplo, Jiménez-Cruz (2011) y Martínez y Ángeles (2011) determinaron que el suelo en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco es extremadamente repelente; mientras que, para el Pico de Orizaba, Mora *et al.* (2011) el suelo es ligera a fuertemente repelente.

En esta zona el suelo mostró un pH potencial de 4.15 (± 0.08), mientras que el pH real fue de 3.83 (± 0.38) (Cuadro 5); por lo que se clasifica como *fuertemente ácido*, con base en la NOM-021-RECNAT-2000. Estos valores son más bajos que los reportados en sitios cercanos a la misma zona por López *et al.* (1988), quienes reportaron para Paso de Cortés un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}=6.35$; mientras que Granados (2003) obtuvo pH real de 6.0 y pH potencial de 4.4, en bosques de *Pinus hartwegii*.

El valor de pH real, es el más bajo registrado para las PAM a nivel nacional, ya que se han reportado valores de 5.06 y 5.6 en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (Jiménez-Cruz, 2011 y Martínez y Ángeles, 2011; respectivamente) y 5.2 en el Pico de Orizaba (Mora *et al.*, 2011).

Generalmente, la acidez potencial es mayor que la acidez real (Velasco, 1983); sin embargo, esta afirmación no coincide con las muestras analizadas ya que el pH real es menor que el pH potencial. Shoji *et al.* (1993) mencionan que cuando los valores de pH_{KCl} son mayores a los de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ se debe a que este suelo posee grandes cantidades de arcillas no cristalinas y muy bajo contenido de silicatos y materia orgánica. Las pruebas con KCl se basan en la adsorción de iones Cl^- a los sitios de carga positiva de las arcillas no cristalinas, resultando en la formación neta de KOH con lo cual se incrementa el pH_{KCl} en la solución de suelo.

En cuanto a los requerimientos de alcalinizante, la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ al suelo no mostró algún cambio significativo en toda la curva de equilibrio, haciendo notar que la adición de este hidróxido no provoca una modificación favorable del pH.

Con la adición de 2.5 ml de KOH 0.04 N y 5.5 ml de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.04N al suelo se registraron cambios de pH, de 3.83 a 7.3 y 7.05, respectivamente (Figura 6).

Con los datos de la curva de equilibrio se obtuvo la ecuación polinómica con la cual es posible calcular la cantidad de KOH 0.04N necesaria para incrementar el pH del suelo de pradera de alta montaña a un nivel adecuado para el desarrollo de *P. hartwegii* (Figura 7):

$$y=-0.080x^2+1.156x+4.647 (R^2=0.954)$$

La adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ hizo notar que al aumentar la cantidad de reactivo, el pH disminuyó con respecto al original; esta disminución se puede atribuir, según Huang *et al.* (2002), a un fenómeno de polimerización del $\text{Al}(\text{OH})_3$ en $\text{Al}(\text{OH})_2$ liberando así iones H^+ , lo que hace al suelo más ácido.

Con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se consiguió un aumento significativo del pH desde el inicio de la curva de equilibrio, haciéndose constante al final, mostrando que al adicionar una mayor cantidad, éste ya no tendría efecto alguno en dicho parámetro; esto se debe según Velasco (1983), a que el Ca^{2+} desplaza los iones H^+ que se encuentran en el complejo de intercambio, el cual reacciona con el OH^- , formando una molécula de agua, para que finalmente los iones Ca^{2+} ocupen el lugar del H^+ , provocando así una reducción en la acidez potencial del suelo, pero deja de tener un efecto cuando ya no encuentra lugar de intercambio.

De los reactivos utilizados, el KOH provocó un incremento significativo del pH desde el inicio de la curva de equilibrio conforme aumenta la cantidad de alcalinizante; esto se atribuye a que el K es un elemento con una alta capacidad hidrolítica y provoca la formación de bases fuertes, ocasionando un mayor incremento de pH en comparación con los otros tratamientos; además de que el OH^- que se encuentra presente en la disolución básica es capaz de reaccionar con los aceites orgánicos dando lugar a un proceso de saponificación debido a la hidrolización de los ésteres, provocando la producción de agua (Mc Murry, 2008).

Con base en lo anterior, se deduce que el hidróxido más adecuado para corregir la acidez de los suelos de PAM del PNIP es el KOH, ya que para incrementar el pH, que originalmente era de 3.08, de 10 g de suelo de esta zona, solamente se requieren 2.5 ml de dicho mejorador químico a una concentración 0.04 N, teniendo finalmente $\text{pH}=7.3$, que es más adecuado para el desarrollo de *Pinus hartwegii*. Al respecto, Challenger (1998), menciona que los suelos de los bosques de pino son moderadamente ácidos (pH de 5.5 a 7).

7.3 Evaluación del efecto de adición de hidróxidos

Los resultados del tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no se muestran, debido a que el sitio donde se aplicó, fue afectado por un incendio provocado.

a) Propiedades hídricas

En general, todos los tratamientos incrementaron la K_{fs} (Figura 8). El sitio sin tratamiento registró $118.67 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$. El mayor incremento (867%) se registró con el tratamiento de KOH 35 ppm a $1029 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($P=0.05$); mientras que con $\text{Al}(\text{OH})_3$ 25 ppm, la K_{fs} se incrementó significativamente (647%) a $768.5 (\pm 67.74) \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($P=0.008$).

La infiltración superficial presentó un valor promedio de $9975.26 (\pm 4219.84) \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ en el sitio sin tratamiento; con el tratamiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ 35 ppm se incrementó la media a $15933.33 (\pm 4437.72) \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 10); sin embargo, este cambio no es significativo ($P=0.06$). Para el caso de la infiltración de 5 a 10 cm de profundidad, el suelo sin tratamiento registró $8170 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$; el tratamiento KOH 35 ppm ocasionó el mayor incremento (27%) a $10\,433.33 (\pm 750.56) \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$, mientras que el $\text{Al}(\text{OH})_3$ 35 ppm a $10\,000 (\pm 0) \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($P=0.007$ y 0.008 , respectivamente), como se puede observar en la Figura 11.

En el caso del potencial de flujo mátrico, la aplicación de hidróxidos no modificó significativamente en ninguno de los casos este parámetro (Figura 9).

El contenido de humedad del suelo sin tratamiento se registró de 1.43%. Como se muestra en la Figura 12, los mayores efectos se obtuvieron con los tratamientos de KOH 35 ppm y $\text{Al}(\text{OH})_3$ 30 ppm, los cuales elevaron el contenido de humedad a 6.18% ($P=0.01$) y 5.69% ($P=0.001$), respectivamente.

La porosidad total de las muestras sin tratamiento fue de 22.07%. Con el tratamiento de KOH 30 ppm este valor se incrementó significativamente a 34.58 (± 13.99) % ($P=0.05$), esto es, un aumento en el espacio poroso de 56%. Con el

tratamiento $\text{Al}(\text{OH})_3$ 30 ppm el espacio poroso incrementó un 34% ($P=0.01$), y con KOH 35 ppm incrementó un 21% (Figura 13); sin embargo, este cambio no es significativo ($P=0.07$). Cuando ocurre un incremento en la porosidad, significa que se agrupan o se agregan las partículas.

En el Cuadro 6 se muestra el efecto de los tratamientos sobre las propiedades hídricas de un Andosol de PAM.

Con base en los resultados anteriores es posible notar que el KOH en su concentración de 35 ppm tiene mayor influencia en las propiedades hídricas del suelo. Esto se puede explicar porque la adición de hidróxidos de K aumenta la porosidad total entre 21 y 56%. En las imágenes de micromorfología se observa que los tratamientos con KOH causan el colapsamiento de agregados lo que genera mayor porosidad, macroporos que permiten la transmisión de agua y un cambio en la microestructura del suelo, de granos simples a bloques subangulares, favoreciendo la microagregación (Figura 15), lo que explica la disminución de la densidad aparente.

El colapsamiento de agregados puede ser explicado a que el pH del suelo es fuertemente ácido, lo cual permite una alta disponibilidad del Al^{3+} (Aguirre-Gómez, 2001); y por lo tanto, un exceso de carga negativa, la cual requiere ser balanceada por un catión monovalente. Schulze (2002) menciona que el K^+ es el catión monovalente que comúnmente ocupa los sitios disponibles en los espacios intersticiales de los agregados.

La adición de hidróxidos de K incrementó ligeramente el pH y disminuyó la toxicidad del aluminio. Al respecto, Huang *et al.* (2002) menciona que la principal razón para mejorar un suelo ácido es disminuir los efectos tóxicos del aluminio.

Otro factor a considerar, es que los KOH degradan las sustancias hidrófobas, que se encuentran en los primeros centímetros del suelo, lo que permite también el ingreso y movilidad del agua e incluso su almacén en los microporos y por ello también se incrementa la retención de humedad. La adición de hidróxidos, en este caso KOH, rompe la capa hidrófoba, compuesta de aceites, resinas, esteroides y éteres, mediante un proceso de saponificación (Mc Murry, 2008),

Cuadro 6. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) de un Andosol de PAM del PNIP.

Tratamiento	K_{fs}	Infiltración (prof.)		Φ_m	Retención de humedad	Porosidad total	D A	pH
		5 cm	10 cm					
(ppm)	$L \cdot seg^{-1} \cdot Ha^{-1}$	$L \cdot seg^{-1} \cdot Ha^{-1}$	$L \cdot seg^{-1} \cdot Ha^{-1}$	$cm^2 \cdot seg^{-1}$	%	%	$g \cdot cm^3$	
Sin tratamiento	118.67 (± 52.75) ^a	9975.26 (± 4219.84) ^a	8170 (± 3013.63) ^a	0.086 (± 0.03) ^a	1.43 (± 1.38) ^a	22.07 (± 7.01) ^a	0.56 (± 0.07) ^a	3.83 (± 0.38) ^a
Al(OH) ₃ (25)	768.5 (± 67.74) ^b	11666.67 (± 2886.75) ^a	6966.67 (± 3394.60) ^a	0.073 (± 0.06) ^a	0.64 (± 0.01) ^a	21.65 (± 4.35) ^a	0.62 (± 0.09) ^a	3.73 (± 0.37) ^a
Al(OH) ₃ (30)	599.44 (± 204.21) ^a	10666.67 (± 1154.70) ^a	6800 (± 2771.28) ^a	0.048 (± 0.04) ^a	5.69 (± 0.29) ^c	29.62 (± 4.09) ^c	0.57 (± 0.09) ^a	3.82 (± 0.47) ^a
Al(OH) ₃ (35)	740.67 (± 347.16) ^a	15933.33 (± 4437.72) ^a	10000 (± 0) ^b	0.068 (± 0.03) ^a	1.38 (± 0.87) ^a	20.78 (± 8.36) ^a	0.84 (± 0.16) ^a	3.42 (± 0.21) ^a
KOH (25)	139.64 (± 2.73) ^a	7750 (± 3464.82) ^a	5150 (± 3616.30) ^a	0.039 (± 0.02) ^a	3.76 (± 1.4) ^a	23.70 (± 5.33) ^a	0.45 (± 0.02) ^b	4.11 (± 0.43) ^a
KOH (30)	238.08 (± 0) ^a	7950 (± 3323.40) ^a	6800 (± 5374.01) ^a	0.071 (± 0.05) ^a	2.98 (± 2.39) ^a	34.58 (± 13.99) ^c	0.54 (± 0.02) ^a	4.07 (± 0.54) ^a
KOH (35)	1029.48 (± 0) ^c	13966.67 (± 5507.57) ^a	10433.33 (± 750.56) ^b	0.094 (± 0.05) ^a	6.18 (± 0.44) ^b	26.87 (± 4.99) ^b	0.54 (± 0.02) ^a	3.71 (± 0.25) ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel $P \leq 0.05$. K_{fs} : Conductividad hidráulica; Φ_m : Potencial de flujo mátrico; D A: Densidad aparente.

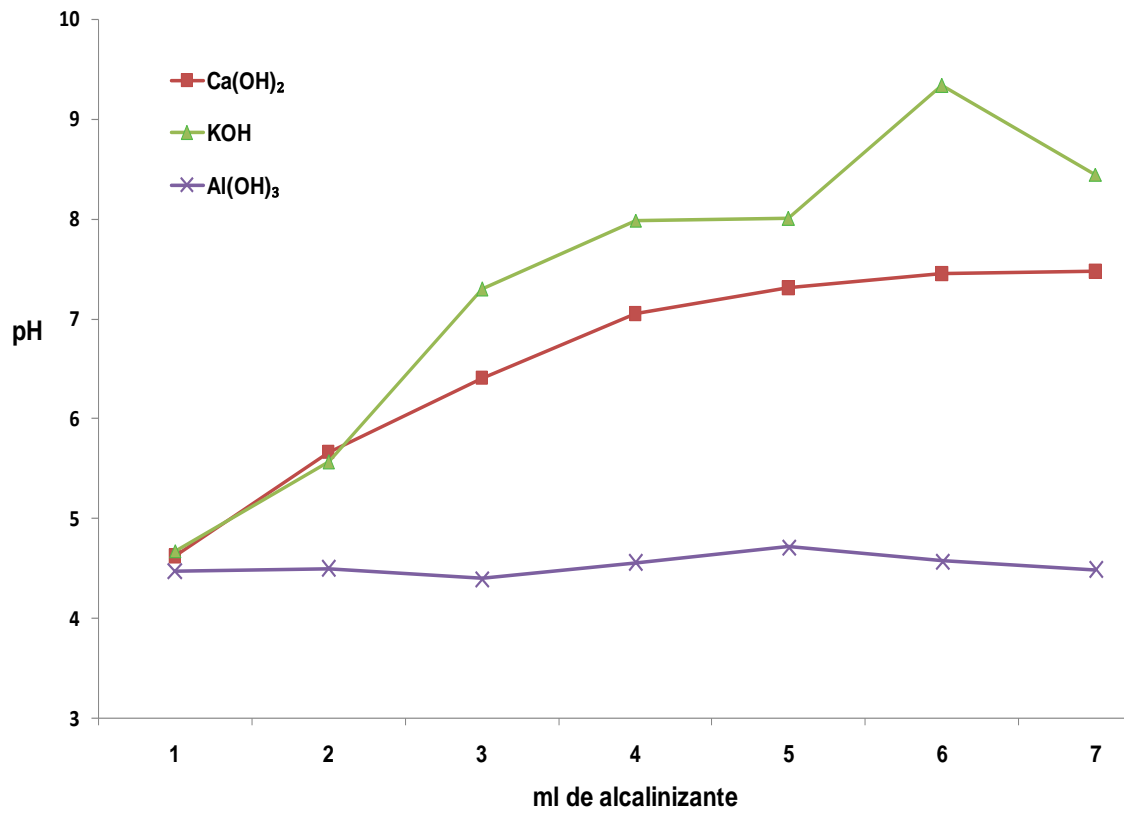


Figura 6. Requerimientos de alcalinizante para un suelo de PAM del PNIP.

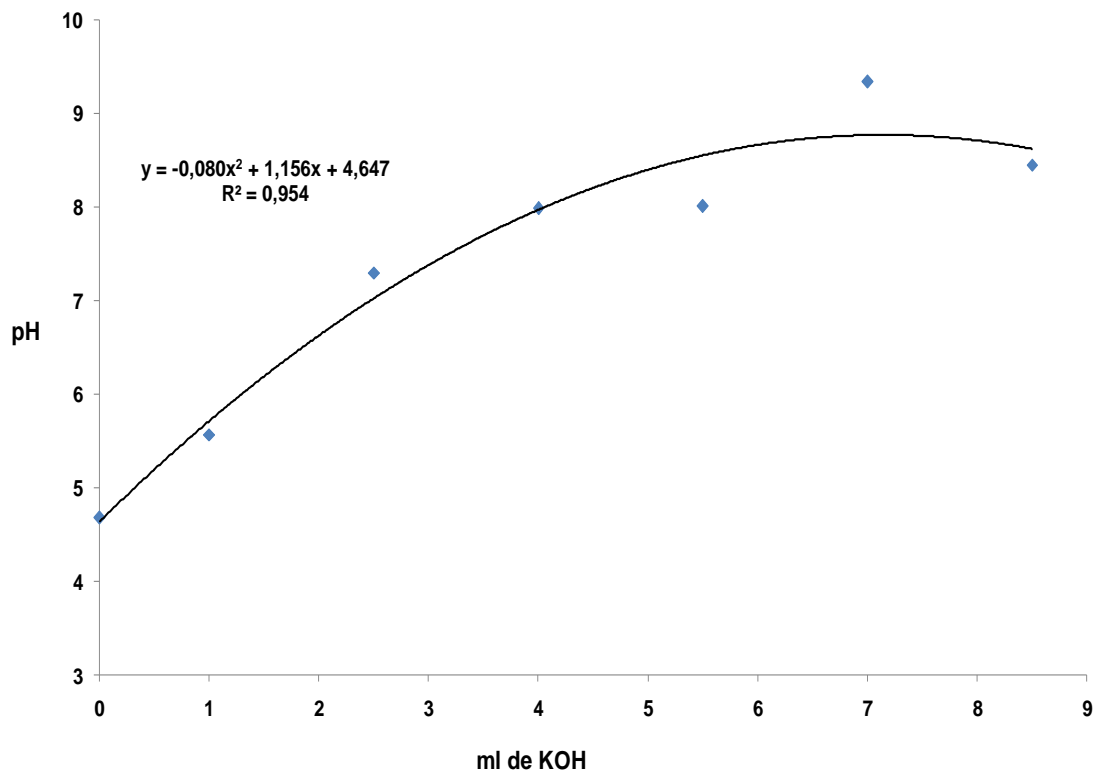


Figura 7. Curva de equilibrio de KOH 0.04 N.

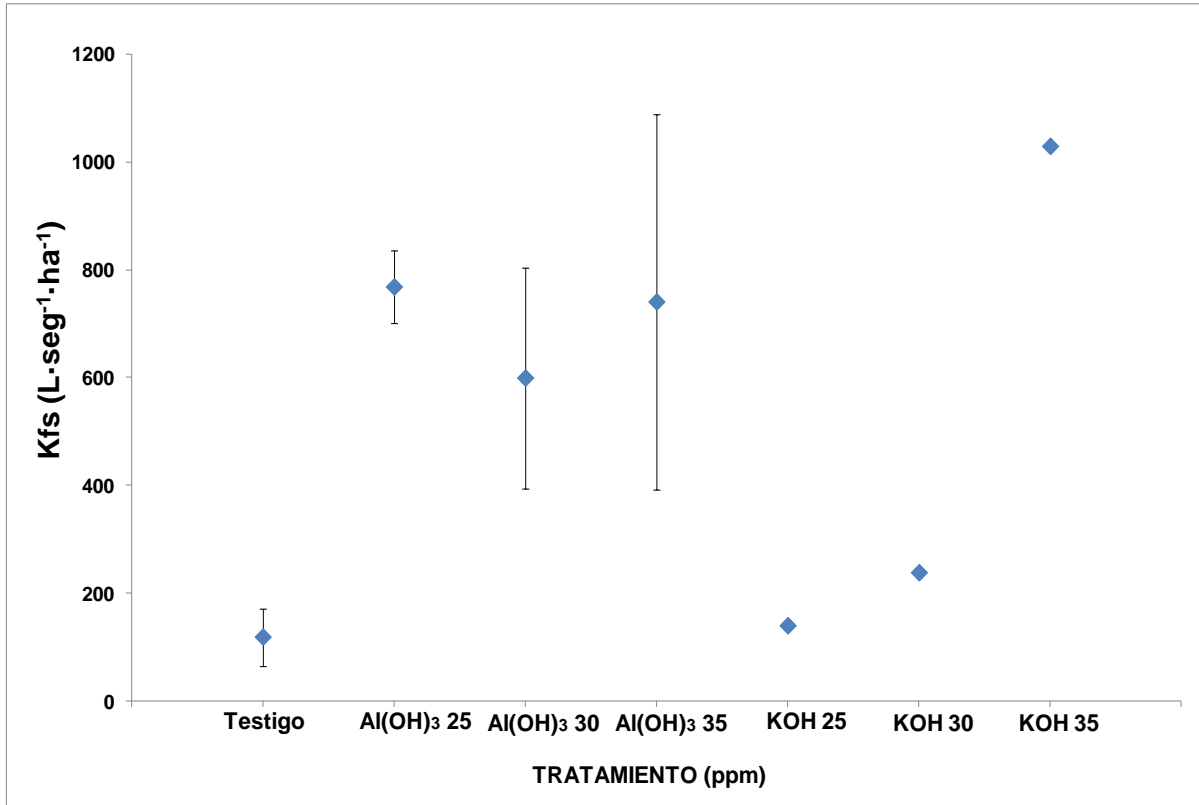


Figura 8. Efecto de la adición de hidróxidos en la conductividad hidráulica saturada del suelo de una PAM del PNIP.

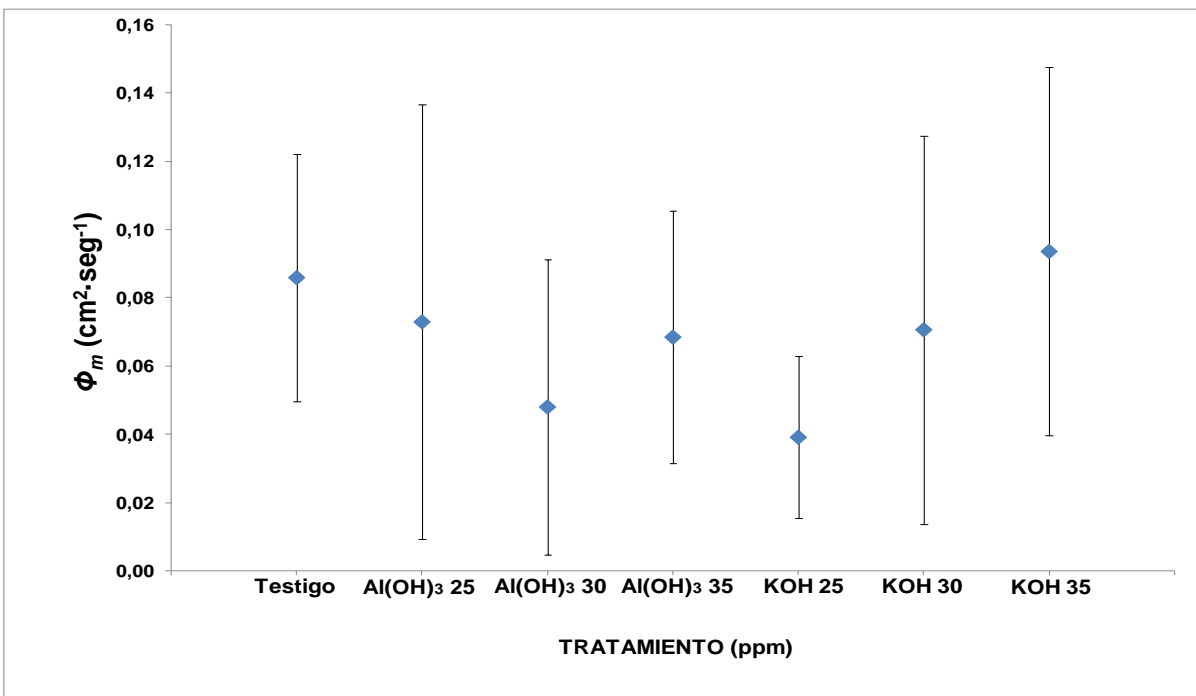


Figura 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el potencial de flujo mátrico del suelo de una PAM del PNIP.

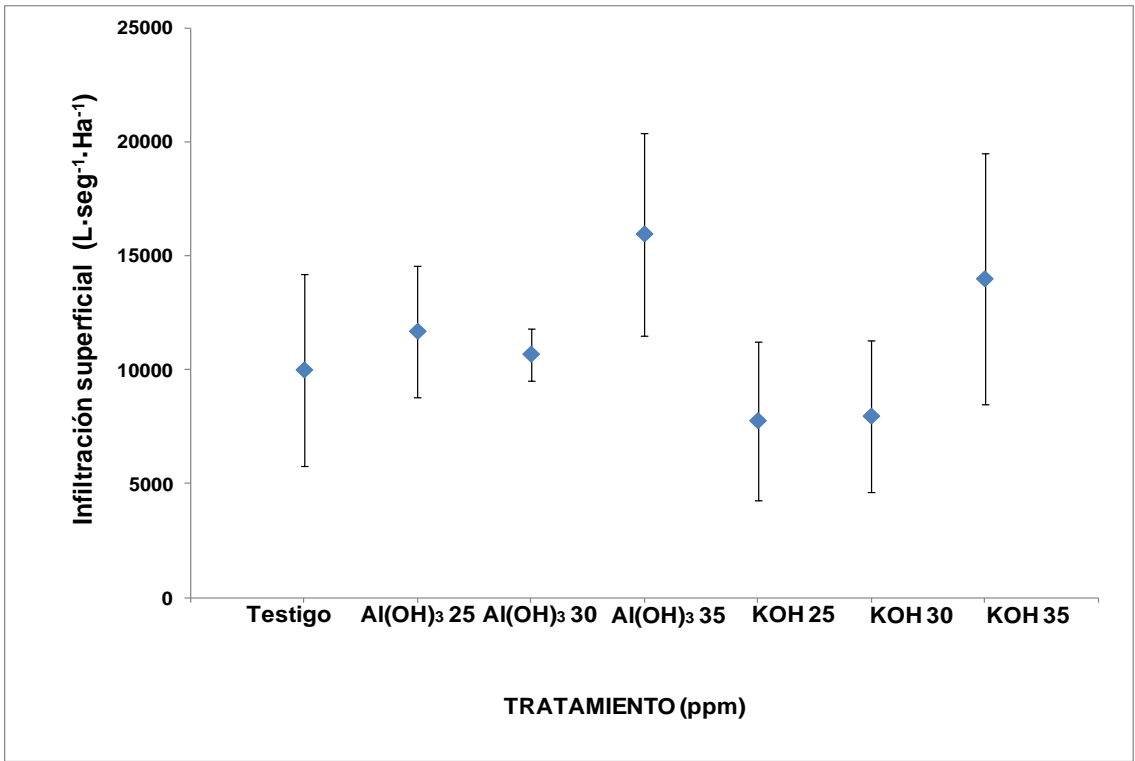


Figura 10. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la infiltración superficial (0 a 5 cm de prof.) del suelo de una PAM del PNIP.

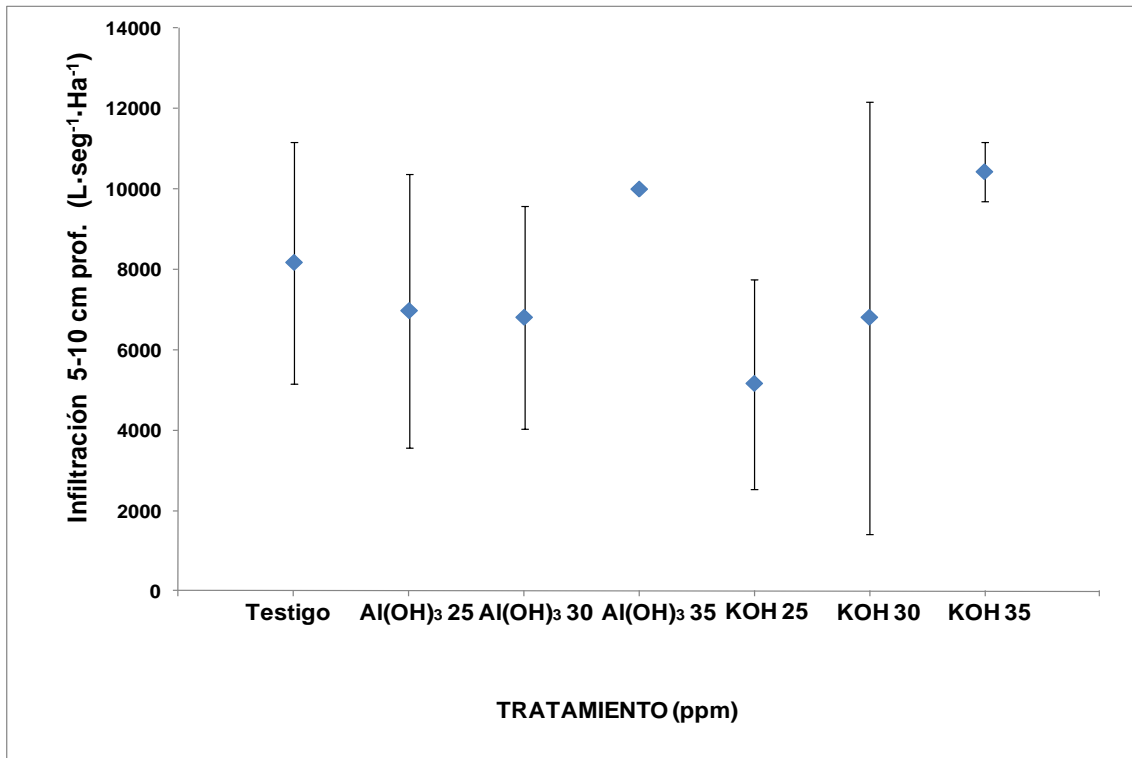


Figura 11. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la infiltración a una profundidad de 5 a 10 cm del suelo de una PAM del PNIP.

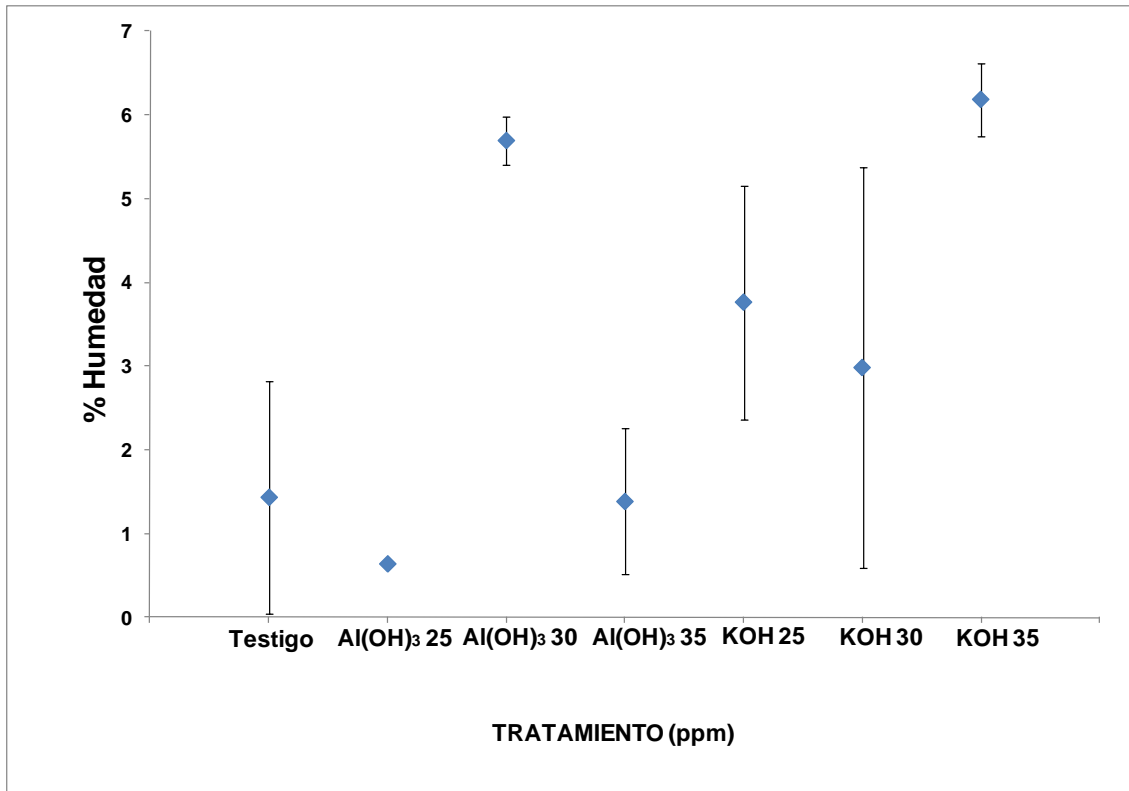


Figura 12. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el contenido de humedad del suelo de una PAM del PNIP.

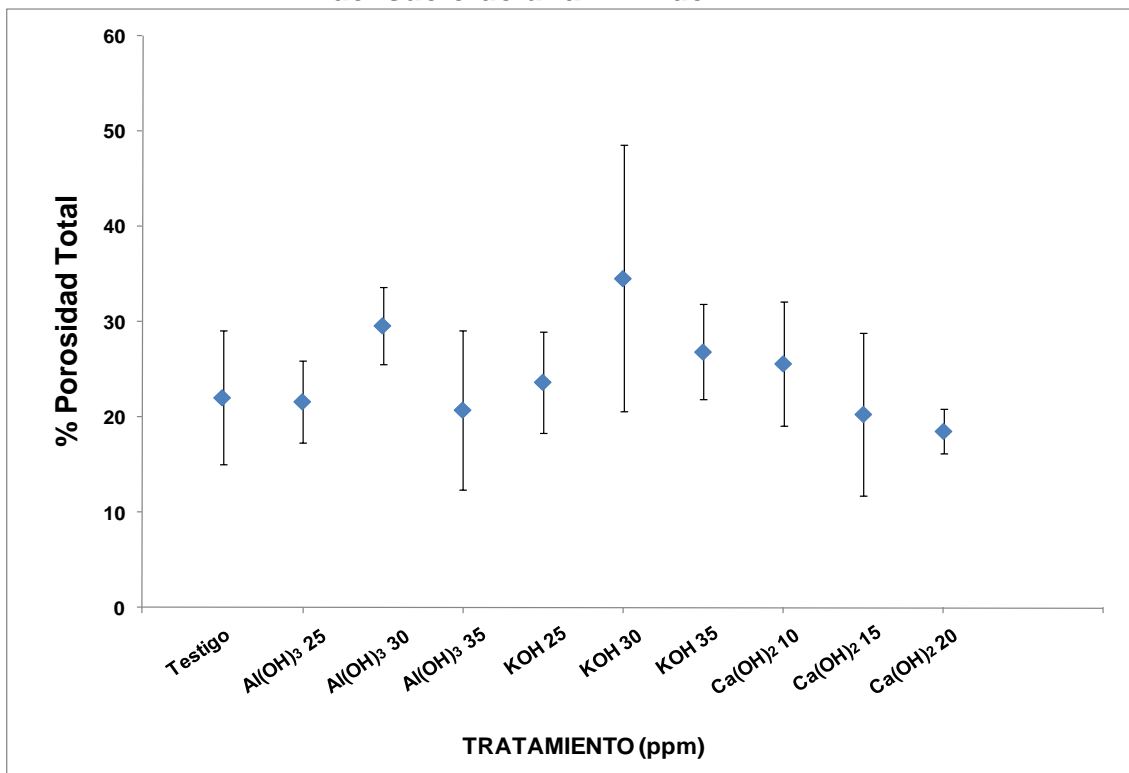


Figura 13. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el porcentaje de porosidad (secciones delgadas) del suelo de una PAM del PNIP.

permitiendo así la entrada de agua y, por lo tanto un aumento en las propiedades hídricas del suelo.

El incremento del potencial de flujo mátrico coincide con el aumento en el contenido de humedad del suelo con el mismo tratamiento (KOH 35 ppm); esto puede atribuirse a que con dicha concentración se puede modificar ligeramente la fuerza capilar del suelo, por lo tanto, su capacidad de adsorción de agua por parte de los agregados. López (2000) señala que los poros capilares realizan una fuerte retención y almacenamiento de agua, que estará disponible para las plantas.

Estos resultados son similares a los registrados por Jiménez-Cruz (2011), en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, quien encontró que la adición de hidróxidos incrementó un 126% en la K_{fs} , la infiltración un 8%, el potencial de flujo mátrico un 86%, la capacidad de retención de humedad 259% y el espacio poroso un 45%; sin embargo, son diferentes a los registrados por González-Vargas (2011), quien reportó un incremento del 50% en el contenido de humedad del suelo, mientras que para la K_{fs} , tasa de infiltración, potencial de flujo mátrico y densidad aparente no registró diferencias significativas.

En cuanto a la composición mineralógica, con el análisis de las secciones delgadas en el microscopio petrográfico se pudo definir que todas las muestras están compuestas en su mayor parte por vidrios volcánicos (Andosol vítrico), feldespatos (muy comunes en Andosoles), plagioclasas y ferromagnesianos (Figura 14).

Con base en el análisis micromorfológico, se determinó que con el tratamiento KOH 25 ppm se produce una mejor agregación y mayor espacio poroso, obteniendo un cambio en la estructura del suelo de granular simple a bloques subangulares y formación de macroporos y poros tipo fisura; con KOH 30 y 35 ppm se observó la formación de microagregados (Figura 15); con $Al(OH)_3$ 25 y 35 ppm se favorece la actividad biológica en el suelo; con $Al(OH)_3$ 30 ppm se pudo observar un ligero colapsamiento en su estructura, favoreciendo la microagregación (Figura 16); mientras que con $Ca(OH)_2$ 10 y 15 ppm empiezan a

conglomerarse los vidrios volcánicos y por lo tanto, se abre levemente el espacio poroso (Figura 17).

a) Análisis nutrimental

Al realizar el análisis del estado nutrimental del suelo de PAM se detectó que en esta zona los cationes intercambiables tienen un nivel adecuado; para Ca, Mg y K se registraron valores de 10.58 (± 5.45), 2.37 (± 0.07) y 0.97 (± 0.65) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente; mientras que para Na se obtuvo de 2.08 (± 0.32) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 7), por lo anterior el problema no es la deficiencia de estos nutrimentos.

Cuadro 7. Nivel de nutrimentos del suelo de PAM del PNIP.

Catión Intercambiable	Concentración $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	Clase (NOM-021-RECNAT-2000)
Ca	10.58 (± 5.45)	Alta
Mg	2.37 (± 0.07)	Media
K	0.97 (± 0.65)	Alta
Na	2.08 (± 0.32)	--

b) pH y densidad aparente

El pH del suelo no se modificó significativamente con ninguno de los tratamientos aplicados en campo; solamente se logró un ligero incremento con los tratamientos de KOH 25 y 30 ppm, de 3.83 a 4.11 y 4.07, respectivamente (Figura 18). Estos valores indican que las concentraciones aplicadas en campo no resultaron ser suficientes para lograr un incremento en el pH. Por lo anterior, se recomienda incrementar 20 veces la concentración de KOH para que alcance una profundidad de por lo menos cinco centímetros, lo cual requiere ser probado experimentalmente.

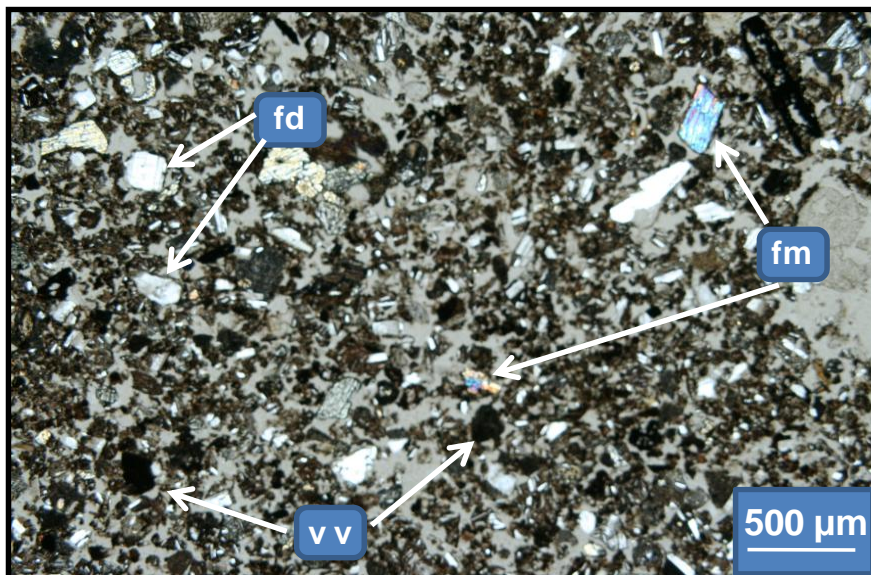
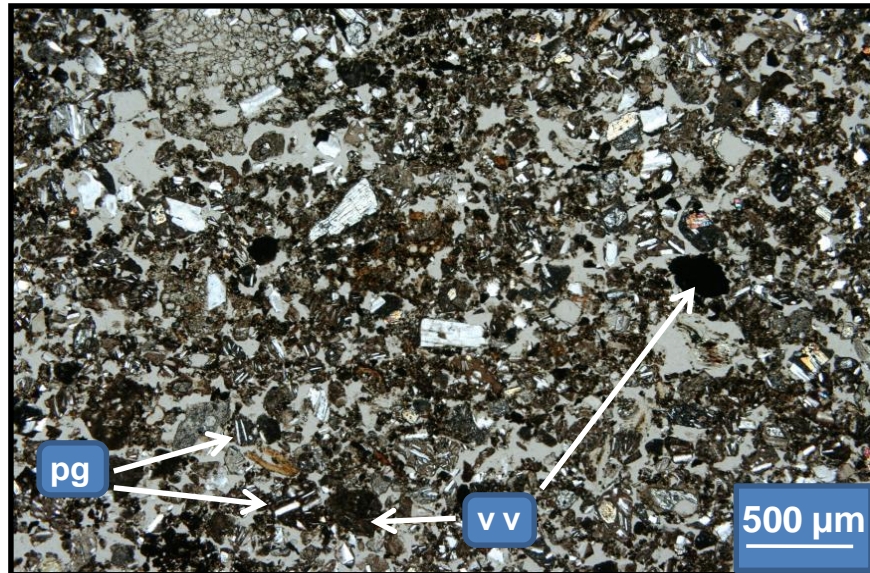


Figura 14. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas, con luz semicruzada, que muestran un Andosol vítrico de PAM del PNIP. Vidrios volcánicos (vv), Feldespatos (fd), Plagioclasas (pg), Ferromagnesianos (fm).

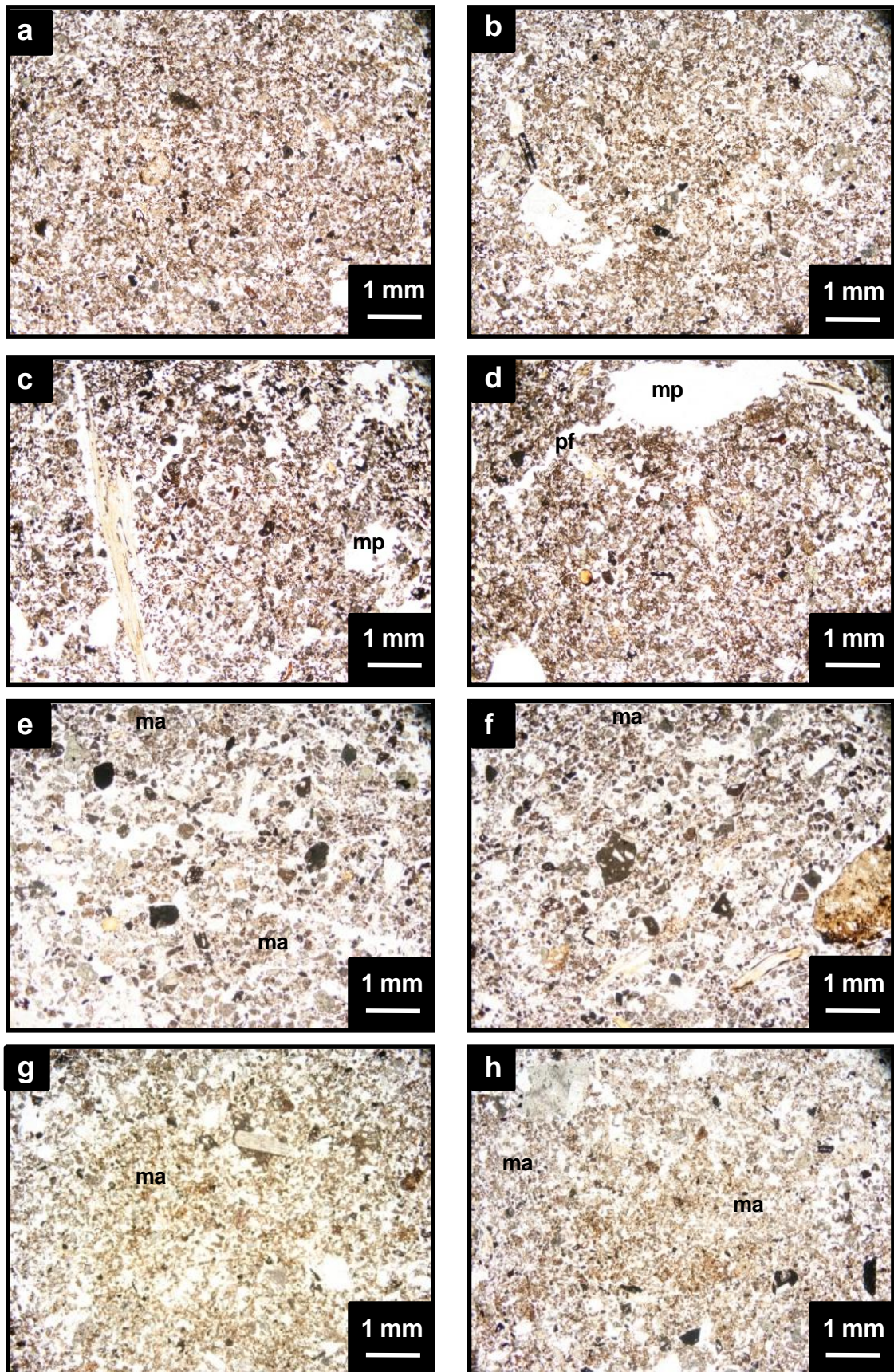


Figura 15. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de KOH. Estructura de empaquetamiento compuesto en (a) y (b): sin tratamiento; estructura de bloques subangulares, macroporos (mp) y poros tipo fisura (pf) en (c) y (d): KOH 25 ppm; microagregados (ma) en (e) y (f): KOH 30 ppm y en (g) y (h): KOH 35 ppm.

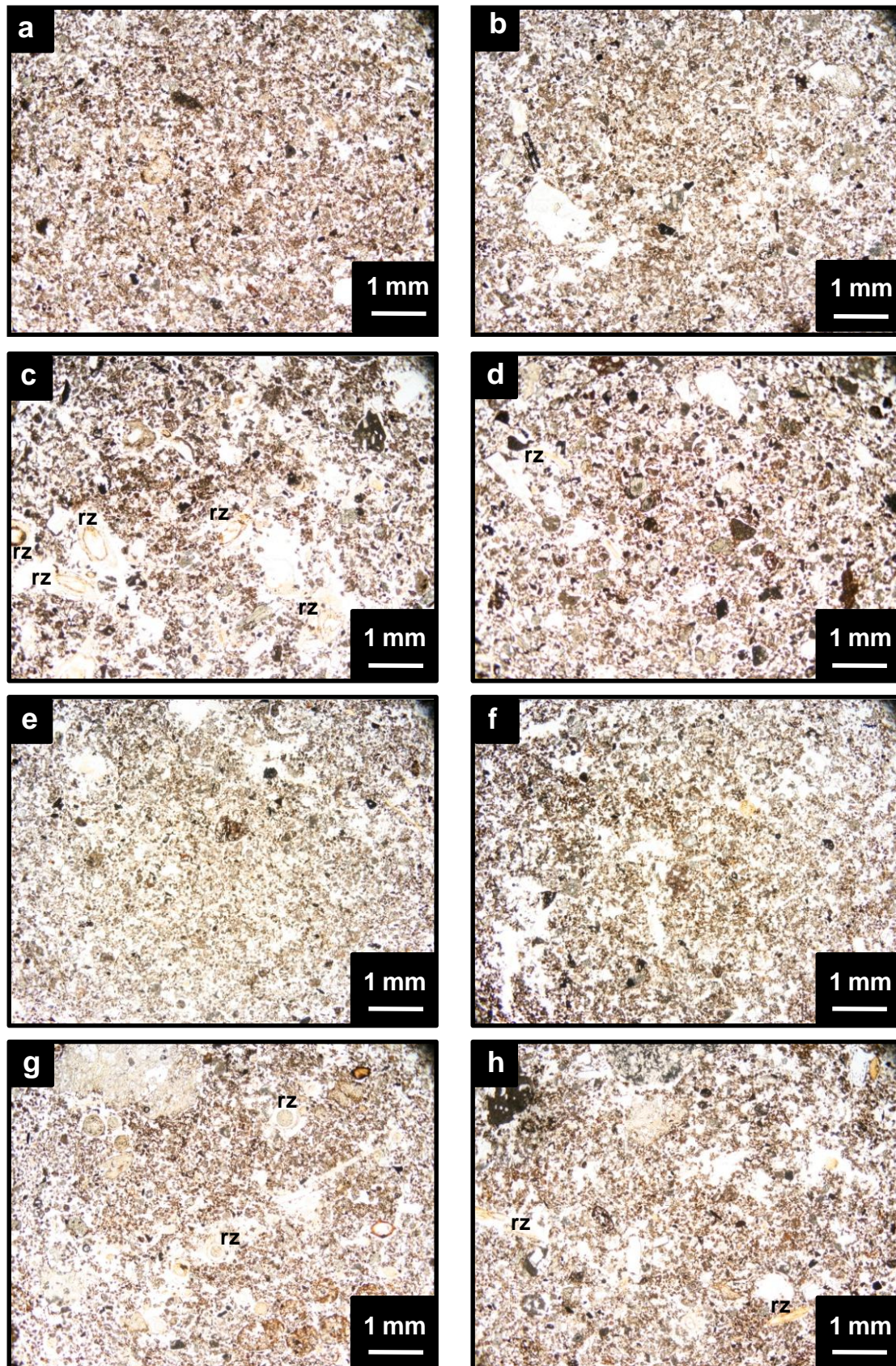


Figura 16. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de Al(OH)_3 . Estructura de empaquetamiento compuesto en (a) y (b): sin tratamiento; actividad biológica por raíces (rz) en (c) y (d): Al(OH)_3 25 ppm; colapsamiento de estructura en (e) y (f): Al(OH)_3 30 ppm; (rz) en (g) y (h): Al(OH)_3 35 ppm.

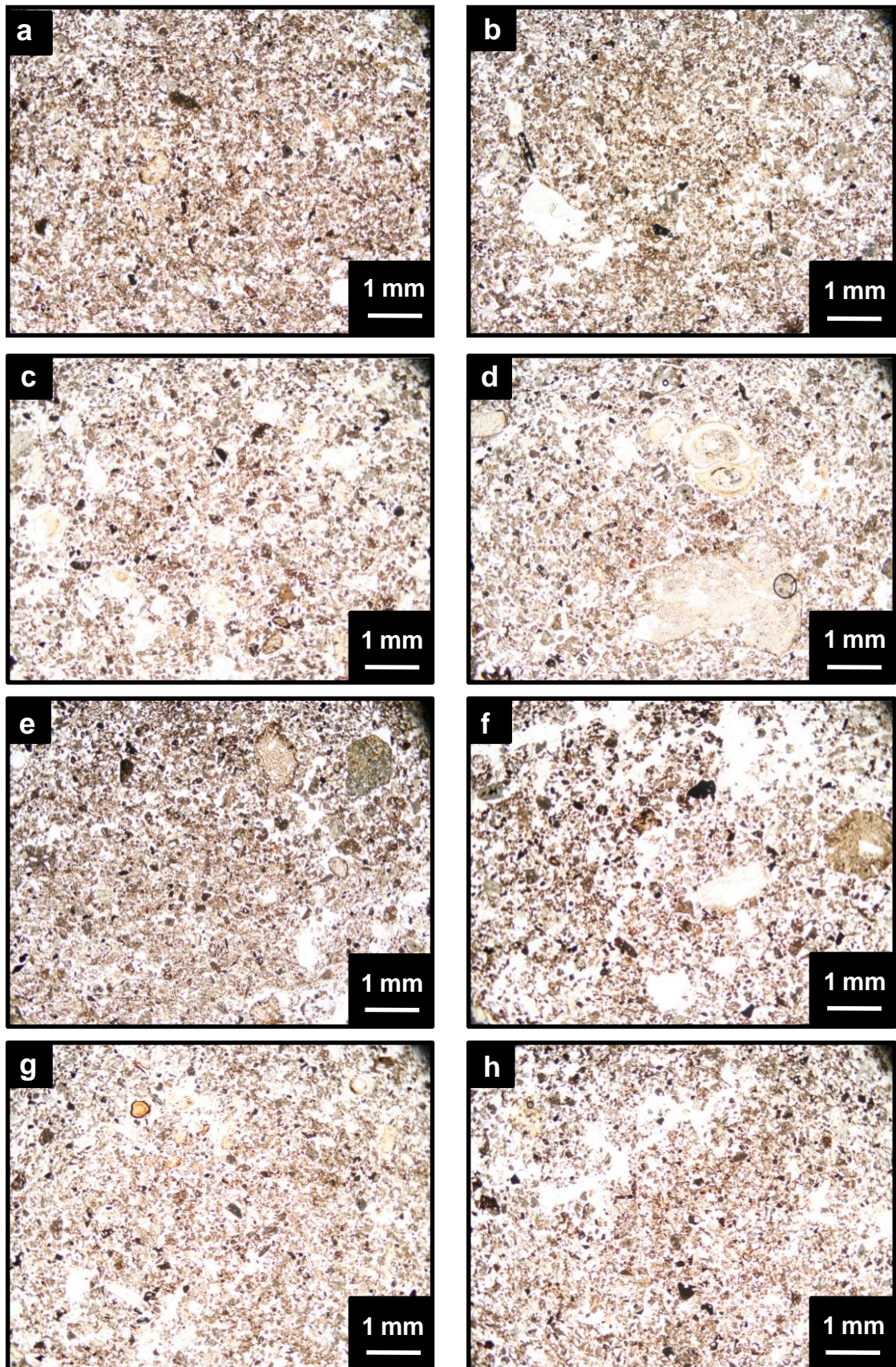


Figura 17. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de una PAM del PNIP. Efecto de la adición de Ca(OH)_2 . Estructura de empaquetamiento compuesto en (a) y (b): sin tratamiento; conglomeración de vidrios volcánicos en (c) y (d): Ca(OH)_2 10 ppm; en (e) y (f): Ca(OH)_2 15 ppm y en (g) y (h): Ca(OH)_2 20 ppm.

La densidad aparente se registró con un valor de $0.56 (\pm 0.07) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, y el tratamiento de KOH 25 ppm fue el único que mostró un cambio significativa ($P=0.04$) a $0.45 (\pm 0.02) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ (Figura 19). Esta disminución indica un aumento en el espacio poroso.

d) Desarrollo de *P. hartwegii*

La longitud y diámetro de las yemas apicales de los pinos a los que no se aplicó tratamiento tienen una media de $2.3 (\pm 0.75)$ y $0.75 (\pm 0.21)$ cm, respectivamente (Cuadro 8). Los análisis mostraron que la longitud de las yemas apicales disminuyó con todos los tratamientos; se redujo un 63, 50 y 39% con los tratamientos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ 30 y 35 ppm y KOH 30 ppm, respectivamente ($P=0.01$, 0.03 y 0.05). El diámetro de los renuevos también disminuyó con todos los tratamientos (Cuadro 9); sin embargo, ninguna reducción fue significativa.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Jiménez-Cruz (2011), quien aplicó hidróxidos en plantaciones de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, y no detectó cambio significativo en la longitud y diámetro de los renuevos.

La disminución en la longitud de renuevos posiblemente está relacionada con un estrés hídrico y con bajas temperaturas según Marschner (1995). Al respecto Leblanc *et al.* (2012) han señalado que a nivel mundial ocurrió un periodo denominado sequía del milenio, desde mediados de 1990 hasta 2010.

La longitud foliar de los pinos sin tratamiento fue de $7.18 (\pm 3.55)$ cm, valor que está por debajo de lo reportado por Calderón de Rzedowski y Rzedowski (2001), quienes mencionan que las hojas de esta especie alcanzan hasta 18 cm. También se observó la presencia de tres hojas en cada fascículo (Cuadro 8). A excepción del tratamiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ 25 ppm, todos los tratamientos ocasionaron un incremento significativo en la longitud foliar (Cuadro 9); con KOH 25 ppm aumentó a $13.52 (\pm 3.33)$ cm, con KOH 30 ppm a $13.23 (\pm 4.13)$ cm, con $\text{Al}(\text{OH})_3$ 30 ppm a $12.16 (\pm 1.46)$ cm, con KOH 35 ppm a $11.62 (\pm 4.46)$ cm y con $\text{Al}(\text{OH})_3$ 35

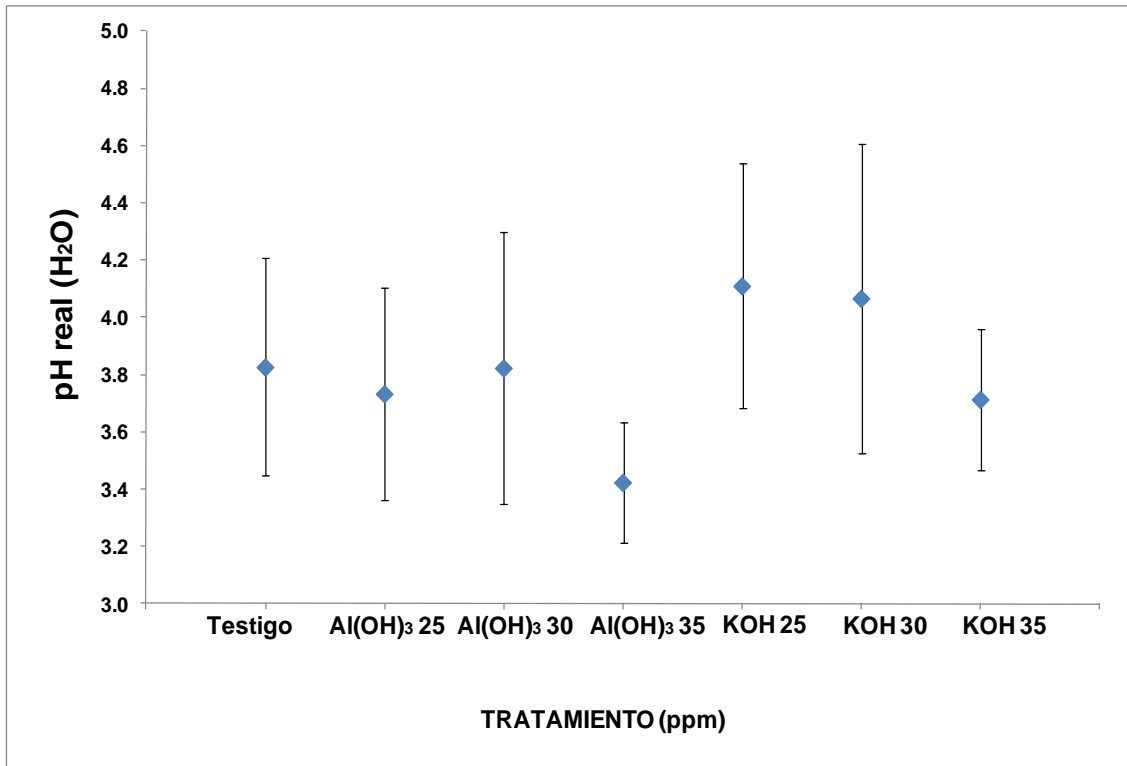


Figura 18. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el pH del suelo de una PAM del PNIP.

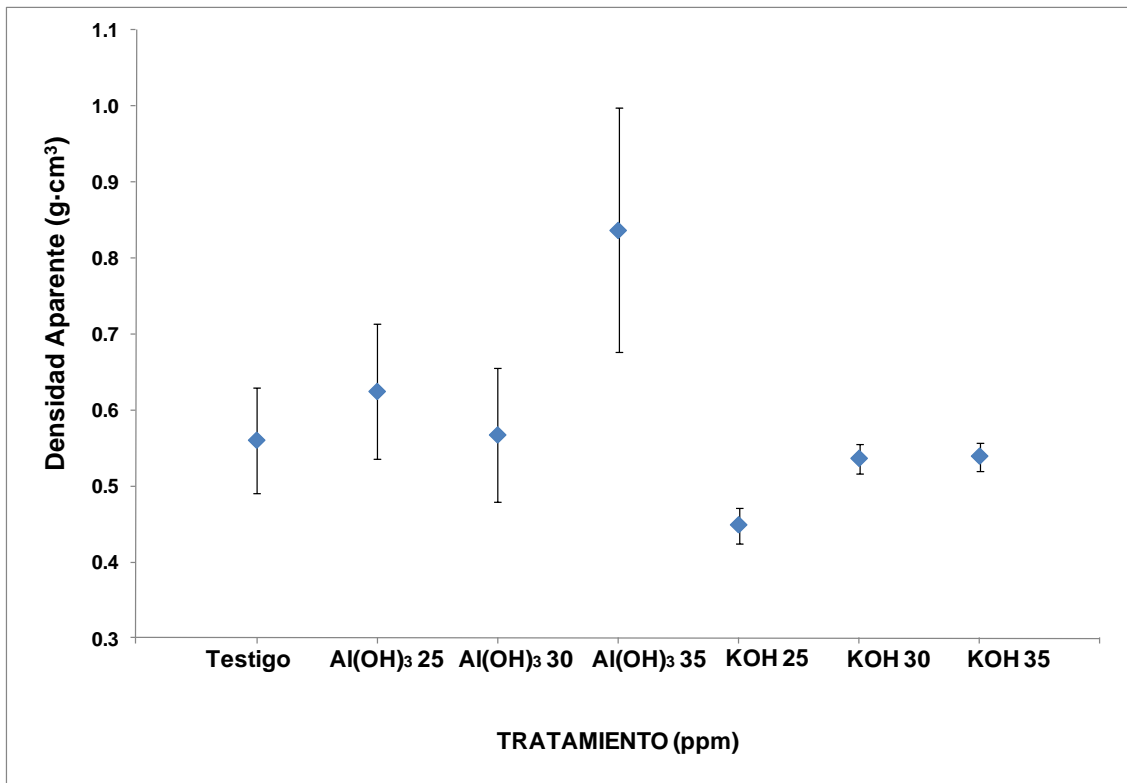


Figura 19. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la densidad aparente del suelo de una PAM del PNIP.

Cuadro 8. Características de *Pinus hartwegii* Lindl. (media \pm desviación estándar) en PAM del PNIP.

Longitud de yemas apicales	Diámetro de yemas apicales	Longitud foliar	Núm. de hojas por fascículo	Humedad foliar	Biomasa
cm	cm	cm		%	g
2.13 (\pm 0.75)	0.75 (\pm 0.21)	7.18 (\pm 3.55)	3	62.33 (\pm 3.53)	2.04 (\pm 1.75)

ppm a 11.53 (± 4.43) cm ($P=0.00004$, 0.0001, 0.00009, 0.004 y 0.004, respectivamente).

Este incremento puede atribuirse a que el K^+ es un elemento fundamental en el crecimiento de las células vegetales. Al respecto, Marschner (1995) señala que la extensión de las células en las hojas está estrechamente relacionada con el contenido de K^+ , por lo que su adición en sitios deficientes, muestra plantas con mayor crecimiento de hojas. Estos resultados difieren al registrado por Jiménez-Cruz (2011) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, donde únicamente la adición de $Ca(OH)_2$ 10 ppm incrementa un 53% la longitud foliar de esta especie, por lo que se considera que existen diferencias en el tipo de suelos y su composición .

En general, la adición de hidróxidos disminuye el porcentaje de humedad foliar en *Pinus hartwegii* (Cuadro 9). Con los tratamientos de KOH, la disminución no fue significativa; mientras que con $Al(OH)_3$ a 25, 30 y 35 ppm disminuye significativamente el porcentaje de humedad foliar ($P=0.01$), de 62.33 (± 3.53) a 7.43 (± 1.5), 10.5 (± 0) y 8.97 (± 2.82) %, respectivamente, lo que indica una disminución debido a una alta toxicidad por aluminio. A pesar de que el ión K incrementa la longitud foliar, muy posiblemente falta mayor concentración para ser acumulado en las células guarda, que son las responsables de la acumulación de agua y mantener el potencial osmótico de las células vegetales. De acuerdo con Marschner (1995), en la mayoría de las especies vegetales, el K^+ asociado con un anión es el principal responsable de los cambios de turgencia en las células guarda y, por lo tanto, en su humedad foliar.

Con respecto a la biomasa de las hojas y yemas apicales de los individuos de *P. hartwegii*, con el tratamiento de KOH 30 ppm se de 2.04 (± 1.75) a 4.42 (± 2.48) g, cambio que no fue significativo ($P=0.08$) (Cuadro 9); sin embargo, el valor registrado en esta zona es mayor al reportado por Jiménez-Cruz (2011) para la misma especie (1.39 g).

Con base en los datos registrados, se puede establecer que el crecimiento de *P. hartwegii* en esta zona es deficiente.

Cuadro 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el desarrollo de *Pinus hartwegii* Lindl. (media \pm desviación estándar) en PAM del PNIP.

Tratamiento (ppm)	Longitud de yemas apicales	Diámetro de yemas apicales	Longitud foliar	Núm. de hojas por fascículo	Humedad foliar	Biomasa
	cm	cm	cm		%	g
Sin tratamiento	2.13 (± 0.75) ^a	0.75 (± 0.21) ^a	7.18 (± 3.55) ^a	3	62.33 (± 3.53) ^a	2.04 (± 1.75) ^a
Al(OH) ₃ (25)	1.61 (± 0.70) ^a	0.80 (± 0.39) ^a	7.11 (± 0.73) ^a	3	7.43 (± 1.50) ^c	1.93 (± 0.02) ^a
Al(OH) ₃ (30)	0.8 (± 0) ^b	0.60 (± 0) ^a	12.16 (± 1.46) ^c	3	10.50 (± 0) ^b	2.47 (± 0) ^a
Al(OH) ₃ (35)	1.08 (± 0.45) ^a	0.65 (± 0.20) ^a	11.53 (± 4.43) ^b	3	8.97 (± 2.82) ^d	2.32 (± 1.54) ^a
KOH (25)	1.58 (± 0.66) ^a	0.69 (± 0.18) ^a	13.52 (± 3.33) ^c	3	60.70 (± 1.37) ^a	2.51 (± 1.18) ^a
KOH (30)	1.30 (± 0.62) ^b	0.67 (± 0.20) ^a	13.23 (± 4.13) ^b	3	58.71 (± 5.81) ^a	4.42 (± 2.48) ^a
KOH (35)	1.43 (± 0.77) ^a	0.61 (± 0.22) ^a	11.62 (± 4.46) ^b	3	57.27 (± 4.17) ^a	1.98 (± 1.35) ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel $P \leq 0.05$.

8. DISCUSION GENERAL

En síntesis se puede comentar que las praderas de alta montaña del PNIP, presentan bajos valores de K_{fs} , infiltración, Φ_m y % de humedad, lo que se atribuye a que los suelos son fuertemente ácidos, ligeramente hidrófobos, y con baja porosidad (22.07 %), ocasionada por su estructura micromorfológica de granos simples, ya que es un suelo arenoso. Al respecto Kirk-Nordstrom (2009), señala que las rocas de estos suelos al disgregarse liberan ácido sulfúrico que al combinarse con el agua vuelven ácido al suelo; además, Bull *et al.* (2000) y Chagué-Goff *et al.* (2010) señalan que los pastizales generan sustancias hidrófobas y ácidas; Reynolds *et al.* (2002) mencionan que los suelos con texturas gruesas tienden a tener baja capilaridad y, por lo tanto, una escasa retención de humedad.

La interpretación ecohidrológica de la zona de PAM del PNIP indica que los zacatonales producen sustancias hidrófobas y ácidas que, aunado a la acidez generada por el material parental, ocasiona suelos fuertemente ácidos, en los que se incrementa la disponibilidad de Al^{3+} y debido a su toxicidad, se eleva la mortalidad de las plantas utilizadas en la reforestación. Además, el Al^{3+} forma complejos con la materia orgánica, los cuales floculan en el agua, lo que explica los bajos valores de K_{fs} e infiltración y retención de humedad, así como la generación de escurrimientos superficiales.

Este trabajo muestra la importancia de realizar un diagnóstico de las propiedades hídricas de los suelos en sitios que se pretenden reforestar, para garantizar una mayor supervivencia y desarrollo, y así generar bosques altamente productivos. Asimismo, la propuesta de utilizar hidróxidos en la restauración de suelos que presentan propiedades hídricas deficientes, en zonas importantes de recarga de acuíferos, es altamente recomendable con el fin de mejorar el servicio ambiental hidrológico en las principales cuencas hidrológicas del país.

9. CONCLUSIONES

1. Los suelos de las PAM del PNIP son fuertemente ácidos y ligeramente hidrófobos, lo que ocasiona bajos valores de K_{fs} , infiltración, Φ_m , retención de humedad y porosidad, además del fracaso en las reforestaciones
2. La adición de hidróxidos degradó químicamente la capa hidrófoba, modificó la microestructura del suelo e incrementó las propiedades hídricas.
3. El tratamiento de KOH 35 ppm es el que ocasionó mayor cambio en la K_{fs} , la infiltración y la porosidad total.
4. Todos tratamientos utilizados, con excepción de $Al(OH)_3$ 25 ppm, incrementaron la longitud foliar en *Pinus hartwegii*.

10. ESTUDIOS A FUTURO

Los estudios sobre las propiedades hídricas del suelo y su diagnóstico ecohidrológico, son necesarios para el éxito de las reforestaciones que se realicen en los próximos años, en zonas importantes para la recarga de acuíferos y, al mismo tiempo, para la restauración del servicio ambiental hidrológico.

Será necesario evaluar el efecto de la adición de hidróxidos sobre el porcentaje de macro, meso y microporos del suelo.

Se recomienda evaluar la aplicación de KOH a concentraciones más elevadas, así como de las combinaciones de hidróxidos, para posteriormente valorar su efecto en las propiedades hídricas y en el desarrollo de *Pinus hartwegii*.

Asimismo, se sugiere probar esta estrategia de restauración en diferentes zonas con importancia hidrológica, en sitios donde haya ocurrido incendio superficial (el 90% de los incendios forestales a nivel nacional son de tipo superficial), en suelos con problemas de compactación y en suelos con problemas de erosión hídrica, que constituyen el 4 y 10% de la degradación del suelo del territorio nacional, respectivamente.

11. LITERATURA CITADA

- Aguirre Gómez, A., 2001. *Química de los suelos ácidos, templados y tropicales*. FES Cuautitlán, UNAM, México.
- Almeida Leñero L., Escamilla M., Giménez de Azcárate J., González A. y Cleef A., 2007. *Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca*. En: Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D. (Eds.). *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana*. UNAM. México, pp 179-198.
- Almeida L., Cleef A. M., Herrera A., Velazquez A. y Luna I., 1994. El zacatonal alpino del Volcán Popocatepetl, México, y su posición en las montañas tropicales de América. *Phytocoenología*, 23(3):391-436. Berlin.
- Ángeles Cervantes E.R., 2010. *Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de Oyamel*. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Baver L.D., Gardner W.H. y Gardner W.R., 1980. *Física de suelos*. México, Ed. Hispano-Americana, México.
- Breuer J. y Schwertmann U., 1999. Changes to hardsetting properties of soil by addition of metal hydroxides. *European Journal of Soil Science* 50:657-664.
- Bull I. D., Nott C. J., van Bergen P. F., Poulton P. R. y Evershed R. P., 2000. Organic geochemical studies of soils from the classical experiments-VI. The occurrence and source of organic acids in an experimental grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry* 32:1367-1376.
- Bullock, P., Stoops, A., Jongerius, A., Fedoroff, N., Tursina, T., 1999. *Manual para la Descripción de Micromorfológica de Suelos*. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, 1a. ed. en español.
- Calderón de Rzedowski G. y J. Rzedowski., 2001. *Flora fanerogámica del Valle de México*. CONABIO-Instituto de Ecología-UNAM. Michoacán. México.
- Campos Cascaredo A., Oleschko K., Cruz H. L., Etchevers J.D. y Hidalgo M.C., 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del Volcán Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana* 19:105-116.
- Candan F. y Broquen P., 2009. Aggregate stability and related properties in NW Patagonian Andisols. *Geoderma* 154:42-47
- Castro Alonso A., 2009. *Conductividad hidráulica en bosques y pradera de alta montaña de Amecameca, Estado de México*. Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza, UNAM
- Chagué Goff C., Mark A.F., Dickinson K.J.M., 2010. Hydrological processes and chemical characteristics of low-alpine patterned wetlands, south-central New Zealand. *Journal of Hydrology*, 385:105-119

- Challenger A., 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Chávez-Barrera J. S., 2011. *Efectos del sistema roza, tumba y quema sobre el servicio ambiental hidrológico en un bosque tropical perennifolio de la cuenca del Papaloapan, Oaxaca*. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- Contreras Sanchez S., 2006. *Ordenamiento ecológico regional en la zona de influencia de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl*, SEMARNAT, México.
- Cuevas Becerra J., 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 6(2):13-27
- De Bièvre B., Iñiguez V., Buytaert W., 2006. *Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. Conocer para conservar*. Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca, Chile.
- Dekker, L.W. y Jungerius P. D. 1990. *Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands*. En: Jaramillo Jaramillo D.F. 2004. *Repelencia al agua en suelos. Con énfasis en suelos de Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Dekker, L.W., y Ritsema, C.J. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research* 30(9):2507-2517.
- Diez Hernández, J.M., 2008. Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales. *Revista Ingeniería e Investigación* 28:97-107.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51:33–65.
- Duchaufour P., 1984. *Edafogénesis y clasificación*. Ed. Mason, España.
- Duque Zapata J.R., Arbeláez Mesa S.P., Jaramillo Jaramillo D.F. y León Peláez J.D., 2004. *Hidrofobicidad en Andisoles bajo robledal (Quercus humboldtii) y plantaciones forestales (Pinus patula y Cupressus lusitanica) en la cuenca de la quebrada piedras blancas (Medellín, Colombia)*. Facultad de Ciencias Agropecuarias de Colombia.
- FitzPatrick E.A., 1985. *Suelos: su formación, clasificación y distribución*. Ed. Continental. México.
- Fontes J.C., Goncalves J.M., Pereira L.S., 2004. Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena* 56:145–154.
- Funakawa S., Hirooka K. y Yonebayashi K., 2008. Temporary storage of soil organic matter and acid neutralizing capacity during the process of pedogenetic acidification of forest soils in Kinki District, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 54, 434–448.
- García-Calderón N., Krasilnikov P. Valera M.A., y Torres, E. 2007. *Suelos*. En: Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D. (Eds.). *Biodiversidad De la Faja Volcánica Transmexicana*. UNAM. México, pp 73-98.

- García Plata A., Patiño Sánchez M., Ángeles Cervantes E., 2011. *Conductividad hidráulica e infiltración en bosques del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México*. Red del Agua, UNAM.
- García Romero A., 2004. Dinámica del paisaje post-fuego en el pastizal tropical de alta montaña. Volcán Iztaccíhuatl, México. *Interciencia* 29(011):604-611.
- Granados Damián M.S., 2003. *Calidad del suelo y estado nutrimental del género Pinus en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl*. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- González Vargas T., 2011. *Ecohidrología de un bosque de oyamel: diagnóstico y rehabilitación*. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- Harrison W.J., MacLeod D.A. y McKenzie D.C., 1992. The effect of clay addition and gypsum application on the physical properties of a hardsetting red-brown earth, and the response of irrigated cotton. *Soil and Tillage Research* 25:231-244.
- Huang P. M., Wang M. K., Kämpf N. y Scheulze D., 2002. *Aluminium hydroxides*. En: Dixon J. B. y Darrel G. S., *Soil mineralogy with enviromental aplicaciones*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Ishiguro M. y Nakajima T., 2000. Hydraulic Conductivity of an Allophanic Andisol Leached with Dilute Acid Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64 No. 3.
- Jaramillo Jaramillo D.F., 2006. *Repelencia al agua en suelos: una síntesis*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 30(115):215-232.
- Jiménez Cruz D., 2011. *Restauración del servicio ambiental hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D.F., México*. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- Kirk Nordstrom D., 2009. Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration* 100:97-104.
- Leal H., González J.C., Hernández A., 2002. *Fundamentos de física para las ciencias agrícolas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Leblanc M., Tweed S., Van Dijk A. y Timbal B., 2012. A review of historic and future hydrological changes in the Murray-Darling Basin. *Global and Planetary Change. Elsevier* 80-81:226-246.
- Lipiec, J., Wójciga, A., Horn R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil and Tillage Research. Elsevier* 103:170-177.
- López C. R., Ortiz Solorio C. A., Quiñones G. H y Etchevers Barra J. D., 1988. Relación del pH en NaF con algunas propiedades químicas útiles en la caracterización de los Andisoles de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados. *Agrociencia* Num. 73.

- López F. Y., 2000. *Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera*. Universidad Nacional de Colombia
- Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D., 2007. *Biodiversidad De la Faja Volcánica Transmexicana*. UNAM. México.
- Marschner H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Institute of Plant Nutrition. University of Hohenheim. Alemania.
- Martínez Alfaro P.E., Martínez Santos P., Castaño S., 2006. *Fundamentos de hidrogeología*. Mundi-Prensa Libros. México.
- Martínez Hernández G. M. y Ángeles Cervantes E., 2011. *Ecohidrología y reforestación en el Parque Nacional Cumbres el Ajusco*. Red del Agua, UNAM.
- Mc Murry J., 2008. *Química orgánica*. Ed. Cengage Learning, 7a. ed. México.
- Mora Santiago A., Páez Reyes J. C., Ángeles Cervantes E., 2011. *Evaluación del servicio ambiental hidrológico del Parque Nacional Pico de Orizaba*. 7º Congreso de Investigación y 1º de Posgrado en la FES Zaragoza, UNAM.
- Moral García, F. J., López Rodríguez, F., Martínez de Salazar, E., Marcos Hernández, A., 2002. *Influencias hidrológicas y ambientales de la repelencia al agua en los suelos arenosos*. Universidad de Extremadura. España.
- Mourier B., Poulénard J., Chauvel C., Faivre P., Carcaillet C., 2008. Distinguishing subalpine soil types using extractible Al and Fe fractions and REE geochemistry. *Geoderma* 145:107–120
- Muñoz Carpena R. y Ritter Rodríguez A., 2005. *Hidrología agroforestal*. Mundi-Prensa Libros. México.
- Muñoz Villers L. E., Holwerda F., Gómez Cárdenas M., Equihua M., Asbjornsen H., Bruijnzeel L. A., Marín Castro B. E. y Tobón C., 2011. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*. In press.
- Nakagawa T. e Ishiguro M., 1994. Hydraulic Conductivity of an Allophanic Andisol as Affected by Solution pH. *Journal of Environmental Quality* 23:208-210.
- NOM-021-RECNAT-2000, DIARIO OFICIAL, Martes 17 de octubre de 2000. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000.
- Pajares S., Covalada S., Gallardo J.F., Etchevers J.D. y Prat C., 2004. *Calidad Edáfica en Dos Toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejicano*. Colegio de Postgraduados. México.
- Peters J., Wieme V., Boeckx P., Samson R., Godoy R., Oyarzún C. y Verhoest N., 2005. *Monitoreo ecohidrológico en ecosistemas naturales y manejados en el sur de Chile*. *Gayana Botánica* 62(2): 120-129.

- Pires L.F., Cooper M., Cássaro F.A.M., Reichardt K., Bacchi O.O.S., Dias N.M.P.. 2007. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. *Catena* 72: 297-304.
- Porta Casanellas J. y Lopez Acevedo M., 2003. *Edafología/Edaphology: Para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa Libros. México.
- Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J., Collinet J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45:185–207.
- Prado B., Duwig C., Hidalgo C., Gómez D., Yee H., Prat C., Esteves M., Etchevers J.D., 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma* 139:300-313.
- Rangel Olvera L. M., Trinidad Santos A. y Aguilar Manjarrez D., 1996. *Efecto de algunos mejoradores sobre las propiedades químicas de los Andisoles*. Memorias XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Cd. Obregón, Sonora. La Investigación Edafológica en México.
- Reatto A., Bruand A., Silva E.M., Martins E.S. y Brossard M., 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizons of Latosol of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma* 139:51-59.
- Reynolds W.D. y Elrick D.E., 1985. In situ measurements of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α - parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science* 140:292-302.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., Youngs E.G., Amoozegar A., Booltnik H.W.G. y Bouma J., 2002. *Saturated and field-saturated water flow parameters*. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods*, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA.
- Rodríguez Tapia S., Guierrez Castorena M.C., Hidalgo C., Ortiz C. A., 1999. Intemperismo en tepetates y en cenizas volvanicas y su influencia en la formación de andisoles. Universidad Autónoma Chapingo, México. *Terra Latinoamericana* 17(2):97-108.
- Rzedowski J., 1978. *Vegetación de México*. Ed Limusa. México.
- Sandoval M., Castillo S.C., Zagal V.E., Stolpe L.N., Undurraga D.P. 2007. Parámetros hidráulicos determinados en un Andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7(2):32-45.
- Schulze D.G., 2002. *An Introduction to Soil Mineralogy*. En: *Soil Mineralogy with Enviromental Applications*. Number 7 in the Soil Science Society of America Book Series, Chapter 1.
- Shaxson F., Barber R., 2005. *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: el significado de la porosidad del sueño*. Volumen 79 de Boletín de suelos de la FAO, Food & Agriculture Org.

- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren R., 1993. *Volcanic Ash Soils: genesis, properties and utilization*. Elsevier, Holanda.
- Soilmoisture Equipment Corp., 1991. *Instructivo de manejo del Permeámetro Guelph*.
- Thompson, M. L. y Ukrainczyk L., 2002. *Micas*. En: *Soil Mineralogy with Enviromental Applications*. Number 7 in the Soil Science Society of America Book Series, Chapter 14.
- Touma J., Voltz M., Albergel J., 2007. Determining soil saturated hydraulic conductivity and sorptivity from single ring infiltration tests. *European Journal of Soil Science* 58: 29–238.
- USDA, 2000. *Hoja de información de calidad del suelo. Preocupación acerca del recurso de calidad del suelo: Hidrofobicidad*. Natural Resources Conservation Service (Departamento de Agricultura de EE.UU. - Servicio de Conservación de Recursos Naturales).
- USDA, 2001. *Soil Quality Test Kit Guide*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute.
- USDA, 2002. *Field Book for Describing and Sampling Soils*. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- USDA, 2008. *Soil Quality Indicators*, USDA, Natural Resources Conservation Service.
- van der Hammen, T., 2008. *El páramo: de la destrucción a la conservación*. En: Serrano E. C., *Memorias, Panorama y Perspectivas sobre la Gestión Ambiental de los Ecosistemas del Páramo*. Procuraduría General de la Nación. Imprenta Nacional de Colombia. Colombia.
- van der Salm C., Reinds G.J., de Vries W., 2007. Water balances in intensively monitored forest ecosystems in Europe. *Enviromental Pollution* 148:201-212.
- van Reeuwijk L.P., 1995. *Procedimientos para el análisis de suelos*. Ver.1995. Traducción de Gutiérrez Castorena M.C., Tavares Espinosa C.A. y Ortiz Solorio C.A. 1ª. ed. en español, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México. Pág.145.
- Velasco, M. H. A., 1983. *Uso y manejo del suelo*. Ed. Limusa. México, D. F. pp 81-184.
- Zapata Cruz A. y Galván Villanueva M.A., 2004. *Manual básico de Absorción Atómica para el manejo del equipo SpectraAA 200 Marca Varian*. UNAM, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Laboratorio de Servicios de la Carrera de Biología (Absorción Atómica).
- Zar, J.H., 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, 4a. ed.
- Zazueta Morales J.J., Martínez Bustos F., Jacobo Valenzuela N., Ordorica Falomir C. y Paredes López O., 2001. Effect of the addition of calcium hydroxide on some characteristics of extruded products from blue maize (*Zea maiz* L) using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81:1379-1386.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

CONANP, 2009.

<http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. *Fecha de consulta: mayo de 2010.*

SEMARNAT, 2000.

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica-am/informe/acrobat/capitulo2-1-7.pdf. *Fecha de consulta: mayo de 2012.*