



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**“Restauración del servicio ambiental hidrológico
de una pradera de alta montaña en el Parque
Nacional Cumbres del Ajusco, D. F. México”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:

DIANA JIMÉNEZ CRUZ

**DIRECTOR DE TESIS: DR. EFRAÍN R. ANGELES
CERVANTES**

**ASESORA EXTERNA: DRA. MARÍA DEL CARMEN
GUTIÉRREZ-CASTORENA**



OCTUBRE 2011



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.

Dedicatoria

A Dios por la fortaleza que me brinda en cada momento.

A mi hermosa familia:

A mis padres Felicitas Cruz y Felipe Jiménez quienes son los formadores de la esencia de mi persona, que han sido mi apoyo de toda la vida, gracias por ayudarme a cumplir este gran sueño y por su motivación desde siempre. Saben que este triunfo también es de ustedes y que es mi más grande herencia!

Los amo!

A mis hermanos Ricardo José, Paola, Felipe, Juan Carlos e Itasami Denisse mis fieles amigos y compañeros de esta gran travesía de la vida, por ser mi fortaleza ante todo, por su apoyo, confianza, consejos, por enseñarme que los sueños se pueden alcanzar, por compartir conmigo la alegría de vivir cada día. Por todos esos momentos juntos.....Gracias!

Los adoro!

En especial a Itasami Denisse nuestra angelita quien llena de felicidad cada día y nos ilumina con su presencia ante cualquier adversidad.

A ti por tu cariño, por seguir a mi lado a través del tiempo y la distancia.

Agradecimientos

A Dios porque cada día guía mi vida y me da la fortaleza que necesito... Gracias!!!

A la máxima casa de estudios, U.N.A.M, por darme la oportunidad de pertenecer a esta gran institución.

A la F. E. S. Zaragoza por permitirme formarme profesionalmente.

Al Dr. Manuel Rico Bernal por su apoyo desde el inicio de la carrera, por ser un excelente tutor, por guiarme no solo en el ámbito profesional sino personal por su ayuda en cada momento.

Al Dr. Efraín Ángeles por darme la oportunidad de estar en un excelente equipo de trabajo, por sus enseñanzas, por todo el conocimiento compartido, por su amistad y confianza.

A la Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena, por sus valiosos conocimientos y su importante colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Gerardo Cruz por sus enseñanzas, su amistad, confianza, y por su apoyo todos ellos son incondicionales en todos los ámbitos, por su valiosa contribución a este proyecto.

Al M. en C. Germán Calva por su amabilidad, consejos y colaboración en este trabajo.

Al M. en C. Faustino López por su confianza, consejos y colaboración en este trabajo.

A los profesores: Dr. Arcadio Monroy, M. en C. Marisela Valdés, Biól. José Luis Guzmán y Biól. Juan Manuel Valderrábano por su amistad y sus conocimientos compartidos.

A las Familias Jiménez y Cruz: tíos, tías y primos; en especial mis abuelos así como a mis primas Rocío, Alejandra y Jessica por motivarme a continuar cada día.

A la Familia Cortés Mendoza, por su valiosa amistad, su apoyo incondicional y porque de cada uno de sus sabios consejos aprendí que quien persevera alcanza.

*A mis colegas Yazmín Martínez, Blanca Sandoval, Guadalupe Guzmán, Alejandro Soledad, Sacnité Chávez, Tania González, Osvaldo Rodríguez, Edgardo Germán, Adriana Vallejo, Mariana Zamudio, Jesús Salgado, Itzel Morales, Diana Vázquez, Janet García, César Mora, Cecilia de Dios, Alejandro Rodríguez, Eder Guzmán, Adrián Alarcón, Manuel García y Beyibet Bernal: **Gracias por su invaluable amistad y por todos los momentos compartidos en esta grandiosa carrera. Saben que cada uno ocupa un lugar importante y especial en mi corazón.***

A mi colega y amigo, M. en C. Patricio Guzmán por su excelente trato y su apoyo durante la estancia en el Colegio de Postgraduados.

A mis amigos de la nueva generación Elizabeth Montiel, Marisol Martínez, Jesús A. Aldana por su cariño y por su continuo apoyo en el trabajo en campo.

A Oliva Medina, Carmen Lobato, Blanca Pérez y Hugo Ruíz por su motivación, su incondicional amistad y apoyo en todo momento a pesar de la distancia.

A ti por tu amistad porque siempre confiaste en mí y sabes que esto es el comienzo de nuevas metas por cumplir, cuentas conmigo, no olvides... FUERZA!!

A BSM por los momentos compartidos, por escucharme siempre, por entender mis locuras, soportar mis enojos y por demostrarme tu cariño.

Sin duda, a MBF por ser alguien especial en mi vida porque en todo momento me diste alegría para continuar, contigo a mi lado los momentos siempre son gratos.

A ti MGA por todas las enseñanzas que me diste en cada momento compartido, por todas las alegrías que siempre quedarán en mi mente y mi corazón, por seguir a mi lado ante todo.

A todos aquellos que estuvieron y están compartiendo su tiempo, sus experiencias, sus consejos y sobretodo su valiosa amistad.

*La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento,
sino también en la destreza de aplicar
los conocimientos en la práctica.*

-Aristóteles-

Hay tres cosas en la vida que nunca regresan...

El tiempo, las palabras y las oportunidades.

Hay tres cosas que pueden destruirte...

la mentira, el orgullo y la envidia.

Hay tres cosas que nunca debes perder...

La paciencia, la esperanza y la honestidad.

Pero hay tres cosas de mayor valor...

La familia, el amor y la amistad.

-Anónimo-

*The thin layer of soil covering
the earth's surface represents the
difference between survival
extinction for most terrestrial life.*

-John W. Doran and Timothy B. Parkin

ÍNDICE

	Página
Índice de cuadros	III
Índice de figuras	IV
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Servicio ambiental hidrológico (SAH)	3
2.2 Praderas de alta montaña (PAM)	4
2.3 Importancia hidrológica de las praderas de alta montaña	6
2.4 Andosoles	6
2.5 Propiedades hídricas de Andosoles	7
2.6 Propiedades químicas de Andosoles	10
2.7 Hidrología y minerales en Andosoles	12
2.8 Efectos de la adición de hidróxidos	13
3. PROBLEMÁTICA	14
4. OBJETIVOS GENERAL	16
4.1 OBJETIVOS PARTICULARES	16
5. Zona de estudio	17
5.1 Características de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	19
6. MÉTODO	20
6.1 Selección del sitio de muestreo	20
6.2 Muestreo de suelo	20
6.3 Determinación de la acidez total y cuantificación del requerimiento de alcalinizante	20

	Página
6.4 Análisis químico del suelo	21
6.5 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos	22
6.5.1 Sobre el crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i>	22
6.5.2 Sobre las propiedades hídricas del suelo	23
6.5.3 Sobre la mineralogía y micromorfología	25
6.6 Análisis estadístico	25
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
7.1 Diagnostico del crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i>	26
7.2 Diagnostico de las propiedades del suelo de la PAM del PNCA	26
7.2.1 Propiedades químicas	27
7.2.2 Propiedades hídricas	30
7.3 Requerimiento de alcalinizante y tipo de hidróxido	33
7.4 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos	35
7.4.1 Efecto de la adición de hidróxidos en las propiedades hídricas	35
7.4.2 Efecto de la adición de hidróxidos en el crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i>	39
7.4.3 Efecto de la adición de hidróxidos en la mineralogía del suelo del PNCA	41
7.4.4 Efecto de la adición de hidróxidos en la micromorfología del suelo de la PAM del PNCA	45
8. CONCLUSIONES	53
9. COMENTARIOS Y SUGERENCIAS	54
10. LITERATURA CITADA	55

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Índice de clases conductividad hidráulica saturada (K_{fs}).	8
Cuadro 2. Cantidades del mejorador químico y agua destilada.	21
Cuadro 3. Características de <i>Pinus hartwegii</i> reforestado en la pradera de alta montaña del PNCA.	26
Cuadro 4. Propiedades químicas (media \pm desviación estándar) del suelo de una pradera de alta montaña con reforestación de <i>Pinus hartwegii</i> en el PNCA.	29
Cuadro 5. Propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) del suelo de una pradera de alta montaña con reforestación de <i>Pinus hartwegii</i> en el PNCA.	29
Cuadro 6. Efecto de la variación del pH con adición de hidróxidos concentración 0.04 N en muestras de suelo del PNCA.	33
Cuadro 7. Cantidad estimada de hidróxido que se requiere para elevar el pH en las praderas de alta montaña del PNCA.	34
Cuadro 8. Efecto de la adición de hidróxidos en algunas propiedades físicas del suelo de la PAM con reforestación de <i>Pinus hartwegii</i> del PNCA.	38
Cuadro 9. Efecto de la adición de las propiedades hídricas evaluadas <i>in situ</i> en el suelo de la PAM en el PNCA.	39
Cuadro 10. Efecto de la adición de hidróxidos en el crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i> reforestado en la PAM del PNCA.	40
Cuadro 11. Principales características micromorfológicas del suelo de PAM con reforestaciones de <i>Pinus hartwegii</i> en el PNCA.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización de la pradera de alta montaña del PNCA.	17
Figura 2. <i>Pinus hartwegii</i> con (a) buen desarrollo y (b) con bajo desarrollo.	20
Figura 3. Obtención de muestra inalterada con caja tipo Kubiena.	24
Figura 4. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del suelo reforestado con <i>Pinus hartwegii</i> en el PNCA. (a) Colapsamiento de agregados y (b) vestigio carbonizado.	31
Figura 5. Efecto de la adición de hidróxidos [0.04 N] en el pH de muestras del suelo de la PAM con reforestación de <i>Pinus hartwegii</i> del PNCA.	34
Figura 6. Secciones delgadas de muestras inalteradas del andosol de la pradera de alta montaña reforestado con <i>Pinus hartwegii</i> en el PNCA, (a) sin tratamiento; (b), (c) y (d) con adición de KOH [25, 30 y 35 ppm]; (e), (f) y (g) con adición de Ca(OH) ₂ [10, 15 y 20 ppm] y (h), (i) y (j) con adición de Al (OH) ₃ [25, 30 y 35 ppm]. Pt= porosidad total.	37
Figura 7. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; a) sin tratamiento; b) con adición de KOH [35 ppm].	42
Figura 8. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; a) sin tratamiento; b) con adición de Ca (OH) ₂ [20 ppm].	43
Figura 9. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; a) sin tratamiento; b) con adición con adición de Al (OH) ₃ [35 ppm].	44
Figura 10. Microfotografías de un andosol en el PNCA. (a) Sin tratamiento (b) adición de KOH [25 ppm]. Poros cavidad (pc).	48
Figura 11. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) Adición de KOH [30 ppm] (b) adición de KOH [35 ppm].	49
Figura 12. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) Con adición de Ca (OH) ₂ [10 ppm] (b) adición de Ca (OH) ₂ [15 ppm]. Poros fisura (pf), poros cavidad (pc) y agregados (A).	50
Figura 13. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) Ca (OH) ₂ [20 ppm] y (b) adición de Al (OH) ₃ [25 ppm].	51
Figura 14. Microfotografías de un andosol en el PNCA. (a) Adición de Al (OH) ₃ [30 ppm] y (b) adición de Al (OH) ₃ [35 ppm].	52

RESUMEN

Las regiones de praderas de alta montaña son fuente importante de abastecimiento de agua; sin embargo, su deforestación ha reducido la capacidad de recarga de los acuíferos del subsuelo. En el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA), los suelos que predominan son Andosoles los cuales presentan baja densidad aparente, altos valores de materia orgánica, porosidad, conductividad hidráulica y retención de agua; no obstante, cuando estos suelos se deshidratan pierden estas propiedades irreversiblemente. En 1976, la vegetación predominante era un bosque de *Abies religiosa* pero debido a la ocurrencia de incendios superficiales, actualmente son pastizales o praderas de alta montaña los cuales tienden a acidificar el suelo. En estas praderas se han efectuado reforestaciones con *Pinus hartwegii* Lindl.; sin embargo, presentan bajo desarrollo. Los objetivos de la presente investigación fue evaluar las propiedades hídricas del suelo en la zona reforestada con *Pinus hartwegii*, y determinar el efecto de la adición de hidróxidos en el suelo para la restauración del servicio ambiental hidrológico. En estas praderas se ubicaron 50 árboles en los cuales se aplicaron los tratamientos (KOH, Ca(OH)₂ y Al(OH)₃). Se determinó la conductividad hidráulica, infiltración, potencial de flujo mátrico y contenido de humedad. Se colectaron 11 muestras de suelo inalteradas en su estructura para cuantificar la porosidad total y se tomaron muestras para determinar pH en H₂O, KCl y NaF, densidad aparente, MOS, N_{tot}, P, Ca, Mg, Na y K. Los resultados mostraron que en esta zona estuvo sometida a incendios de tipo superficial, lo cual generó colapsamiento de las partículas por lo que disminuyó la porosidad y explica la baja K_{fs} , la disminución de la infiltración de la capa superficial a los 5 cm de profundidad, así como un bajo potencial de flujo mátrico y contenido de humedad, alta densidad aparente; además, el pH en H₂O es fuertemente ácido (pH de 4.52 a 5.88) estos factores se relacionaron con el bajo desarrollo de *Pinus hartwegii*. El tratamiento con KOH [51 ppm] eleva el pH (6.88), disminuye la hidrofobicidad; en tanto el tratamiento con Ca(OH)₂ [10 y 20 ppm] aumenta la porosidad total, potencial de flujo mátrico y contenido de humedad, además hay una disminución de la densidad aparente, esto ocasionó incrementos en la longitud de hojas y biomasa, lo cual en el mediano plazo favorecerá el desarrollo del bosque y la restauración el servicio ambiental hidrológico.

Palabras clave: *Propiedades hídricas, hidróxidos, pastizales, hidrofobicidad, coníferas.*

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones de montaña, con glaciares y praderas alpinas o páramos, son fuente importante de abastecimiento de agua a nivel mundial como en los Andes (Buytaert *et al.*, 2005) y en Asia (Immerzeel, 2008).

En la Región de Montaña del Sur de la Cuenca de México (R.M.S.C.M), en las últimas cuatro décadas ha desaparecido casi 30% de los bosques naturales. Esta región aporta hasta 75% de agua que se consume en la megalópolis; sin embargo, se ha reducido la capacidad de recarga de los acuíferos del subsuelo (Velázquez y Romero, 1999), lo que genera problemas económicos, sociales y ambientales para habitantes del valle de México.

En el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA), el tipo de suelo que predomina son suelos volcánicos o andosoles, que presentan altos valores de porosidad, retención de humedad, contenido de materia orgánica, carga variable y se ubican dentro de los suelos más productivos del mundo. En este Parque, de acuerdo con mapas de INEGI (1976), el bosque de *Abies religiosa* era dominante; no obstante, actualmente predominan pastizales o praderas de alta montaña. En estas praderas se han efectuado reforestaciones con *Pinus hartwegii* Lindl. los cuales presentan problemas en su crecimiento, lo que sugiere problemas en las propiedades químicas e hídricas del suelo. Se ha señalado que los zacatonales generan problemas de acidez del suelo, así como generan sustancias hidrófobas (Van der Kamp *et al.*, 2009). Además, los Andosoles cuando se deshidratan, por exposición al sol o incendios, pierden sus propiedades hídricas. Una alternativa para disminuir la acidez, la hidrofobicidad y recuperar las propiedades hídricas es el uso de hidróxidos (Rangel *et al.*, 1996); sin embargo, surgen las siguientes interrogantes:

¿Cómo son las propiedades hídricas (conductividad hidráulica, infiltración, densidad aparente, potencial de flujo mátrico) en el suelo del Ajusco?

¿Qué tipo de hidróxido (KOH, Ca(OH)₂ o Al(OH)₃) disminuye la acidez total, la hidrofobicidad y mejora las propiedades hídricas del suelo?

¿Cuál es el efecto de la adición de hidróxidos sobre el crecimiento en *Pinus hartwegii*?

La respuesta a estas interrogantes contribuirá a proponer estrategias de recuperación de las propiedades hídricas del suelo, el mejoramiento en el crecimiento del arbolado y en general de la recuperación del servicio ambiental hídrico, la recarga de acuíferos, en esta zona.

2. MARCO TEÓRICO

Concepto de Ecohidrología. Es la relación que se establece por el flujo del agua con la parte vegetal, animal, el suelo y el aire en cuencas hidrológicas. Por ejemplo, el agua de las lluvias ocasiona hidratación de plantas y animales, del suelo; alimenta a los mantos acuíferos y otra parte escurre formando ríos, que influye en las partes bajas de las cuencas en forma de manantiales, lagos entre otros. La cuantificación de este proceso requiere mediciones en espacio y tiempo y la interpretación de este proceso requiere de la aplicación de conceptos de Ecología e Hidrología.

Hatton *et al.* (1997) consideran que la ecohidrología es el puente de la Ecología e Hidrología, ya que establecen una relación dinámica y estadística entre los componentes hidrológicos y biológicos del ecosistema.

2.1 Servicio ambiental hidrológico (SAH)

Los servicios ambientales son definidos por Torres y Guevara (2002) como el conjunto de beneficios que reciben y utilizan los seres humanos de los ecosistemas.

Gómez-Tagle (2008) denomina al SAH como aquellos servicios que están relacionados con los procesos regulatorios (como el flujo hídrico, la captación del agua, la infiltración y el almacenamiento) del ciclo hidrológico.

Perevochtchikova y Vázquez (2010) mencionan que los bosques desempeñan un papel de alta importancia para la conservación de ciclos fundamentales para la vida, como el biológico e hidrológico.

La captura de agua impide el rápido escurrimiento del agua de lluvia precipitada, se infiltra y así se alimentan los mantos acuíferos (Torres y Guevara, 2002). El SAH tiene efectos no sólo en la disponibilidad de agua sino además prolonga la vida útil de las obras de infraestructura, conserva suelos y ayuda a mitigar los riesgos de desastres por inundaciones y derrumbes.

Muñoz-Piña *et al.* (2008) explican que en México el pago por el SAH surge como un sistema de subsidio para disminuir la tasa de deforestación y darle valor económico como incentivo por conservar los bosques que contribuyen a la preservación del ciclo hidrológico ya que se sitúan en las partes altas de las cuencas.

2.2 Praderas de alta montaña (PAM)

Desarrollo histórico. De acuerdo con Challenger (1998) durante el último máximo glacial (Wisconsin) del Pleistoceno, hace unos 10 000 años, las praderas de alta montaña y zacatonales, experimentaron una expansión de sus límites ya que las temperaturas más frías hicieron que el límite altitudinal de la vegetación arbórea descendiera 1 000 m en las laderas de las montañas. En aquel entonces debió existir un extenso corredor de esta vegetación en la Sierra Madre Oriental con un corredor discontinuo en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y una franja aislada y más pequeña en la Sierra Madre del Sur, con dos subregiones muy cercanas entre sí, en las estribaciones noroccidentales de la Sierra Madre Oriental, desde el sudoeste de Tamaulipas hasta Nuevo León. Además, la presencia de un relicto de este tipo de vegetación en la cima del volcán Tacaná, Chiapas, se podría suponer su más extensa distribución en esta localidad en el pasado geológico. Al moderarse el clima después del Pleistoceno, la mayor parte de esa vegetación fue desplazada por el bosque de pino y encino, salvo en las aisladas cumbres de las montañas. Debido a ello la vegetación de pradera de alta montaña, también conocida como alpina y subalpina de México, está rodeada por extensas áreas de bosque de pino y encino, y su distribución quedó restringida a 19 cimas entre ellas: el volcán Ajusco en los límites occidentales del Distrito Federal.

Características. Por lo anterior, esta vegetación se ubica por arriba del límite altitudinal de la vegetación arbórea de las cumbres más altas (más de 4000 msnm en el centro y sur de México, y más de 3450 msnm en el noreste del país). Por lo menos 75% de las especies de plantas de este tipo de vegetación son endémicas de México, lo que hace de estas comunidades vegetales las más diversas de la nación en cuanto a número de especies endémicas por unidad de superficie. Entre estas especies cabe mencionar los zacates amacollados (*Muhlenbergia spp.* Género que tiene 52 especies endémicas), ciertas briofitas y varias herbáceas (por ejemplo *Arenia spp.*, *Echeveria secunda*, *Eryngyum proteiflorum*, *Potentilla candicans*, *Lupinus aschenbornii*, *Penstemon gentianoides* y *Senecio Gerberifolius*) (Challenger, 1998).

Ecología y abundancia de pastizales de alta montaña. El estudio de la relación vegetación-suelo-agua disponible en las praderas de alta montaña es importante para poder explicar su distribución y abundancia de pinares, oyametales y zacatonales en las altas montañas, ya que existen controversias al respecto.

Se ha señalado que estas comunidades bióticas alpinas y subalpinas son ecosistemas frágiles y no toleran la perturbación reiterada, lo que se debe tanto a que la media anual de temperatura es baja (entre 3 y 5° C, con heladas o nevadas casi todo el año) como a la escasa precipitación pluvial (600 a 800 mm anuales). Estas son características de los ambientes de alta montaña, los cuales se traducen en una temporada de crecimiento muy corta, de modo que la producción de biomasa y la regeneración natural después de las perturbaciones son procesos muy lentos (Challenger, 1998).

Además, para Challenger (1998) y Almeida-Leñero *et al.* (2007) el fuego es un factor que amenaza a este ecosistema, Rodríguez-Trejo *et al.* (2004) quien observó en el Ajusco durante 1998, que los pastos resultaron muertos luego del paso de un incendio intenso, y no se registró recolonización en tales sitios, hasta después de varios años. En contraparte, para Rzedowski (1978) los fuegos reiterados favorecieron la expansión del zacatonal. Asimismo, Sarukán y Franco (1981) reconocen el fuego como un importante factor para la repoblación de *Pinus hartwegii*. Al respecto, cabe señalar que en la zona alta del Parque Nacional Cumbres del Ajusco, según INEGI (1976) era un Bosque de oyamel; sin embargo, los incendios ocurridos en 1980 provocaron el cambio de vegetación por lo que actualmente presenta zacatonales o praderas de alta montaña. En cuanto a la relación oyamel-zacatonal, Ángeles-Cervantes (2010) reporta que la mortalidad de *Abies religiosa* ocurre después de un incendio superficial, en tanto con incendio de copa moderado y severo ocurre una regeneración. Por lo anterior, se puede suponer que el incendio de 1980 en el Ajusco fue de tipo superficial.

Por otra parte, en la relación pino-zacatonal Rzedowski (1978) considera que los zacatonales son comunidades relictuales secundarias, cuyo clímax corresponde probablemente al pinar y que en el pasado ocupaban extensiones mayores. Sin embargo, Rodríguez-Trejo *et al.* (2004) señalan que *P. hartwegii* presenta seis adaptaciones al fuego: regeneración en sitios quemados, capacidad de rebrote, recuperación de copa afectada por

llamas, poda natural, corteza gruesa y crecimiento cespitoso; por lo que el fuego no es el factor que elimina los pinares. Por lo anterior y considerando que se ha observado un bajo desarrollo de los árboles en las áreas reforestadas (Figura 2b), se puede suponer que existen otros factores que afectan el desarrollo, por lo que se propone que existen problemas en el suelo.

2.3 Importancia hidrológica de las praderas de alta montaña

La hidrología superficial de las praderas de alta montaña, también conocidas como páramos por Van der Hammen (2008) tienen características extraordinarias debido a las circunstancias climáticas especiales, a los suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, y a su topografía, formada por la acción de los glaciares, la capacidad de la vegetación para almacenar y absorber agua del aire/niebla.

Por otra parte, Ponce de León (2008) señala que la cubierta vegetal de las montañas ayuda a estabilizar los manantiales, impidiendo las inundaciones y manteniendo por todo el año las corrientes permanentes, facilitando el filtraje del agua de lluvias hacia acuíferos subterráneos. La diversidad biológica de las montañas contribuye al bienestar humano mucho más allá de las cercanías inmediatas y es esencial para la gestión de la circulación del agua por todas las cuencas fluviales.

En general, las praderas de alta montaña o páramos se desarrollan en suelos derivados de cenizas volcánicas o andosoles: en Ecuador (Poulenard *et al.*, 2001), en los Andes del Norte (Buytaert *et al.*, 2005; De Bièvre, 2008), Colombia (Rangel-Ch, 2008) y en México (García *et al.*, 2007).

2.4 Andosoles

Como grupo, los Andosoles tienden a ser suelos altamente productivos, son comunes en áreas húmedas con moderada o alta precipitación, especialmente estas áreas se asocian con materiales volcánicos y a partir de procesos de intemperismo generan minerales con estructura cristalina de bajo orden (Soil Taxonomy, 2010).

Son suelos minerales que tienen un horizonte vítrico o un horizonte ándico (Prado *et al.*, 2007). Las propiedades ándicas resultan del intemperismo moderado de depósitos de

materiales principalmente piroclásticos y pueden encontrarse tanto en la superficie como subsuperficialmente. García *et al.* (2007) reconocen dos tipos de propiedades ándicas: una en la cual el alófono y minerales similares son predominantes (el tipo sil-ándico), y otra en la cual prevalece el aluminio complejado por ácidos orgánicos (el tipo alu-ándico). Las propiedades sil-ándicas tienen una reacción de ácida a neutra; mientras que la propiedad alu-ándica varía de extremadamente ácida a ácida (WRB, 2006).

Como horizonte superficial, los horizontes ándicos generalmente tienen elevadas cantidades de materia orgánica (más de 5%), son de color muy oscuro o pardo, tienen macroestructura esponjosa y con frecuencia, consistencia untuosa.

2.5 Propiedades hídricas de Andosoles. Se considera que la densidad aparente, la conductividad hidráulica, el potencial del flujo mátrico, la tasa de infiltración y la porosidad total son las propiedades más importantes en el flujo y servicio ambiental hidrológico, con énfasis en la recarga de acuíferos, que presentan los suelos (Alauzis *et al.*, 2004).

Densidad aparente. De acuerdo con la USDA (2008), la densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo. Es calculado con el peso seco del suelo dividido por el volumen que incluye el volumen de las partículas del suelo y el volumen de los poros entre las partículas del suelo. Los valores mayores indican que hay compactación del suelo lo que dificulta la emergencia, enraizamiento y la circulación del agua y el aire (Porta *et al.*, 1999). A nivel internacional se ha reportado en un intervalo de 0.55 a 0.90 g cm⁻³ en países como Portugal (Fontes *et al.*, 2004), Islandia (Gudmundsson *et al.*, 2004), Camerún (Leumbe *et al.*, 2005) y Alemania (Kebler *et al.*, 2004). En México es ≤ 0.90 g cm⁻³ (García *et al.*, 2007) que coincide con lo reportado por Acevedo *et al.* (2008) de 0.80 g cm⁻³ en Hidalgo.

La densidad aparente en andosoles erosionados se incrementa. Al respecto, Velásquez-Valle *et al.* (2006) indican 0.95 g cm⁻³ en labranza convencional y en sitio de conservación 0.89 g cm⁻³ en Michoacán y Prado *et al.* (2007) determinaron 0.6 g cm⁻³ para un bosque y 0.7 g cm⁻³ para un cultivo de maíz en Valle de Bravo, Estado de México.

La *conductividad hidráulica* (K_f) es definida por Gabriels *et al.* (2006) y Touma *et al.* (2007), como la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductibilidad está en su máxima expresión (representada como K_{fs}) también depende del tamaño, número, orientación, distribución y continuidad de los poros especialmente los de retención así como el tamaño de las partículas, tipo de fluido, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo.

Schoeneberger *et al.* (2002) establecieron el índice de clases de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) con base al escurrimiento en la superficie (Cuadro 1).

Cuadro 1. Índice de clases de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}).

Clase	Muy alta	Alta	Alta Moderada	Moderada baja	Baja	Muy baja
		-----	mm h ⁻¹		-----	
K_{fs}	≥ 360	36 a < 360	3.6 a < 36	0.36 a < 3.6	0.036 a < 0.36	< 0.036

La K_{fs} ha sido evaluada en varios sitios. Se reportó 168 mm h⁻¹ en las Islas Canarias (Arbelo *et al.*, 2002) de 10 a 50 mm h⁻¹ en páramos derivados de cenizas volcánicas en Ecuador (Poulenard *et al.*, 2001; Buytaert *et al.*, 2005), de 300 a 500 mm h⁻¹ en Brasil (Sobieraj, 2003) y de 2 a 13 mm h⁻¹ en andosoles desnudos de México (Veihe *et al.*, 2001).

Por otro lado, cuando se lleva a cabo un cambio de uso de suelo, la conductividad hidráulica se ve afectada. En una rotación de cultivo se registró 42 mm h⁻¹, mientras que, en una pradera fue de 61 mm h⁻¹ en Azores, Portugal (Fontes *et al.*, 2004). De acuerdo con Velásquez-Valle *et al.* (2006), la K_{fs} disminuye de 14 mm h⁻¹ a 1 mm h⁻¹ en Michoacán. Otro factor que influye en la K_{fs} es el pH, dependiendo del tipo de ácido que se agregue. Al adicionar HNO₃ se reportó un aumento de 61 a 270 mm h⁻¹ y con adición de H₂SO₄ hubo una disminución de 40 a 25 mm h⁻¹ en pH de 3 a 4, en Tokio (Ishiguro y Nakajima, 2000).

El potencial de flujo mátrico (Φ_m). Es definido por Reynolds y Elrick (1990) como la medida de la capacidad del suelo de atraer agua, por fuerza capilar, atravesando una sección de área en una unidad de tiempo ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$). Existen pocos estudios, en donde destaca el de Sandoval *et al.* (2007) que registraron valores de $3.06 \text{ cm}^2 \text{h}^{-1}$ a $7.37 \text{ cm}^2 \text{h}^{-1}$ en seis tratamientos de rotaciones culturales en un andosol en Chile.

La infiltración es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie y tiempo (mm h^{-1}). Harden y Delmas (2003) reportan un rango de 16 a 117 mm h^{-1} en un bosque mixto en las montañas Apalaches, U.S.A.

La tasa de infiltración disminuye si ocurre un incendio superficial. Al respecto, Ángeles-Cervantes (2010), obtiene 173.55 y 59.82 mm h^{-1} en un bosque de oyamel no afectado y otro afectado por incendio de tipo superficial en Hidalgo.

La porosidad total frecuentemente se evalúa a partir de los datos de densidad real y aparente. Leumbe *et al.* (2005) quienes se basan en este parámetro indican 72% en el horizonte de 0-60 cm en el Occidente de Camerún, Veihe *et al.* (2001) 65.89% en andosoles desnudos de México.

De acuerdo con estudios realizados por Dexter y Richard (2009), la distribución y tamaño de los poros del suelo tienen una gran influencia en la retención de agua y conductividad hidráulica saturada. Por lo que, Pagliai y De Nobili (1993) indican que los cambios en la microestructura del suelo deben ser cuantificados a través de la caracterización de la porosidad por el método de análisis de secciones delgadas obtenidas con muestras no alteradas, porque proporciona información útil sobre la complejidad de los poros que no se obtiene mediante otros métodos.

Entre las investigaciones reportadas de porosidad total mediante análisis micromorfológico con secciones delgadas destaca el realizado por Ángeles-Cervantes (2010), quien determina 40.60 y 35.08% en un andosol esquelético de un bosque de oyamel no afectado y otro afectado por incendio superficial en Hidalgo.

La *hidrofobicidad o repelencia al agua* en el suelo es un fenómeno que ocurre en los andosoles ampliamente descrito por diversos autores. Los factores que la determinan se dividen en: factores biológicos y factores no biológicos. Entre los primeros, de acuerdo con Contreras y Solé-Benet (2003) destacan la influencia directa de la vegetación, la biota fúngica y microbiana; así como el contenido en materia orgánica y humus. En cuanto a los no biológicos, Ice *et al.* (2004) mencionan que el efecto del fuego da lugar a capas de cargas negativas lo que reduce la infiltración e incrementa la escorrentía.

Zavala *et al.* (2009) registraron por el método de WDPT (Water Drop Penetration Time), una hidrofobicidad extrema en muestras de suelo colectadas bajo pinos y eucaliptos e hidrofobicidad baja en suelo con árboles de olivo después de un incendio. Asimismo, obtienen que la hidrofobicidad está altamente correlacionada con la acidez y el contenido de materia orgánica en el suelo de pinos y eucaliptos ($r= 0.84$ y $r= 0.76$); mientras que, en árboles de olivo mostraron una correlación más baja (r =no significativa).

2.6 Propiedades químicas de los andosoles

El potencial de hidrógeno (pH) se mide en una solución de suelo y agua, con lo que se mide la acidez activa. Cabe señalar que en los suelos también existe una reserva de acidez intercambiable (o potencial) que se evalúa con una solución de KCl pues el K desplaza los H^+ de los sitios de intercambio hacia la solución del suelo; además aumenta la hidrólisis de Al^{3+} y Fe^{2+} incrementando la concentración de H^+ , lo cual promueve una mayor acidez (SEMARNAT, 2002). El pH medido en una solución de NaF, es un método rápido para la estimación cualitativa del alófono, por el reemplazo de grupos OH^- por iones F^- y el consecuente incremento del pH (López *et al.*, 1988).

El pH activo evaluado se encuentra entre los rangos de 3.6 a 4.6 en países como: Indonesia y Taiwan (Van Ranst *et al.*, 2008; Shing y Yu, 2003); de 4.6 a 5.6 en Suecia, Japón y Francia (Thoss *et al.*, 2004; Cheol e Ishiguro, 1992; Gandois *et al.*, 2010), finalmente de 5.6 a 6.8 en Islandia (Gudmundsson *et al.*, 2004).

A nivel nacional se han reportado valores de 4.64 a 5.97 en Veracruz (Cruz y Geissert, 2000), en Hidalgo (Acevedo *et al.*, 2008; Ángeles-Cervantes, 2010). El pH del

suelo puede influir en la absorción nutritiva y crecimiento de las plantas de dos maneras: 1) a través del efecto directo del ion H^+ ; 2) indirectamente, por su influencia sobre la asimilación de los nutrientes y la presencia de iones tóxicos (Buckman y Brady, 1991).

Para *pH potencial*, el intervalo se encuentra de 4.4 a 5.4 con KCl en Indonesia (Van Ranst *et al.*, 2008), Veracruz (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006) y Estado de México (Prado *et al.*, 2007); en los mismos sitios el pH con NaF es de 10.2 a 11.9.

Materia orgánica del suelo (M.O.S.). Dependiendo del tipo de vegetación y condiciones climáticas, la materia orgánica en Andosoles puede variar, desde 2.01% a 4.31% en Michoacán (Velásquez-Valle *et al.*, 2006), 4.76% en el Ajusco (Perea-Estrada *et al.*, 2005), 13.3% en Veracruz (Aguilar-Acuña *et al.*, 2003), 13.86% en Hidalgo (Acevedo *et al.*, 2008) y de 24.27% a 40.24% en el Parque Nacional El Chico en Hidalgo (Ángeles-Cervantes, 2010). A nivel internacional se reportan valores de 5.4% en Camerún (Leumbe *et al.*, 2005). Cuando los contenidos de materia orgánica son altos hay formación de complejos húmicos con alófano o complejos órgano-metálicos de Fe y Al (Ángeles-Cervantes, 2010).

Nitrógeno total. El contenido de N, de acuerdo con Arbelo *et al.* (2002) es de 2.14 a 1.08% en las Islas Canarias; Shing y Yu (2003) reportan 0.018% en suelos alpinos en Taiwan y Farrell *et al.* (2010) de $1.20 \pm 0.21\%$ en praderas de Europa. Perea-Estrada *et al.* (2005) obtienen 0.24% en el Ajusco, en tanto que Meza-Pérez y Geissert-Kientz (2006) encontraron valores de 0.36 a 0.20% del Cofre de Perote en Veracruz y Ángeles-Cervantes (2010) de 0.31 a 0.88% en el Parque Nacional El Chico en Hidalgo.

Cationes. Para K^+ se reporta $0.67 \text{ cmolc kg}^{-1}$ en el Ajusco (Perea-Estrada *et al.*, 2005), de 0.11 a $0.85 \text{ cmolc kg}^{-1}$ en Cofre de Perote en Veracruz (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006), de 0.01 a $2.62 \text{ cmol kg}^{-1}$ en Hidalgo (Acevedo *et al.*, 2008; Ángeles-Cervantes, 2010). Para el catión Ca^{2+} se indica $4.0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ en el Ajusco

(Perea-Estrada *et al.*, 2005), de 6.10 a 2.1 cmol kg^{-1} en Cofre de Perote en Veracruz (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Campos-Cascaredo *et al.*, 2001) y de 10.15 a 20.42 cmol kg^{-1} en Hidalgo (Acevedo *et al.*, 2008; Ángeles-Cervantes, 2010). La determinación del catión Mg^{2+} es de 1.6 cmolc kg^{-1} en el Ajusco (Perea-Estrada *et al.*, 2005), de 1.47 cmolc kg^{-1} del Cofre de Perote en Veracruz (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006) y de 1.24 a 3.24 cmol kg^{-1} en Hidalgo (Acevedo *et al.*, 2008; Ángeles-Cervantes, 2010). En cuanto a Na^{2+} se señala 37.8 cmol kg^{-1} en Suecia (Engström *et al.*, 2008) y 2.96 cmol kg^{-1} en Hidalgo, México (Acevedo *et al.*, 2008).

Fósforo. Cremona y López (2004) obtienen 989 mg kg^{-1} de P total y 7 mg kg^{-1} de P Olsen a una profundidad de 0-10 cm en el Valle de Bolson de la Cordillera de los Andes. Campos-Cascaredo *et al.* (2001) registran 5 mg kg^{-1} en el Cofre de Perote en Veracruz. Perea-Estrada *et al.* (2005) un valor de 2.22 mg kg^{-1} en el Ajusco.

Carbono. El porcentaje de carbono evaluado por Gudmundsson *et al.* (2004) es de 11.2 y 4.0% en una profundidad de 0-5 y de 5-10 cm en Islandia; Acevedo *et al.* (2008) de 5% a una profundidad de 0-10 cm en Hidalgo.

2.7 Hidrología y Minerales en Andosoles

En andosoles están presentes aluminosilicatos pobremente cristalinos como alófano e imogolita que reaccionan y retienen fuertemente el agua, metales, cationes, aniones, varias moléculas orgánicas y otras partículas minerales que favorecen la estructura del suelo y la productividad de los cultivos. Estos aluminosilicatos tienen un volumen alto y proporcionan una estructura porosa estable, fijan fósforo no asimilable para las plantas, conserva una carga eléctrica permanente baja y una carga eléctrica alta subordinada al pH; es decir, son de carga eléctrica variable pero cuando se deshidratan disminuyen de manera notable todas las variables anteriores. La conductividad hidráulica saturada es alta por los valores bajos de densidad aparente y una estructura granular en los horizontes superficiales (Harsh *et al.*, 2002).

Van Ranst *et al.* (2002) y Van Ranst *et al.* (2008), investigaron la mineralogía de un andosol esmectítico en Indonesia y encontraron que el contenido de alófono es de 3-4% en los horizontes A, el cual aumentó a 18.12% en los horizontes más profundos del subsuelo.

Además, presentan hidróxidos metálicos como Hidróxidos de Hierro y Aluminio entre ellos la gibsita, hematita y biotita que absorben fuertemente los nutrientes esenciales para las plantas como fosfatos, contaminantes inorgánicos potenciales como arsenato así como moléculas orgánicas sintéticas y naturales; haciendo importantes los hidróxidos de aluminio en el conocimiento del ciclaje de estos nutrimentos y contaminantes del ambiente (Huang *et al.*, 2002).

2.8 Efectos de la adición de hidróxidos

Existen andosoles ácidos los cuales son poco productivos y una alternativa para devolver su productividad es la adición de hidróxidos. Al respecto, Rangel *et al.* (1996) evaluaron el efecto de la adición de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), en Andisoles y reportan cambios en el pH de 6.15 a 6.25 lo que ocasionó mayores rendimientos de materia seca de maíz (de 45.93 a 51.54 g) en contraste con la adición de CaCO_3 .

Breuer y Schwertmann (1999) adicionaron 50, 150 y 400 mL de soluciones que contenían aproximadamente 10 mg mL^{-1} y 6.5 mg de hidróxidos de Ferrihidrita y aluminio, respectivamente, en 200 g de un cambisol, planosol y luvisol compactados del Norte de Camerún, concluyendo que la compactación de la estructura es causada por la falta de agentes cementantes como hidróxidos como Ferrihidrita y aluminio metálicos.

Farrel *et al.* (2010) evaluaron la adición de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ con lo cual aumenta el pH de 4.67 a 8.55 pero no tiene efectos significativos en la biomasa de las especies de un pastizal ácido en Reino Unido.

3. PROBLEMÁTICA

México es un país con un importante acervo de recursos forestales; sin embargo, a pesar de su extensión y diversidad, gran parte de este acervo tiene un bajo rendimiento maderable (Torres, 2004). Asimismo, presenta un importante potencial para utilizar sus bosques como productores de servicios ambientales donde la captura de carbono, biodiversidad y desempeño hidráulico tienen el mayor potencial.

En la parte noroeste del Parque Nacional Cumbres del Ajusco presenta andosoles bajo un bosque de oyamel (INEGI, 1976). En 1980, presentó incendios superficiales, y actualmente presenta zacatonales o praderas de alta montaña, las cuales se han intentado reforestar con *Pinus hartwegii* Lindl. ya que es una especie importante por ser uno de los componentes principales de los bosques de montañas más altas de México y de América Central. Además, *P. hartwegii* presenta seis adaptaciones al fuego: regeneración en sitios quemados, capacidad de rebrote, recuperación de copa afectada por llamas, poda natural, corteza gruesa y crecimiento cespitoso (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2004; Viveros-Viveros *et al.*, 2010).

En esta zona se ha reforestado con *Pinus hartwegii*, los cuales presentan un bajo desarrollo. Si bien el bajo desarrollo se ha atribuido a:

- a) Factores genéticos. De acuerdo con Iglesias *et al.* (2000) el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. es poco denso y monoespecífico en su estrato arbóreo, cuyas semillas han perdido notablemente su viabilidad de modo que se ha detectado un porcentaje muy bajo (menor a 10%) de germinación debido a la acumulación de alelos recesivos letales o genes deletéreos recesivos —que causan la muerte selectiva de los embriones, la reducción del vigor y las tasas reproductivas—, inducida por una alta tasa de cruzamientos consanguíneos. Esto se encuentra entre los 3500-4000 msnm en el Parque Nacional Cofre de Perote.
- b) Cambio climático. El aumento de la temperatura en los 100 años recientes ha causado una reducción de 10.6% en el crecimiento relativo de la especie (Ricker *et al.*, 2007). Sin embargo, otros autores como Girardin y Mudelsee (2008) encuentran que el incremento de la temperatura favorece el crecimiento de bosques de Canadá.

- c) En el Volcán Ajusco, se observó que los pastos resultaron muertos luego del paso de un incendio intenso en 1998, tardando tiempo en recolonizarse tales sitios (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2004).

Lo anterior permite suponer que existen otros factores que no se han abordado, por lo que se propone la hipótesis de que en esta zona ocurrió un incendio superficial que compactó el suelo, ocasionó deshidratación de minerales y se afectaron las propiedades hídricas del suelo.

Por lo que, en este trabajo se analizaron el suelo, sus propiedades hídricas y químicas para explicar el bajo desarrollo ya que las reforestaciones se han realizado con plantas con buen vigor genético y fertilizadas, por lo que el factor genético no es responsable del bajo crecimiento.

Asimismo, el cambio climático no es el causante del bajo desarrollo pues en zonas cercanas a las áreas de reforestación, se observan individuos con buen desarrollo.

En cambio, los andosoles cuando se deshidratan debido a los incendios, pierden sus propiedades hídricas, disminuyendo la disponibilidad de agua y ocasiona menor crecimiento. Además, se ha señalado que los pastizales generan mayor acidez del suelo y sustancias hidrófobas en el suelo, lo que ocasiona una disminución de la humedad disponible para la vegetación. Una alternativa para incrementar el pH, disminuir la hidrofobicidad e incrementar la disponibilidad de agua es la adición de hidróxidos.

Por lo anterior se plantearon los siguientes objetivos:

4. OBJETIVO GENERAL

Determinar el beneficio del uso de hidróxidos en la restauración del servicio ambiental hidrológico en el suelo de una pradera de alta montaña reforestada con *Pinus hartwegii*.

4.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- 1) Evaluar las propiedades hídricas y propiedades químicas del suelo en la zona reforestada con *Pinus hartwegii* que presenta bajo crecimiento.
- 2) Determinar el efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídricas del suelo y su relación con el crecimiento de *Pinus hartwegii*.
- 3) Relacionar las propiedades hídricas y la ocurrencia de incendios superficiales.

5. ZONA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Cumbres del Ajusco se encuentra ubicado en el Distrito Federal, en la Delegación de Tlalpan. Tiene una superficie de 920 hectáreas. El régimen de la tenencia de la tierra que rige en este parque nacional es comunal. La fecha del decreto de creación publicada en el Diario Oficial de la Federación fue el 23 de septiembre de 1936 (Modificación del 19 de mayo de 1947).

El sitio pertenece al Parque Nacional Cumbres del Ajusco que se encuentra en el Volcán Ajusco en una pradera de alta montaña y *Pinus hartwegii*, en 19° 22' 03" Latitud Norte y 99° 27' 54" Longitud Oeste a una altitud de 3 416 m (Fig. 1).



Figura 1. Localización de la pradera de alta montaña del PNCA.

Geología. El Volcán Ajusco se originó durante el Plio –Pleistoceno y Pleistoceno Superior, su litología superficial está constituida por andesitas y los basaltos que son más comunes en

la parte sur. Las dacitas y las riolitas son rocas menos frecuentes, localizadas en zonas pequeñas (Calderón de Rzedowski y Rzedowski, 2001).

Hidrología. Alrededor del Volcán Ajusco existen cuatro ríos cuyo caudal crece de manera importante durante la temporada de lluvias: el río San Buenaventura, el Eslava también conocido como Viborillas, el río Santiago y el río Seco (GODF, 2010).

Clima. Esta zona presenta clima templado semifrío, caracterizada por presentar una temperatura media anual entre 5° y 12° C. La marcha anual es de tipo Ganges, los meses más calientes son antes del solsticio de verano. La época húmeda es de junio a octubre y la seca de abril a mayo. Las lluvias son principalmente del tipo orográfico y las de tipo frontal tiene sus orígenes en las masas de aire polar que se desplazan desde el sur de Canadá y U.S.A. provocando poca precipitación y algunas heladas en la sierra. La mayor cantidad de precipitación (mayores de 1 200 mm) se reciben sobre las Sierras de las Cruces y del Ajusco y sobre la Sierra Nevada (Ezcurra, 1995).

Vegetación. En el PNCA existe la pradera de *Potentilla candicans* en el Valle de México en altitudes entre 2 900 y 3 500 m ocupa claros en medio del bosque de *Abies* y *Pinus*, por lo general, en sitios donde el drenaje del suelo es lento. Esta comunidad presenta dos aspectos estacionales diferentes: en la temporada seca predominan fisonómicamente las plantas rastreras de *Potentilla candicans*; en la época lluviosa en cambio prevalece el conjunto de gramíneas y ciperáceas, a mencionar: *Muhlenbergia repens*, *Vulpia myuros*, *Trisetum kochianum*, *Cyperus seslerioides* y *Carex peucophila* (Rivera y Espinosa, 2007).

A diferencia de los demás tipos de pastizales en los que la cobertura de gramíneas rara vez excede de 30 cm de alto, los zacatonales subalpinos y alpinos son comunidades en que predominan plantas amacolladas y altas (60 y 120 cm). Se localizan en altitudes entre 3000 y 4300 m por debajo de la cota de 4000 m, frecuentemente se trata de asociaciones secundarias surgidas después de la destrucción del bosque de *Pinus*; en cambio más allá del límite de la vegetación arbórea constituyen vegetación clímax. El fuego es un factor importante en la existencia, dinámica y aprovechamiento de los zacatonales. Las

dominantes de las diferentes asociaciones del zacatonal son: *Calamagostis toluensis*, *Festuca hephaestophila*, *F. livida*, *F. toluensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Stipa ichu* (Rivera y Espinosa, 2007).

5.1 Características de *Pinus hartwegii* Lindl.

Martínez (1974) lo describe como un árbol de 15 a 30 m, de corteza agrietada. En el Ajusco se observan de 4 hojas que miden de 10 a 16.5 cm de largo; son de color verde claro, medianamente gruesas; los bordes son aserrados; presentan estomas en las tres caras; tienen dos haces vasculares; los canales resiníferos son medios; las vainas son de 10 a 17 cm. Yemas largamente ovoides, agudas, de color moreno rojizo. Conillos casi oblongos. Conos largamente ovoides por lo común de 9 a 10 cm de largo, varía entre 7 y 14, pocas veces con pedúnculo de unos 10 mm. Escamas numerosas muy delgadas y frágiles, miden de 24 a 28 mm. Semilla negruzca, de 5 a 7 mm con ala de 12 de largo por 5 de ancho. Tivo e Iglesias (2003) comprueban la presencia de 24 cromosomas para este género.

Calderón de Rzedowski y Rzedowski (2001) mencionan que esta especie se ha colectado en municipios de Tlalpan, Tlalmanalco y Amecameca; y Rodríguez-Trejo *et al.* (2004) que su distribución se localiza en estados como Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo, Distrito Federal, Morelos, Colima, Michoacán, Jalisco, Oaxaca, Chiapas, Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México, Coahuila, Nayarit y Guerrero.

6. MÉTODO

6.1 Selección de sitio de muestreo

Se ubicó una zona de alta montaña con plantación de *Pinus hartwegii* con bajo desarrollo (Figura 2b) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco.

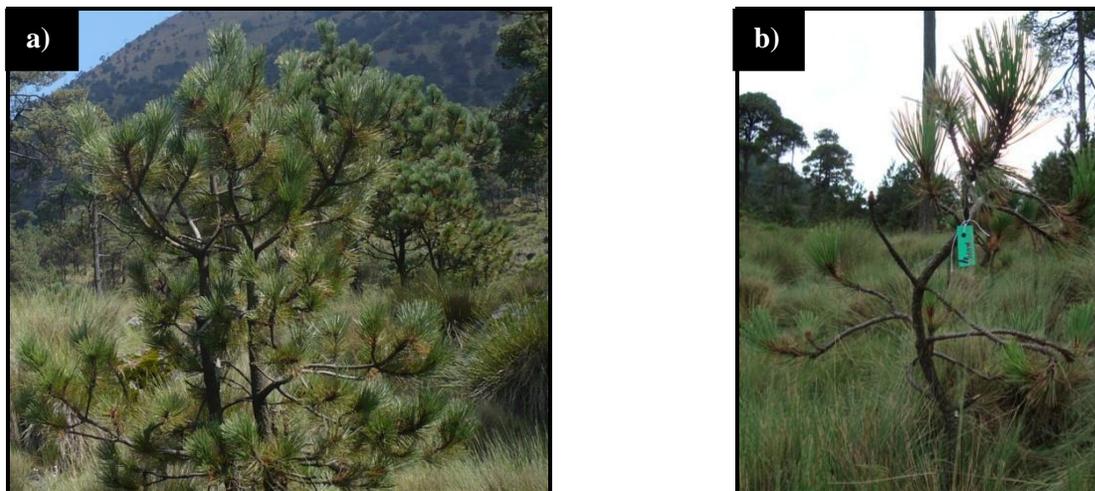


Figura 2. *Pinus hartwegii* con (a) buen desarrollo y (b) con bajo desarrollo.

6.2 Muestreo de suelo

Dentro de la plantación, se tomaron de manera aleatoria 9 muestras de suelo, entre los árboles de reforestación, para realizar el diagnóstico de suelo. Las muestras se tomaron a profundidades de 0 a 2.5 cm y de 2.5 a 5 cm. Al respecto, DeBano (1998) señala que estas profundidades se ven afectadas por incendios y generan una capa impermeable. Las muestras se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron en malla de 2.0 mm. La muestra obtenida se sometió a análisis de la determinación de la acidez total del suelo y sus propiedades químicas.

6.3 Determinación de la acidez total y cuantificación del requerimiento de alcalinizante

La determinación se realizó de acuerdo con Velasco (1983) con el siguiente procedimiento: en 7 matraces Erlenmeyer se colocaron 10 g de suelo en cada uno, se agregaron los

hidróxidos KOH, Ca(OH)₂, Al(OH)₃ en solución [0.04 N] + agua destilada como se indicó en el Cuadro 2.

Se agregó a cada frasco 4 gotas de cloroformo para prevenir el desarrollo bacteriano. Las suspensiones se dejaron reposar por un periodo de 4 días, se agitó una vez por día. Se determinó el pH usando el potenciómetro eléctrico. Se construyó la curva de equilibrio utilizando la ordenada para los valores de pH obtenidos y la abcisa para los volúmenes de KOH, Ca(OH)₂, Al(OH)₃.

Posteriormente, se calculó la cantidad de hidróxidos que se necesita para elevar la reacción del suelo una unidad a partir del pH original. Los resultados se indican en kg ha⁻¹; utilizando la densidad aparente obtenida para la zona a una profundidad de 5 cm. Se eligió el hidróxido que requirió menor concentración y mayor disminución de la acidez total.

Cuadro 2. Cantidades del mejorador químico y agua destilada.

Recipiente	Solución [0.04 N] de KOH	Agua destilada
	-----mL-----	
1	0	20.0
2	2.0	18.0
3	5.0	15.0
4	8.0	12.0
5	11.0	9.0
6	14.0	6.0
7	17.0	3.0

6.4 Análisis químico del suelo

A partir de las muestras tamizadas, se realizaron las siguientes determinaciones:

El *pH* real se midió con el potenciómetro la suspensión sobrenadante de una mezcla relación suelo: agua 1:2; el pH potencial en relación suelo: KCl 1M (SEMARNAT, 2002) y el pH con NaF 1M en una suspensión sólido-líquido con una relación 1:50 (López *et al.*, 1988).

La *materia orgánica del suelo* (M.O.S.) se determinó a través del contenido de carbono orgánico por el método de Walkley y Back (ISP, 1994).

Para determinar el *Nitrógeno total* se utilizó el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (SEMARNAT, 2002). Cationes intercambiables K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{2+} se determinaron por el método de extracción con $AcONH_4$ 1 N pH 7 su cuantificación por absorción atómica y emisión de llama en un espectrofotómetro Varian AA-1475 (ISP, 1994 y SEMARNAT, 2002).

Fósforo, se determinó por el método Bray y Kurtz 1 modificado (ISP, 1994).

6.5 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos

Se eligió adicionar hidróxidos y no carbonatos para disminuir la acidez del suelo ya que en un muestreo preliminar el pH es de 4.52-5.88, los cuales, son muy fuertemente ácidos (Schoeneberger *et al.*, 2002).

En campo se aplicaron *in situ* tres tipos de hidróxidos, en tres tratamientos y con cinco repeticiones (5 plantas) cada uno en una cepa. Las concentraciones se eligieron con base en los resultados de la acidez total.

- Hidróxido de Potasio (KOH) [25, 30 y 35 ppm].
- Hidróxido de Calcio ($Ca(OH)_2$) [10, 15 y 20 ppm].
- Hidróxido de Aluminio ($Al(OH)_3$) [25, 30 y 35 ppm].

6.5.1 Sobre el crecimiento de *Pinus hartwegii*

Selección de plantas. En la plantación con bajo desarrollo se eligieron 50 individuos de *P. hartwegii*. Se consideró bajo desarrollo cuando los pinos presentaban menor cantidad de follaje, vigor, altura, longitud y diámetro de yemas apicales y longitud foliar; en comparación con los que presentaban buen desarrollo.

Se aplicaron los tratamientos con los tres tipos de hidróxidos y tres concentraciones a 45 plantas, de acuerdo al siguiente cálculo:

(3 tipos de hidróxidos) x (3 concentraciones) x (5 repeticiones) = 45 individuos + 5 sin tratamiento = 50 plantas de *Pinus hartwegii* o 50 unidades de observación.

La solución con hidróxidos se aplicó en las cepas de los árboles elegidos aleatoriamente.

A todos los individuos, con tratamientos y sin tratamientos, después de seis meses, se les midió, con un vernier la longitud y diámetro de yemas apicales (cm) y longitud de hojas (cm). Se colectó 1 muestra foliar de cada individuo. Esta muestra se colocó en estufa a 80°C por 48 horas o a peso constante. Posteriormente se pesó para obtener la biomasa.

6.5.2 Sobre las propiedades hídricas del suelo

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro (USDA, 2008). Se tomaron muestras inalteradas con un cilindro de cobre (2.5 cm de diámetro y 5 cm de altura) y se secaron en el horno a 105 °C hasta peso constante.

La porosidad total se determinó por el método de Secciones delgadas (Van Reeuwijk, 1999): en el sitio de estudio se tomó 1 muestra inalterada de suelo, por cada tratamiento, con cajas tipo Kubiena a una profundidad de 10 cm (Figura 3). Las cajas se enterraron verticalmente y se extrajo excavando de manera cuidadosa para evitar que se alterara la muestra. Una vez obtenidas las muestras, se dejaron secar a temperatura ambiente aproximadamente cuatro semanas. Cuando el suelo se secó totalmente se les agregó resina poliéster insaturada y monómero de estireno (relación 1:12) y 1.5 mL de catalizador (Peróxido de metil-etil-cetona). Enseguida, las cajas con resina se colocaron en una cámara de vacío a una presión de 18 libras durante tres horas para que se impregnaran los espacios del suelo, se dejaron gelar a temperatura ambiente por dos semanas. Se realizaron cortes longitudinales (utilizados para evaluar la porosidad total del suelo) y se colocaron en portaobjetos (6 x 9 cm) para finalizar, se pulieron a 30 µm de espesor. Obtenidas las secciones delgadas se observaron en un Microscopio petrográfico marca Olympus BX51 con compensador, se tomaron 12 fotografías (10x) por sección delgada y se calculó el porcentaje de porosidad total con el programa Image Pro Plus .5.



Figura 3. Obtención de muestra inalterada con caja tipo Kubiena.

La conductividad hidráulica, la infiltración y potencial de flujo mátrico se determinó in situ a una profundidad de 0-2.5 cm y 2.5-5.0 cm en 3 cuadrantes de 30 x 30 cm donde se aplicaron los tratamientos de hidróxidos y 3 cuadrantes sin tratamiento, mediante el procedimiento de acuerdo con Reynolds y Elrick (1990) utilizando el Permeámetro Guelph modelo 2800K1 (Soilmoisture Equipment Corp). Para el cálculo de la K_{fs} se utilizó la siguiente fórmula:

$$K_{fs} = [(0.0041) (2.15) (R2)] - [(0.0054) (2.15) (R1)]$$

Donde K_{fs} = Conductividad Hidráulica Saturada de Campo

R1= Constante de la primera lectura

R2= Constante de la segunda lectura

La tasa de infiltración. Las constantes R1 y R2 representan la tasa de infiltración a dichas profundidades, por lo que el muestreo con el permeámetro Guelph, permite obtener dos variables.

El potencial de flujo mátrico. Se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\Phi m = [(0.0572) (2.14) (R1)] - [(0.0237) (2.15) (R2)]$$

Donde Φm = Potencial de flujo mátrico

R1= Constante de la primera lectura

R2 = Constante de la segunda lectura

La hidrofobicidad se evaluó *in situ* por el método de DeBano y Krammes (1965), para ello se colocó una gota de agua sobre la superficie del suelo y se tomó el tiempo en que la gota penetró completamente.

6.5.3 Sobre la mineralogía y micromorfología del suelo

Se tomó una muestra representativa de los primeros 5 cm de profundidad del suelo. Las muestras fueron tamizadas (<2 mm) y preparadas de acuerdo con Van Reeuwijk (1999). Se destruyó la materia orgánica con peróxido de hidrógeno y, posteriormente, se maceró en un mortero de porcelana para obtener partículas de tamaño aproximado de 50 μm . Las muestras fueron analizadas en polvo utilizando un Difractómetro de Rayos X. Las mediciones se realizaron por la técnica de barrido a una velocidad de 4°min^{-1} desde 2° a 60° en un equipo GBC 122D Automation Interface. Los minerales se determinaron utilizando el software ICDD (2002).

6.6 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de longitud y diámetro de yemas apicales, longitud de hojas (cm) y biomasa (g) se analizaron con un Análisis de Varianza (ANOVA) con Prueba de Scheffe para determinar diferencias significativas entre los tratamientos con el programa STATA 8.

Los datos de densidad aparente, pH, conductividad hidráulica, infiltración, potencial de flujo mátrico y porosidad total fueron evaluados por una prueba T-student para detectar diferencias significativas a un nivel de $P \leq 0.05$.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Diagnostico del crecimiento de *Pinus hartwegii*

Los pinos que representan las reforestaciones, presentaron las siguientes características en su crecimiento:

Yemas apicales. La longitud y diámetro de las yemas apicales de *Pinus hartwegii* fue de 1.34 (± 0.61) y 0.56 (± 0.15) cm (Cuadro 3).

La longitud foliar fue de 6.61 (± 1.92) cm (Cuadro 3) el cual es un valor 50 % más bajo que el reportado por Martínez (1974) para árboles de esta zona.

La biomasa fue de 1.39 (± 0.25) g (Cuadro 3) que es un valor bajo (Ortíz y Rodríguez, 2008) ya que se registra 2.40 g como incremento medio anual en biomasa de follaje para esta especie.

Con base en lo anterior, el crecimiento de *Pinus hartwegii* es deficiente. Las yemas apicales, la longitud foliar y la biomasa presentan un decremento de 50% con respecto a lo registrado en otras zonas.

Cuadro 3. Características de *Pinus hartwegii* reforestado en la pradera de alta montaña del PNCA.

Longitud de yemas apicales	Diámetro de yemas apicales	Longitud foliar	Biomasa
1.34 \pm 0.61	-----cm----- 0.56 \pm 0.15	6.61 \pm 1.92	^g 1.39 \pm 0.25

7.2 Diagnostico de las propiedades del suelo de la PAM del PNCA

Tipo de roca. La andesita, es la roca dominante en la zona de estudio. Esta roca es ígnea intermedia, la cual se caracteriza por presentar feldespatos como anortita, labradorita, andesina y minerales secundarios como hornablenda y algunas micas del tipo de las biotitas (Bullock *et al.*, 1985).

7.2.1 Propiedades químicas

Acidez del suelo. El pH de esta zona fue de 5.06 (± 0.16), catalogado como muy fuertemente ácido (Cuadro 4), de acuerdo con la clasificación de Schoeneberger *et al.* (2002) y fuertemente ácido con respecto a la NOM-021-SEMARNAT (2000). En estos valores, la disponibilidad de Al^{3+} se incrementa y se forman complejos con la materia orgánica o las arcillas (Aguirre-Gómez, 2001). Al respecto, Campillo *et al.* (2007) mencionan que el ión aluminio (Al^{3+}), en solución acuosa y ácida, tiende a hidrolizarse; es decir, a combinarse con agua liberando iones hidrógeno (H^+) y por su alta reactividad tiende a formar complejos y ser tóxico.

La toxicidad por aluminio ha sido reportada por Huang *et al.* (2002), Ryder *et al.* (2003) y Prabagar *et al.* (2011) que lo atribuyen a que el Al^{3+} se une a: *i*) carboxilos, hidroxilos y fosfórilos reduciendo la adsorción de micronutrientes; *ii*) calmodulina lo que inhibe el crecimiento de las raíces; *iii*) Adenosín Trifosfato (ATP) que disminuye el ciclo energético y *iv*) Ácido Desoxirribonucleico (ADN) con lo cual puede alterar el material genético.

El pH con KCl fue de 3.15 (± 0.14) (Cuadro 4) ya que el Al^{3+} es desplazado por el K en los sitios de intercambio, se consumen iones OH^- e incrementa $[H^+]$; como resultado hay una mayor acidez por la presencia de aluminio intercambiable (USDA, 1995).

El pH con NaF es usado como un índice de los materiales ácidos. Los resultados muestran que el suelo tiene un pH alto (10.18 ± 0.53) (Cuadro 4). De acuerdo con Yatno y Zauyah (2008), este valor indica altas cantidades de minerales arcillosos amorfos así como la presencia de componentes de hidróxidos de Al y Fe, uno de estos componentes es el Alófono. Al respecto, Campos-Cascaredo *et al.* (2001) encontraron que en pH mayores a 9, se presenta una relación lineal con el contenido de alófono. El alófono proporciona una mayor retención de humedad (Shoji *et al.*, 1993).

Fósforo. Con base en la NOM-021-SEMARNAT (2000), el P se encuentra dentro de la clase alta (Cuadro 4), por lo que no es un elemento limitante para la rehabilitación del

bosque y de andosoles. Shoji *et al.* (1993) menciona que Andosoles relativamente jóvenes, derivados de basaltos pueden presentar altos valores de P.

Nitrógeno. El porcentaje de N total se encontró en clase baja, según la NOM, por lo que estos suelos son deficientes (Cuadro 4). En general, el N es el nutrimento más limitante en los sistemas naturales (Débano, 1998). Según Shoji *et al.* (1993) los valores de N en Andosoles generalmente son bajos y se incrementan con la adición de materia orgánica.

Materia orgánica. Los valores MOS fueron de 1.6 (± 0.6) %, lo cual indica que está en la categoría muy baja de acuerdo con la NOM; por lo tanto, hay menor cantidad de restos de vegetales y animales.

Cationes. El ión Ca^{2+} se ubica como clase media (Cuadro 4), según la NOM, y son mayores a los registrados por Campos-Cascaredo *et al.* (2001) esto se atribuye a que la roca de origen es basalto, con dominancia de anortitas cálcicas.

El Mg^{2+} está en clase baja, según la NOM (Cuadro 4); sin embargo, los datos son superiores a los de Veracruz (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001) y Valle de Bravo (Prado *et al.*, 2007).

El K^+ se clasifica como clase muy baja (SEMARNAT, 2002) (Cuadro 4), siendo más bajos que los reportados en andosoles de Cofre de Perote (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001) y en Valle de Bravo (Prado *et al.*, 2007), lo que se puede atribuir a que en estos suelos no predomina la ortoclasa (KAlSi_3O_8). Las deficiencias en potasio implican reducción de fotosíntesis, incremento de respiración, menor síntesis y traslado de azúcares, presencia de sustancias catabólicas en las células, como la putresceína, que inicia procesos de muerte celular y tisular, esto es, genera necrosis de tejido (Ramírez y Rodríguez, 2010).

Para Na^+ , los valores son más bajos que los determinados en Cofre de Perote (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001) pero más altos que los indicados en Valle de Bravo (Prado *et al.*, 2007) por lo que se ubican como valores medios, atribuidos a que existe presencia importante de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Cuadro 4. Propiedades químicas (media \pm desviación estándar) del suelo de una pradera de alta montaña con reforestación de *Pinus hartwegii* en el PNCA.

Sitio	Profundidad	pH			N total	MOS	P	Cationes intercambiables			
		H ₂ O	KCl	NaF				Ca	Mg	K	Na
	cm				----- % -----	mg kg ⁻¹	----- cmol kg ⁻¹ -----				
PAM	0 – 5	5.06	3.15	10.18	0.13	1.6	93.05	5.60 (\pm 0.80)	0.75	0.14	0.26
Ajusco		(\pm 0.16)	(\pm 0.14)	(\pm 0.53)	(\pm 0.03)	(\pm 0.6)	(\pm 3.89)		(\pm 0.12)	(\pm 0.02)	(\pm 0.02)

PAM= Pradera de alta montaña

MOS= Materia orgánica del suelo

Cuadro 5. Propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) del suelo de una pradera de alta montaña con reforestación de *Pinus hartwegii* en el PNCA.

Profundidad	pH H ₂ O	Infiltración	K _{fs}	Φ_m	Densidad aparente	Porosidad	Hidrofobicidad
cm		-----mm h ⁻¹ -----		cm ² s ⁻¹	g cm ⁻³	%	Tiempo (min)
0 – 2.5	5.06	6160 (\pm 2543.70)	8.88	0.0030	0.87	21.49 (\pm 12.14)	28.18
2.5 – 5	(\pm 0.16)	2916 (\pm 484)	(\pm 4.09)	(\pm 0.0004)	(\pm 0.08)	15.14 (\pm 7.88)	(\pm 5.40)

7.2.2 Propiedades hídricas

Infiltración. La infiltración superficial fue de $6160 (\pm 2543) \text{ mm h}^{-1}$, y se redujo hasta $2916 (\pm 484) \text{ mm h}^{-1}$ a los 5 cm de profundidad. Esto significa una disminución de 52% (Cuadro 5), por lo que este suelo presenta problemas de drenaje.

Conductividad hidráulica. El valor obtenido de K_{fs} fue de $8.88 (\pm 4.08) \text{ mm h}^{-1}$ (Cuadro 5), es bajo con respecto al estudio realizado por Castro-Alonso (2009), quien indica $489.6 (\pm 619.2) \text{ mm h}^{-1}$ en un bosque conservado de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Izta-Popo.

Potencial de flujo matricio. En cuanto a la capacidad del suelo para retener el agua (potencial de flujo mátrico) se registró $0.0030 (\pm 0.0004) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Cuadro 5), que es bajo en comparación con $0.2177 (\pm 0.1876) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ reportado en una pradera de alta montaña del Parque Nacional Izta-Popo (Castro-Alonso, 2009).

La densidad aparente en este tipo de suelos es relativamente alta ($0.87 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$) (Cuadro 5) de acuerdo con Ishiguro y Nakajima (2000) de 0.51 g cm^{-3} para un andosol alofánico en Tokio, Japón. Asimismo, son mayores a los determinados por Acevedo (2008), quien reportó 0.80 g cm^{-3} en Hidalgo; Ángeles-Cervantes (2010) registró 0.67 g cm^{-3} en el Parque Nacional El Chico y González-Vargas (2011) de 0.74 g cm^{-3} en el Desierto de los Leones.

Micromorfología de suelos. En secciones delgadas, con el análisis de imágenes, se encontró que la porosidad total es muy baja (17.80%) y se reduce un 6%, de la superficie a los 5 cm de profundidad (de 21.49 a 15.14%, respectivamente). Los tipos de poros son cavidades y fisuras y las partículas están fuertemente empaquetadas. Este valor es el más bajo registrado para andosoles. Generalmente, los Andosoles Alofánicos presentan alta porosidad (hasta 60 %) (Shoji *et al.*, 1993), debido a la presencia de agregados migajosos que se forman como resultado de alta actividad biológica (Siéwé *et al.*, 2008). Ángeles-

Cervantes (2010) y González-Vargas (2011) registraron una porosidad total entre 35.08% y 36%, respectivamente, en andosoles de bosques de *Abies religiosa*, donde ocurrió un incendio superficial en el Parque Nacional El Chico y en el Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones, respectivamente. De acuerdo con estos autores, los incendios forestales tienen a colapsar a las partículas y cerrar el espacio poroso (Fig. 4a), lo que provoca una disminución de la porosidad; por lo tanto, en la conductividad hidráulica. La presencia de restos vegetales carbonizados (Fig. 4b), son una evidencia de que el fenómeno ha ocurrido. La alta compactación de las partículas reduce el espacio poroso y en consecuencia se incrementa la densidad aparente. No obstante, esta todavía conserva valores inferiores a 1 lo que significa la dominancia de materiales amorfos (WRB, 2006).

Hidrofobicidad. La hidrofobicidad en esta zona se clasifica como clase 4, que significa que es extremadamente repelente, de acuerdo con la clasificación para suelos de WDTP (Water Drop Penetration Time), ya que el promedio de tiempo de absorción de una gota fue de 28.18 minutos.

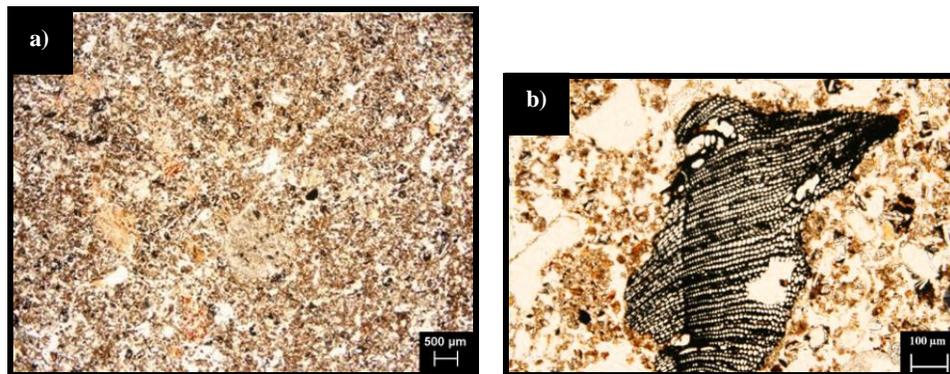


Figura 4. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del suelo reforestado con *Pinus hartwegii* en el PNCA. (a) Colapsamiento de agregados y (b) vestigio carbonizado.

Con base en lo anterior, se puede inferir que en esta zona ocurrió un incendio superficial, lo que provocó la combustión incompleta de sustancias orgánicas y generó presencia de sustancias hidrofobas (éteres y estéres) (Santander-González, 2004); además, estos incendios generan deshidratación de minerales y colapsamiento de agregados

(Ángeles-Cervantes, 2010). La hidrofobicidad reduce la absorción de agua, la compactación reduce el movimiento del agua disminuyendo la infiltración y la conductividad hidráulica (Badía *et al.*, 2003 y Rulli *et al.*, 2006). La baja porosidad explica los bajos valores de la K_{fs} y por ello muestran una alta relación ($R^2=0.81$; $p<0.014$); mientras que la deshidratación de minerales contribuye a una ocasionar una menor retención de humedad (Woods y Balfour, 2001). Por lo tanto, se reduce la disponibilidad de agua para las plantas lo que limita el crecimiento de *Pinus hartwegii* utilizados en la reforestación, así como el servicio ambiental hidrológico para la recarga de mantos acuíferos. Además, la composición mineralógica (andesitas) y la acidez del suelo de la pradera de alta montaña, liberan aluminio que forma complejos y flocula con el agua.

Con base en los resultados anteriores se hipotetiza que la adición de hidróxidos, fundamentalmente de KOH y en menor grado de $Ca(OH)_2$ disminuirá la hidrofobicidad incrementará la formación de agregados, con ello se aumentará la porosidad lo que ocasionará una mayor K_{fs} , retención de humedad, un mayor crecimiento de *Pinus hartwegii*, por lo tanto la restauración del servicio ambiental hidrológico.

7.3 Requerimiento de alcalinizante y tipo de hidróxido

Se utilizaron KOH, Ca(OH)_2 y Al(OH)_3 de acuerdo con Velasco (1983). La adición de KOH y Ca(OH)_2 incrementan el pH de 5.09 a 6.88 y 6.05, respectivamente (Cuadro 6), pero el hidróxido de Al tiende a disminuirlo a 5.10.

El incremento del pH se atribuye a que el KOH y Ca(OH)_2 se disocian y neutralizan a los grupos carboxílicos de los ácidos orgánicos (Mizota y Van Reeuwijk, 1989) (Fig. 5). Además, los cationes Ca^{2+} y K^+ reemplazan al H^+ y Al^{3+} se solubiliza y el pH se incrementa (Aguirre-Gómez, 2001). Por otro lado, Buckman y Brady (1991) mencionan que la concentración de iones H^+ en la solución del suelo disminuye cuando el hidrógeno adsorbido y el Al son reemplazados de los suelos ácidos por cationes como Ca^{2+} y K^+ .

El decremento del pH, se atribuye a la polimerización de Al(OH)_3 en Al(OH)_2^+ liberando iones H^+ (Huang *et al.*, 2002).

Se obtuvo que la cantidad de KOH requerida para una hectárea en el suelo de la PAM es de 5.6 kg y para Ca(OH)_2 es de 3.7 kg (Cuadro 7). Por lo tanto, se determinó que el KOH es adecuado como alcalinizante porque aumenta el pH a 6.88 lo que no sucede con Ca(OH)_2 ni con Al(OH)_3 (Fig. 5).

Cuadro 6. Efecto de la variación del pH con adición de hidróxidos concentración 0.04 N en muestras de suelo del PNCA.

Suelo	Hidróxido	Agua destilada	Volumen total	pH		
				KOH	Ca(OH)_2	Al(OH)_3
		-----mL-----				
10	0	20	20	5.09	5.29	5.52
10	2	18	20	5.11	5.38	5.50
10	5	15	20	6.1	5.51	5.44
10	8	12	20	6.29	5.62	5.45
10	11	9	20	6.58	5.98	5.47
10	14	6	20	6.76	6.00	5.48
10	17	3	20	6.88	6.05	5.10

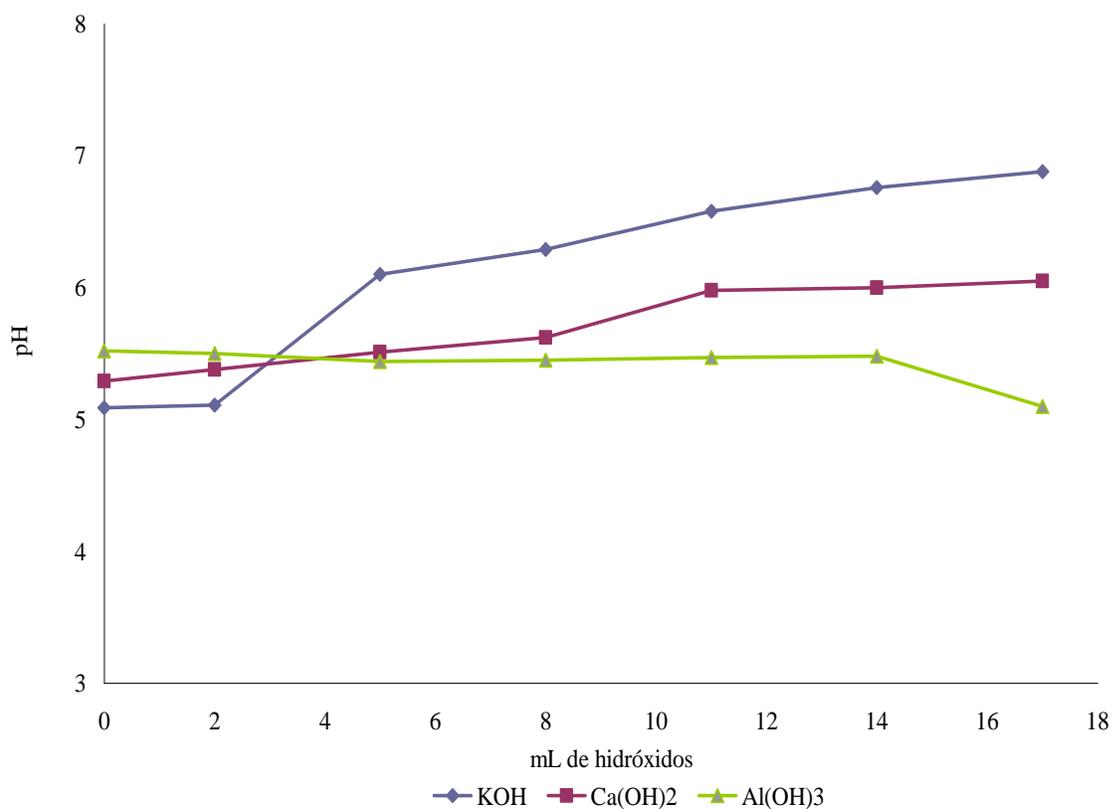


Figura 5. Efecto de la adición de hidróxidos [0.04 N] en el pH de muestras del suelo de la PAM con reforestación de *Pinus hartwegii* del PNCA.

Cuadro 7. Cantidad estimada de hidróxido que se requiere para elevar el pH en las praderas de alta montaña del PNCA.

Hidróxido	pH inicial	Kg ha ⁻¹	pH final	Costo de hidróxido	
				Kg	Ha
KOH	5.09	5.6	6.88	\$ 190.00	\$ 1064.00
Ca(OH) ₂	5.29	3.7	6.05	\$ 300.00	\$ 1110.00

7.4 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos

7.4.1 Efecto de la adición de hidróxidos en las propiedades hídras

Hidrofobicidad. La adición de KOH [51 ppm] y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm] disminuyen significativamente ($p=0.001$ y 0.01) la hidrofobicidad de 28.18 minutos a 19.33 y 14.19 minutos (Cuadro 9). La capa hidrofóbica está formada por aceites y resinas así como de compuestos como ésteres y éteres (Santander-González, 2004), por lo que al agregar un hidróxido se lleva a cabo una hidrólisis en disolución básica, la cual se conoce como saponificación, y se rompen los enlaces de esos compuestos (Mc Murry, 2008) y la capa tiende a desaparecer.

Porosidad. Con excepción de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [35 ppm] que tiende a disminuir la porosidad, en general, la adición de hidróxidos ocasionó incrementos en la porosidad (Fig. 6); sin embargo, únicamente la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10 ppm] incrementó la porosidad significativamente ($p=0.008$) de $17.80 (\pm 10.25)$ a $25.82 (\pm 6.54)$ % (Cuadro 8). El análisis de las secciones delgadas reveló que también modificó la forma de los poros. En las muestras sin tratamiento, la microestructura es de tipo cavidades y con la adición de calcio se incrementa el espacio poroso, ya que los agregados más finos se aglomeran y tienden a formar poros de empaquetamiento simple o compuesto los cuales, según Stoops (2007) favorecen a la transmisión del agua.

Densidad aparente. La adición de KOH [30 ppm] y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10 y 15 ppm] ocasionaron una disminución significativa de la densidad aparente de $0.87 (\pm 0.06)$ a $0.76 (\pm 0.01)$, $0.62 (\pm 0.12)$ y $0.61 (\pm 0.02)$ g cm^{-3} ($p=0.03$, 0.03 y 0.003), respectivamente (Cuadro 8). Esta disminución se atribuye al incremento de la porosidad.

Infiltración. La infiltración inicial fue de $6160 (\pm 2543.70)$ mm h^{-1} . La adición de KOH [51 ppm] y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm] tienden a incrementarla a $6640 (\pm 1327.25)$ y $10,080 (\pm 4988.31)$ mm h^{-1} . En tanto que, la adición de KOH [30 ppm] tiende a disminuirla ya que registró $4100 (\pm 1981.21)$ mm h^{-1} ; sin embargo, no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 9).

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs}). La K_{fs} en sitios sin tratamiento fue de 8.88 (± 4.08). En general, la adición de hidróxidos tiende a incrementarla. La adición de Ca(OH)_2 [20 ppm] y KOH [51 ppm] incrementan la K_{fs} a 20.23 (± 18.43) mm h^{-1} y 11.22 (± 14.78) mm h^{-1} respectivamente. Con KOH [30 ppm] la K_{fs} disminuye a 6.80 (± 8.98); sin embargo, en todos los casos no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 9).

Potencial de flujo mátrico. El valor de este potencial de flujo en los sitios sin tratamiento fue de 0.0030 (± 0.0004) mm h^{-1} . En general, la adición de hidróxidos incrementa el potencial de flujo mátrico. La adición de Ca(OH)_2 [20 ppm] aumentó significativamente ($p= 0.05$) a 0.0114 (± 0.0043) mm h^{-1} . Por otra parte, con KOH [30 ppm] y [51 ppm] también se incrementa a 0.0056 (± 0.0004) y 0.0173 (± 0.0182) mm h^{-1} , respectivamente; sin embargo, no presentaron diferencia significativa ($p= 0.23$ y 0.18 respectivamente) (Cuadro 9).

Contenido de humedad. Este contenido en sitios sin tratamiento fue de 15.63 (± 10.12) %. La adición de Ca(OH)_2 [10 ppm] aumenta significativamente la retención de humedad a 40.59 (± 4.30) % ($p=0.03$). La adición de hidróxidos actúa sobre los compuestos hidrofóbicos por lo cual se aumenta la retención de humedad (Cuadro 8).

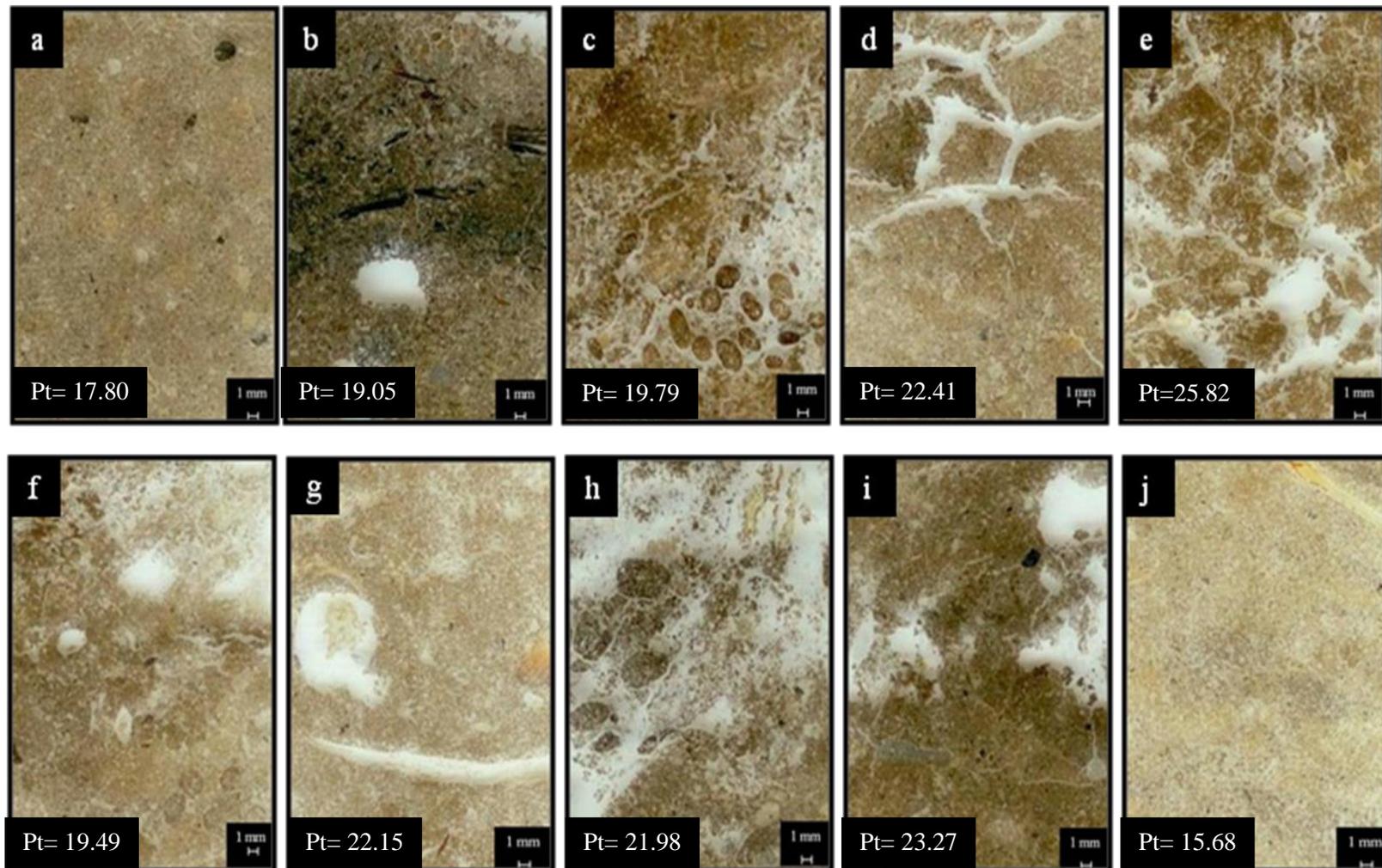


Figura 6. Secciones delgadas de muestras inalteradas del andosol de la pradera de alta montaña reforestado con *Pinus hartwegii* en el PNCA, (a) sin tratamiento; (b), (c) y (d) con adición de KOH [25, 30 y 35 ppm]; (e), (f) y (g) con adición de Ca(OH)₂ [10, 15 y 20 ppm] y (h), (i) y (j) con adición de Al(OH)₃ [25, 30 y 35 ppm]. Pt= porosidad total (%).

Cuadro 8. Efecto de la adición de hidróxidos en algunas propiedades hídricas del suelo de la PAM con reforestación de *Pinus hartwegii* del PNCA.

Tratamiento	Densidad	Porosidad	Contenido de humedad
	g cm ⁻³	----- % -----	
Sin tratamiento	0.87 (±0.05)	17.80 (±10.25)	15.63 (±10.12)
KOH 25 ppm	0.63 (±0.09)	19.05 (±12.14)	24.76 (±5.00)
KOH 30 ppm	0.76 (±0.01) ^a	19.79 (±6.98)	27.35 (±0.57)
KOH 35 ppm	0.87 (±0.04)	22.41 (±9.57)	14.63 (±8.32)
Ca(OH) ₂ 10 ppm	0.62 (±0.12) ^a	25.82 (±6.53) ^a	40.59 (±4.30) ^a
Ca(OH) ₂ 15 ppm	0.61 (±0.02) ^a	19.49 (±8.13)	26.50 (±8.66)
Ca(OH) ₂ 20 ppm	0.80 (±0.22)	22.15 (±6.34)	24.95 (±6.10)
Al(OH) ₃ 25 ppm	0.64 (±0.10)	21.98 (±13.12)	17.57 (±1.83)
Al(OH) ₃ 30 ppm	0.63	23.27 (±14.89)	15.78
Al(OH) ₃ 35 ppm	0.74	15.68 (±2.54)	11.81

La letra **a** = diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Cuadro 9. Efecto de la adición de las propiedades hídricas evaluadas *in situ* en el suelo de la pradera de alta montaña con reforestación de *Pinus hartwegii* del PNCA.

Tratamiento	Infiltración	K_{fs}	Φ_m	Hidrofobicidad
	-----mm h ⁻¹ -----		cm ² s ⁻¹	Min
Sin tratamiento	6160 (±2543.70)	8.88 (±4.09)	0.0030 (±0.0004)	28.18 (±5.40)
KOH 30 ppm	4100 (±1981.21)	6.80 (±8.98)	0.0056 (±0.0042)	-
Ca(OH) ₂ 20 ppm	6640 (±1327.25)	20.23 (±18.43)	0.0114 (±0.0043) ^a	14.19 (±3.63) ^a
KOH 51 ppm	10,080 (±4988.31)	11.22 (±14.78)	0.0173 (±0.0182)	19.33 (±1.15) ^a

La letra a= diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

7.4.2 Efecto de la adición de hidróxidos en el crecimiento de *Pinus hartwegii*

Longitud de yemas apicales. En general, la adición de KOH y Ca(OH)₂ no influyeron sobre la longitud de las yemas apicales de *Pinus hartwegii*, y no se detectó diferencia significativa entre tratamientos. (Cuadro 10).

Diámetro de yemas apicales. La adición de hidróxidos en el suelo no influyó en el diámetro de yemas ya que no se registraron diferencias significativas (Cuadro 10).

Longitud foliar. Únicamente la adición Ca(OH)₂ [10 ppm] la incrementó significativamente ($p=0.04$) de 6.62 (±1.92) a 10.14 (±2.45) cm (Cuadro 10).

Biomasa. En general, la adición de KOH, Ca(OH)₂ y Al(OH)₃ incrementan la biomasa de *Pinus hartwegii* (Cuadro 10). Sin embargo, sólo el tratamiento con Ca(OH)₂ [20 ppm] incrementó significativamente ($p=0.05$) la biomasa de 1.39 (±0.25) a 8.54 (±3.33) g. Este aumento, de acuerdo con Marschner (1995) y Cruz-Flores (2006), se debe a que disminuyó la hidrofobicidad, hay un mayor contenido de agua y mayor disponibilidad de nutrimentos. En este caso el calcio contrarresta los efectos de la acidez que provocando una elongación de las raíces mejora el crecimiento.

Cuadro 10. Efecto de la adición de hidróxidos en el crecimiento de *Pinus hartwegii* reforestado en la PAM del PNCA.

Tratamiento	Concentración	Longitud de brote	Diámetro de brote	Longitud foliar	Biomasa
	ppm		-----cm-----		g
Sin tratamiento	-	1.34 (± 0.61)	0.56 (± 0.15)	6.61 (± 1.92)	1.39 (± 0.25)
KOH	25	1.16 (± 0.40)	0.66 (± 0.31)	7.90 (± 1.93)	2.42 (± 0.96)
KOH	30	1.57 (± 0.33)	0.70 (± 0.16)	8.72 (± 3.97)	7.36 (± 4.40)
KOH	35	1.68 (± 0.50)	0.62 (± 0.14)	8.72 (± 1.95)	4.01 (± 1.83)
Ca(OH) ₂	10	1.08 (± 0.42)	0.45 (± 0.13)	10.14 (± 2.45) ^a	4.56 (± 4.53)
Ca(OH) ₂	15	1.40 (± 0.44)	0.54 (± 0.16)	7.73 (± 1.03)	4.29 (± 2.79)
Ca(OH) ₂	20	1.58 (± 0.44)	0.74 (± 0.16)	9.60 (± 2.50)	8.54 (± 3.33) ^a
Al(OH) ₃	25	1.40 (± 0.57)	0.48 (± 0.11)	6.53 (± 1.27)	2.59 (± 2.18)
Al(OH) ₃	30	1.24 (± 0.56)	0.48 (± 0.13)	7.13 (1.33)	2.18 (± 1.45)
Al(OH) ₃	35	1.42 (± 0.46)	0.47 (± 0.10)	6.64 (± 1.09)	2.92 (± 1.31)

Las letras **a**= diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

7.4.3 Efecto de la adición de hidróxidos en la mineralogía del suelo del PNCA

El análisis de la difracción de rayos X indica que los minerales primarios en este suelo fueron dominados por el grupo de feldspatos como anortita, que se origina a partir de rocas ígneas (Acosta *et al.*, 2011) la cual está presente en cuatro de las muestras (Fig. 7, 8 y 9). Asimismo, sólo se observó en dos muestras la albita, plagioclasa de sodio (Quantin *et al.*, 1985). En menor cantidad, se detectó la presencia de cuarzo que es un mineral característico de las rocas ígneas plutónicas y es secundario en las rocas volcánicas debido a que domina el vidrio volcánico, lo cual coincide con lo reportado por Prado *et al.* (2007) en el Valle de Bravo en la Faja Volcánica Transmexicana.

Entre los minerales secundarios se encuentran materiales arcillosos como caolinita, con estructura tipo 1:1, goethita, calcita, esmectita, alófano, ferrihidrita y magnetita característicos de estos suelos.

De acuerdo con Van Ranst *et al.* (2008), el alófano e imogolita son dominantes bajo condiciones de acidez moderada a neutra ($\text{pH} > 5$); mientras que los complejos de humus-Al son dominantes bajo condiciones muy fuertemente ácidas ($\text{pH} < 5$), por lo que estos minerales no son dominantes en este suelo.

Los difractogramas (Fig. 7, 8 y 9) muestran que la adición de KOH [35 ppm], $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm], y $\text{Al}(\text{OH})_3$ [35 ppm], no modifican la composición mineralógica, ya que los minerales son similares en todas las muestras, por lo que se infiere que las concentraciones de hidróxido son bajas y por lo tanto, no afectan la mineralogía del suelo de la zona.

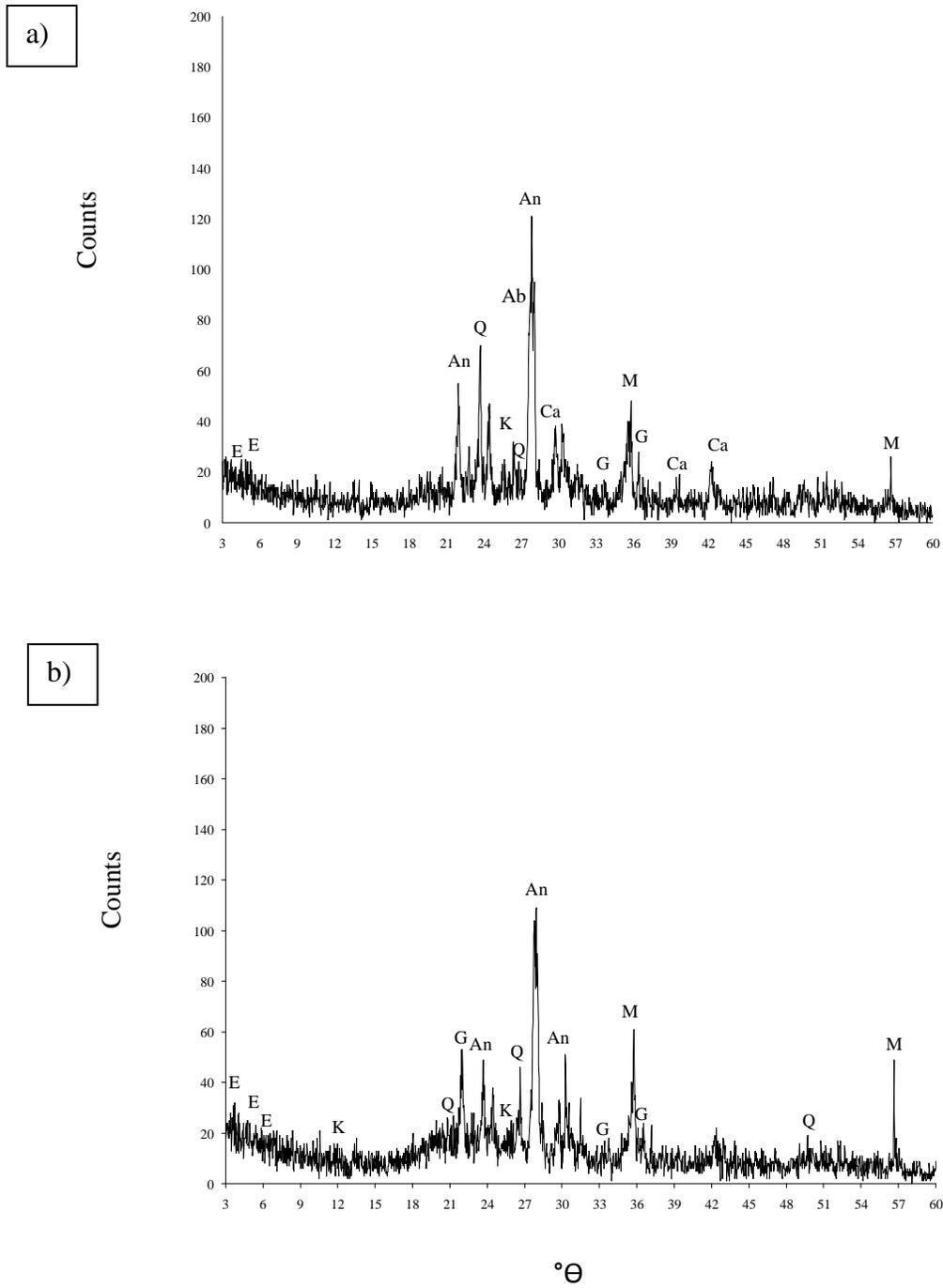


Figura 7. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; **a)** sin tratamiento; **b)** con adición de KOH [35 ppm]. Minerales: Ab=Albita, An=Anortita, Q=Cuarzo, Fe=Ferrihidrita, E=Esmerectita, K=Caolinita, G=Goetita, M=Magnetita, C=Calcita.

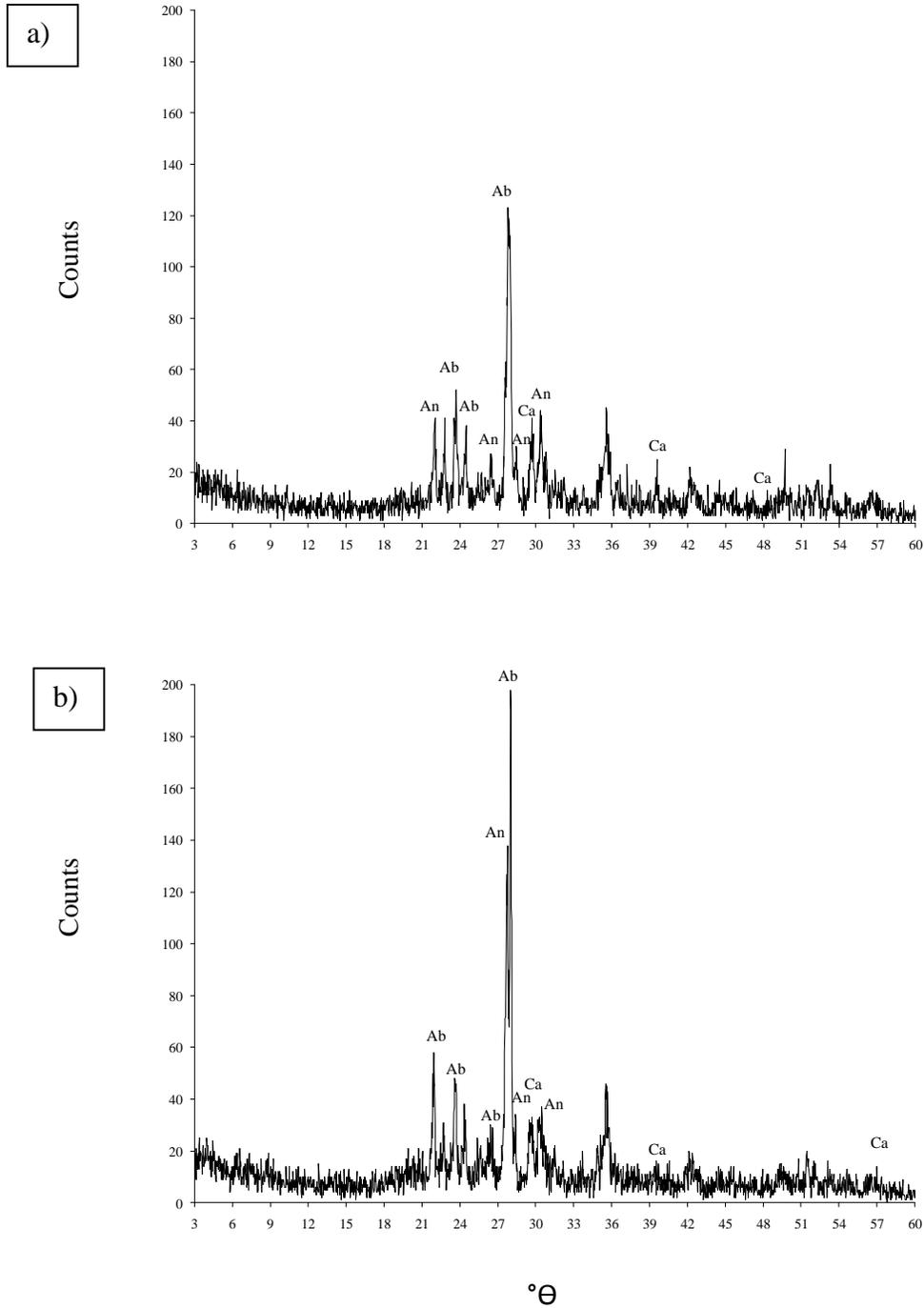


Figura 8. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; **a)** sin tratamiento; **b)** con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm]. Minerales: Ab=Albita, An=Anortita, Q=Cuarzo, Fe=Ferrihidrita, E=Esmectita, K=Caolinita, G=Goetita, M=Magnetita, C=Calcita.

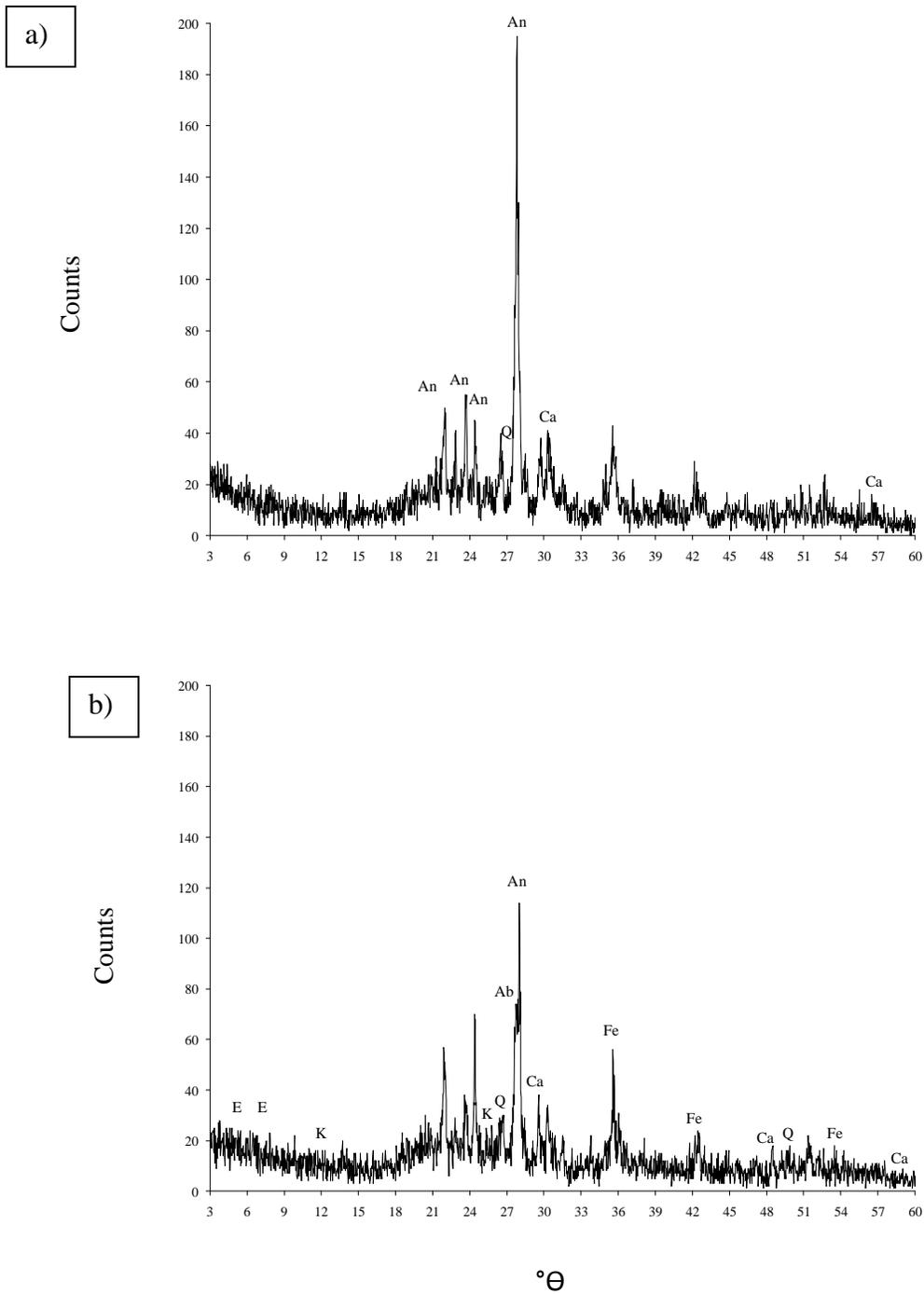


Figura 9. Difractometría en Rayos X de un andosol de la pradera de alta montaña del PNCA; **a)** sin tratamiento; **b)** con adición con adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [35 ppm]. Minerales: Ab=Albita, An=Anortita, Q=Cuarzo, Fe=Ferrihidrita, E=Esmeclita, K=Caolinita, G=Goetita, M=Magnetita, C=Calcita.

7.4.4 Efecto de la adición de hidróxidos en la micromorfología del suelo de la PAM del PNCA

En el Cuadro 11 se reportan las principales características micromorfológicas del suelo estudiado. El arreglo que presentan los elementos de fábrica en la muestra de andosoles sin tratamiento, son: distribución básica aleatoria (Fig. 10a), y el patrón de distribución relacionada de los constituyentes finos y gruesos es Mónica ya que presentan partículas de un mismo tamaño (Stoops y Jongerius, 1975). La disposición de los elementos tiene un grado agregación que se describe como débilmente desarrollado ya que el material del suelo se divide en un número de unidades parcialmente separado por poros fisura y cavidad. Por lo tanto, la estructura es de poros cavidades como resultado del empaquetamiento denso de las partículas primarias (Pape y Lager, 1995). La porosidad total fue baja (18 %).

Al adicionar KOH [25, 30 y 35 ppm] se presentan el mismo arreglo (Fig. 10b, 11a y 11b) de los elementos de fábrica que la muestra sin tratamiento, pero en este caso los poros cavidad, debido al aglutinamiento de las partículas, tienden a ser mayores por lo que la porosidad aumenta en 4.6% (Cuadro 11).

En el caso de la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10 ppm] se observa distribución básica aleatoria (Fig. 12a). El patrón de distribución relacionada de los constituyentes finos y grueso es Enaúlica ya que se presenta unidades grandes de fábrica con agregados de unidades más pequeñas en los espacios intersticiales. Este tipo de agregados no llenan completamente los espacios intersticiales y las unidades más grandes se apoyan unas con otras (Stoops y Jongerius, 1975). El grado de agregación es moderadamente desarrollado debido a que el material del suelo ya se divide en un número de unidades, las cuales están rodeadas por poros fisuras y están unidos por otros agregados. La estructura es fisurada porque existen pocos agregados y los poros fisura están muy interconectados. La porosidad total aumenta a 25.82% (Cuadro 11).

En el tratamiento cuando se adicionó de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm], los elementos de fábrica presentan una distribución básica aleatoria (Fig.13a). La distribución relacionada de constituyentes finos y gruesos es Mónica ya que se presentan unidades de fábrica de un

grupo de tamaño. Los poros son de tipo cavidad y son mayores que en la muestra sin tratamiento por lo que la porosidad es 22.5%, por el efecto agregante del calcio.

En cuanto a la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [25, 30 y 35 ppm] sus elementos siguen siendo parecidos a la muestra sin tratamiento (Fig. 13b, 14a y 14b, respectivamente), aunque los poros cavidad son más grandes. En las dos primeras concentraciones, el aluminio generó aglutinamiento de las partículas, lo que deja más espacios vacíos y presenta una porosidad de 21.98 y 23.27%. En el caso de la adición de [35 ppm] disminuye un 2.1% con respecto a la muestra sin tratamiento debido a que a estas concentraciones deja de tener un efecto agregante.

Cuadro 11. Efecto de la adición de hidróxidos en las propiedades micromorfológicas del suelo de PAM con reforestaciones de *Pinus hartwegii* en el PNCA.

Tratamiento	Distribución básica	Patrón de distribución relacionada	Porcentaje de poros	Forma de poros
			%	
Sin tratamiento	Aleatoria	Mónica	17.80 (± 10.25)	Cavidad
KOH 25 ppm	Aleatoria	Mónica	19.05 (± 12.14)	Cavidad
KOH 30 ppm	Aleatoria	Mónica	19.79 (± 6.98)	Cavidad
KOH 35 ppm	Aleatoria	Mónica	22.41 (± 9.57)	Cavidad
Ca(OH) ₂ 10 ppm	Aleatoria	Enaúlica	25.82 (± 6.53) ^a	Fisuras y cavidades
Ca(OH) ₂ 15 ppm	Aleatoria	Mónica	19.49 (± 8.13)	Cavidad
Ca(OH) ₂ 20 ppm	Aleatoria	Mónica	22.15 (± 6.34)	Cavidad
Al(OH) ₃ 25 ppm	Aleatoria	Mónica	21.98 (± 13.12)	Cavidad
Al(OH) ₃ 30 ppm	Aleatoria	Mónica	23.27 (± 14.89)	Cavidad
Al(OH) ₃ 35 ppm	Aleatoria	Mónica	15.68 (± 2.54)	Cavidad

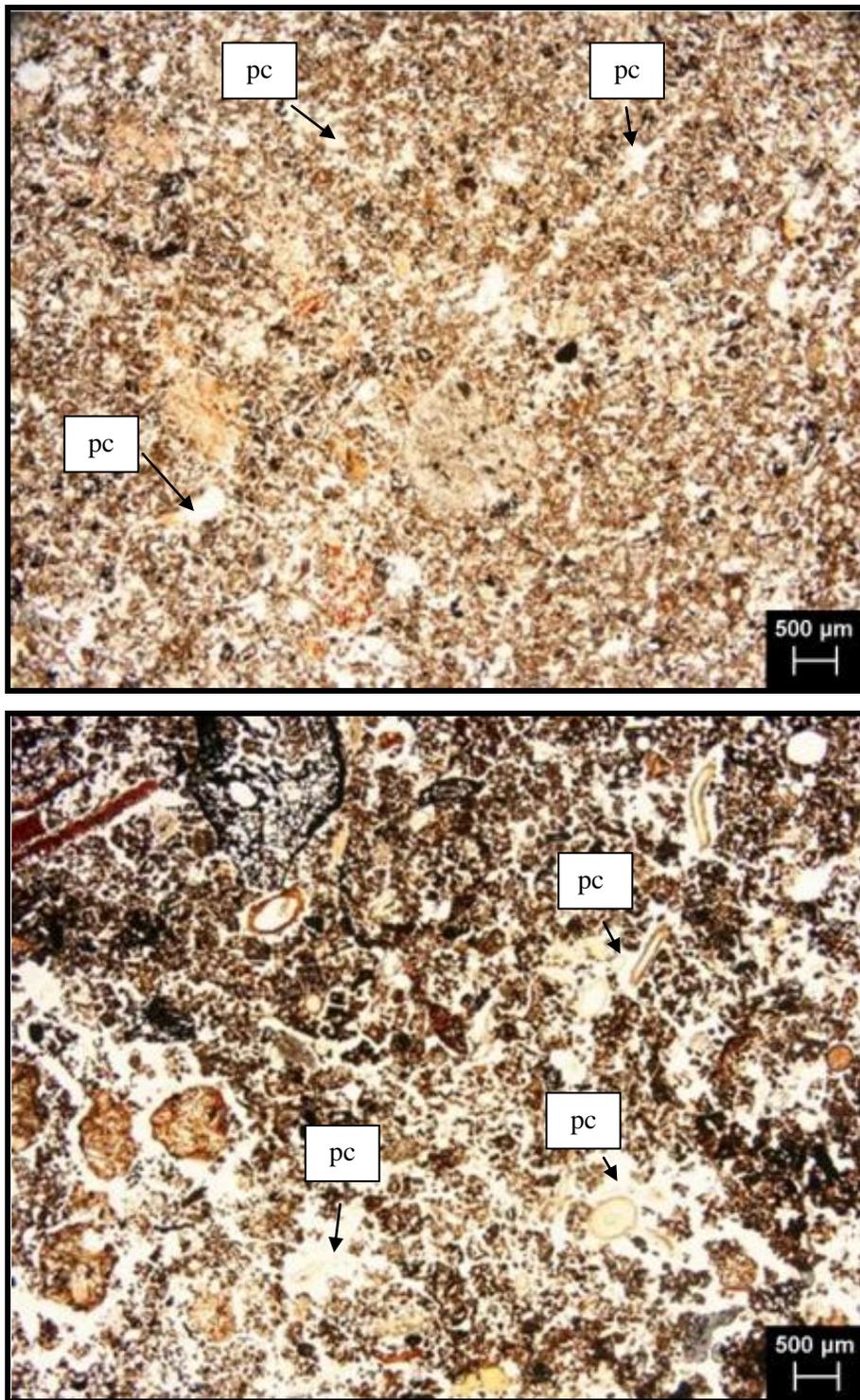


Figura 10. Microfotografías de un andosol en el PNCA. (a) Sin tratamiento (b) adición de KOH [25 ppm]. Poros cavidad (pc).

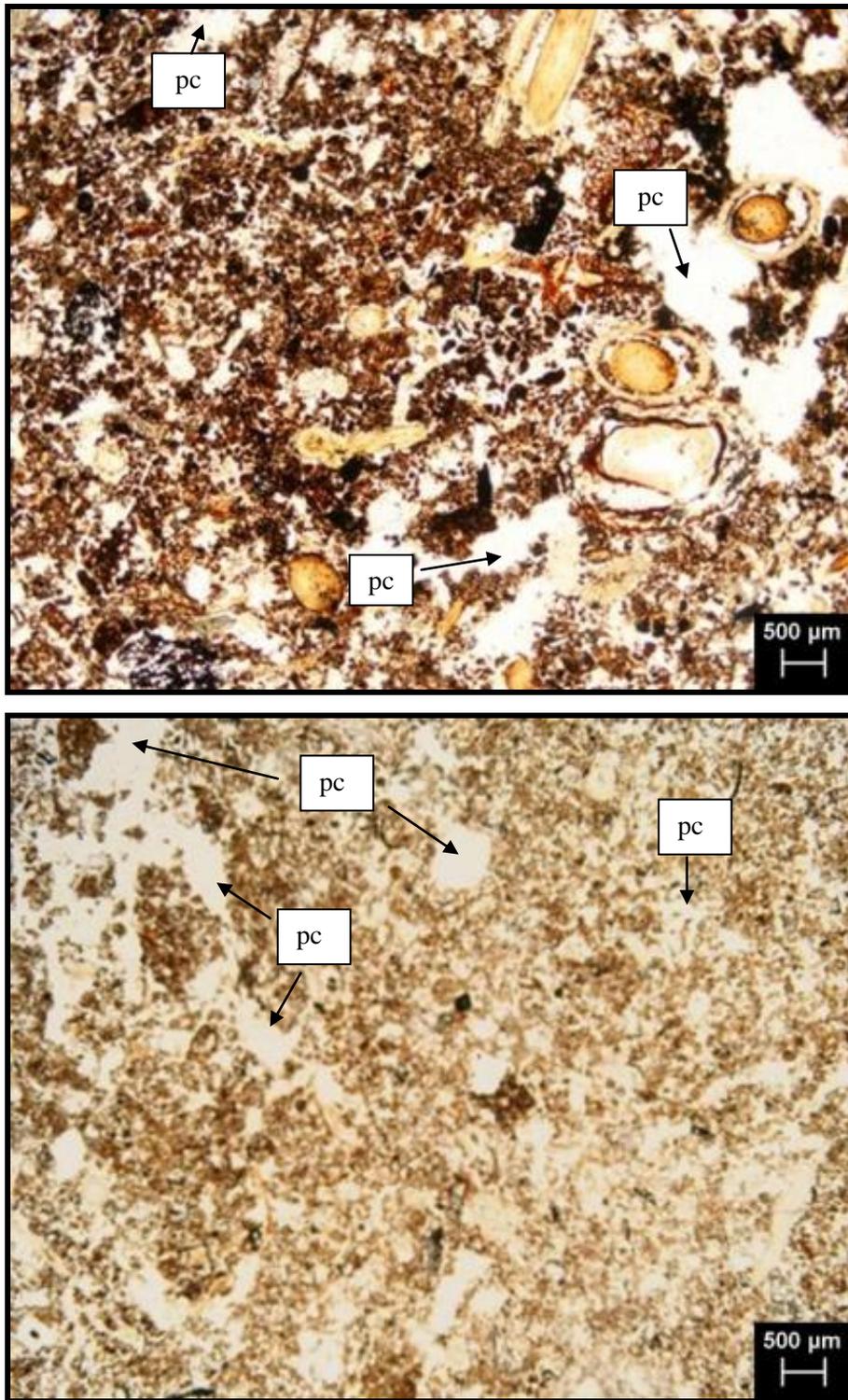


Figura 11. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) Adición de KOH [30 ppm] (b) adición de KOH [35 ppm]. Poros cavidad (pc).

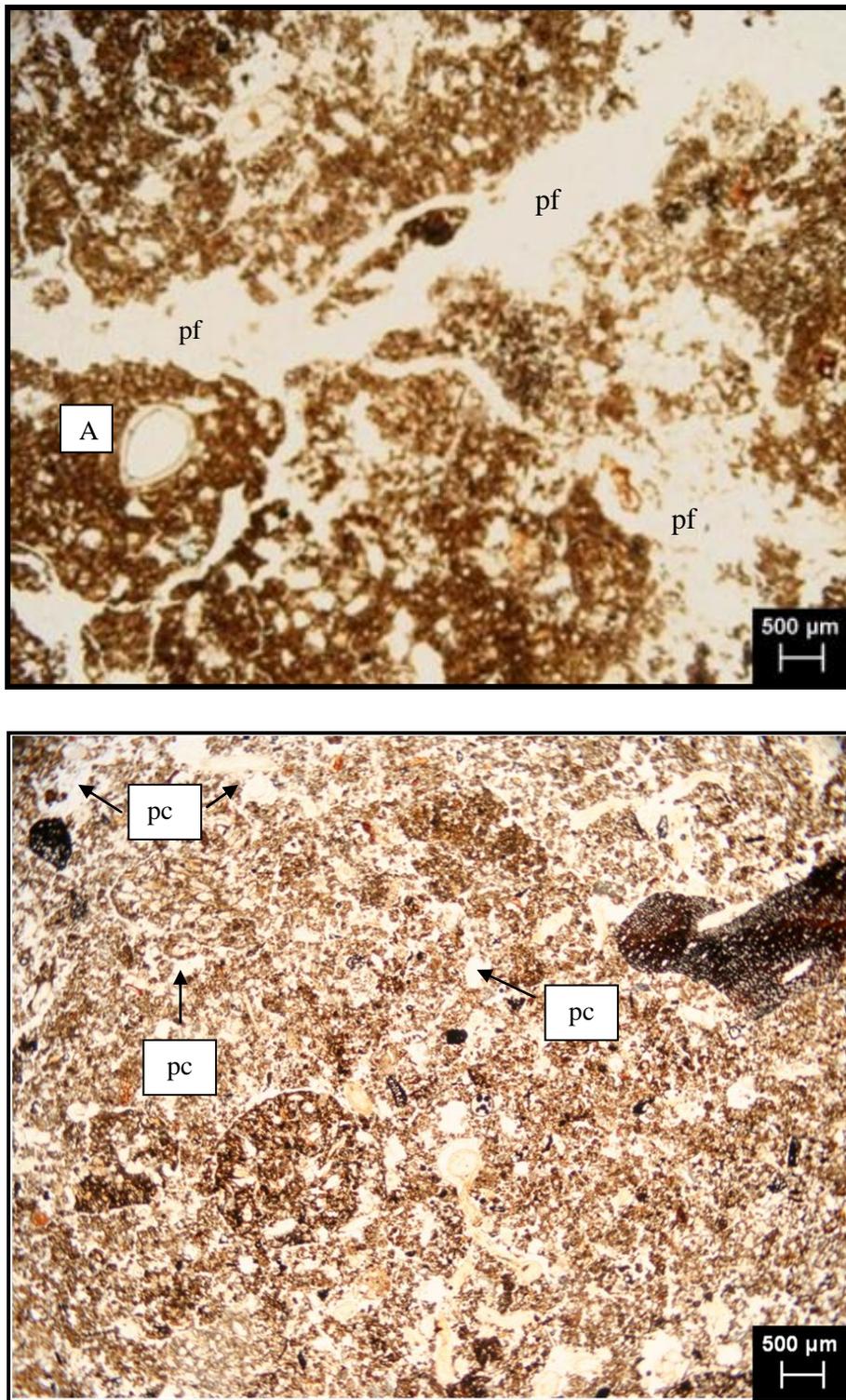


Figura 12. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) Con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10 ppm] (b) adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [15 ppm]. Poros fisura (pf), poros cavidad (pc) y agregados (A).

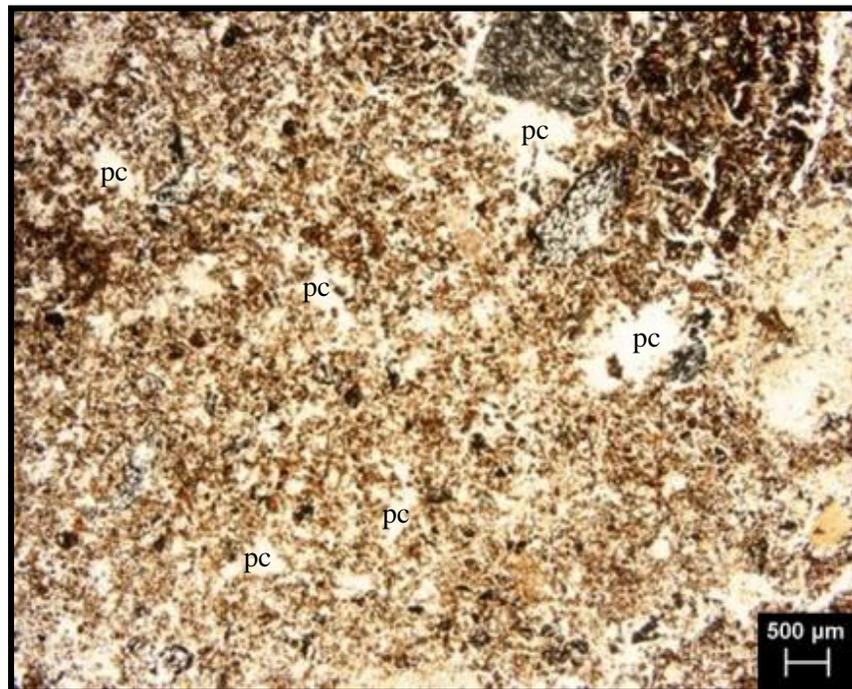
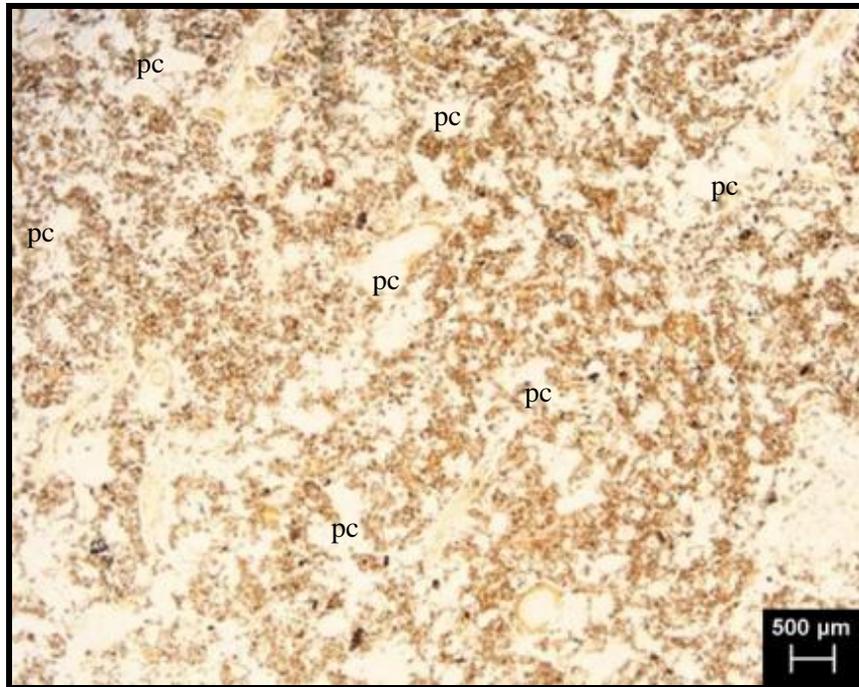


Figura 13. Microfotografías de andosol en el PNCA. (a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20 ppm] y (b) adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [25 ppm]. Poros cavidad (pc).

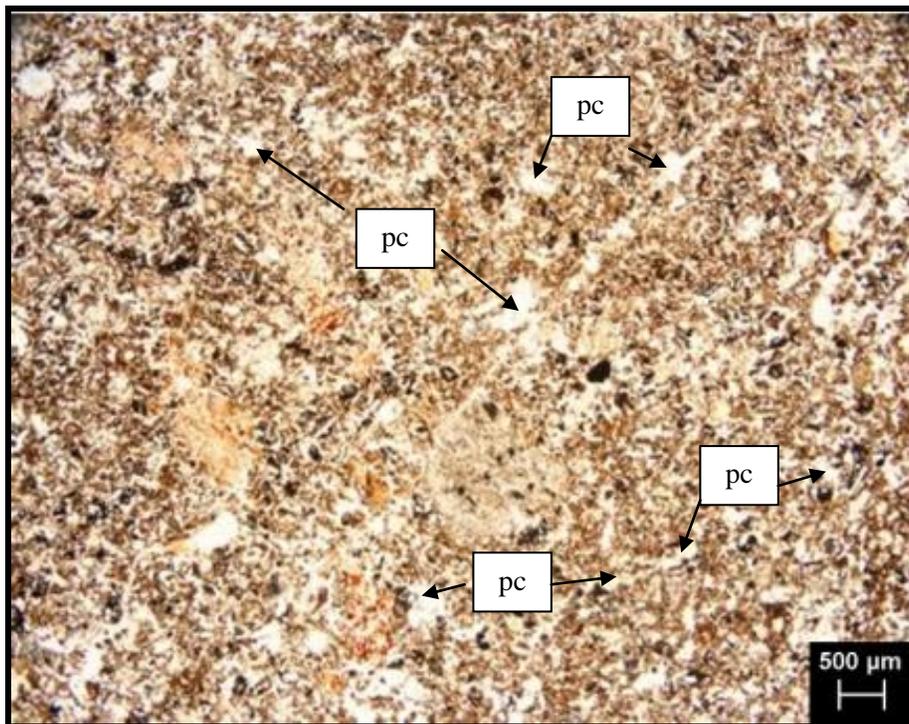
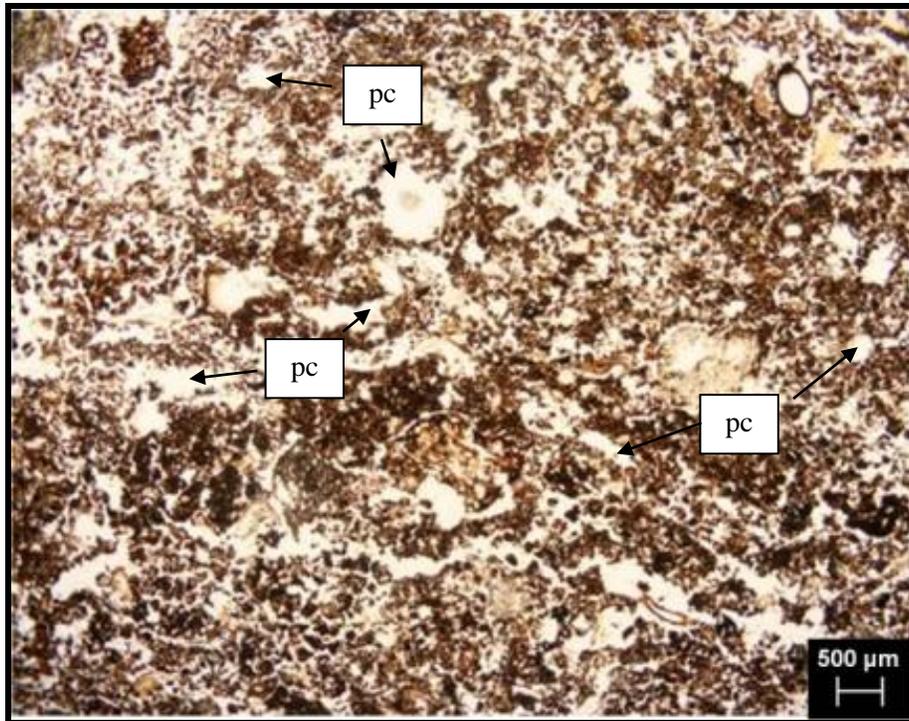


Figura 14. Microfotografías de un andosol en el PNCA. (a) Adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [30 ppm] y (b) adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ [35 ppm]. Poros cavidad (pc).

8. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que:

- ❖ En el Parque Nacional Cumbres del Ajusco ocurrió un incendio superficial que generó colapsamiento de agregados y disminución del espacio poroso, así como de la K_{fs} , infiltración y retención de humedad, por lo que estas variables del suelo no ofrecen condiciones favorables y el crecimiento *Pinus hartwegii* es deficiente.
- ❖ La acidez extrema del suelo provoca la disponibilidad de Al^{3+} a niveles tóxicos, además de ocasionar la floculación y menor disponibilidad con el agua, lo que afecta absorción por las plantas.
- ❖ La adición de KOH [51 ppm] y $Ca(OH)_2$ [10 y 20 ppm] aumentó el pH a neutro, (6.88-6.05) disminuyó la hidrofobicidad, modificó la estructura mónica a enaúlica, así como la forma de los poros de tipo cavidad a tipo fisura y aumentó la porosidad total. Además, disminuyó la densidad aparente, aumentó el potencial de flujo mátrico y contenido de humedad lo que ocasionó incrementos de la longitud foliar y la biomasa de *Pinus hartwegii*.
- ❖ La adición de hidróxidos no modificó la mineralogía de este suelo. Los minerales primarios en este suelo fueron dominados por anortita, albita y cuarzo. Entre los minerales secundarios se encuentran materiales arcillosos como caolinita, goethita, esmectita, alófano, ferrihidrita y magnetita.
- ❖ La adición de hidróxidos constituye una alternativa para restaurar el servicio ambiental hidrológico ya que mejora las propiedades hídricas y micromorfológicas del suelo e incrementa el crecimiento en *Pinus hartwegii* Lindl.

9. COMENTARIOS Y SUGERENCIAS

Este trabajo es un antecedente para el éxito en futuras reforestaciones así como la restauración del servicio ambiental hidrológico.

Se recomienda evaluar el efecto de los hidróxidos sobre el porcentaje de los macroporos, mesoporos y microporos.

Es necesario un estudio sobre el efecto de hidróxidos y su relación con el alófono e imogolita. En el análisis de minerales en Andosoles se debe cuantificar su porcentaje mediante la técnica de barrido de arcillas para su identificación.

Es necesario evaluar la adición de hidróxidos a mayores concentraciones y también en combinaciones, en varios tipos de suelo para identificar la combinación y la concentración a la cual se pueden modificar las propiedades hídricas.

10. LITERATURA CITADA

- Acevedo, S. O., Prieto, G. F., y A. Gordillo, M. (2008). Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del Estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21, 3-4: 125-131.
- Acosta, J. A., Martínez-Martínez, S. y J. Arocena. (2011). Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials. *Geoderma*, 161: 30-42.
- Aguilar-Acuña, J. L., López-Morgado, R., Núñez-Escobar, R. y A. Khalil Gardezi. (2003). Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un andosol de la Sierra Veracruzana. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 21 (3): 417-426.
- Aguirre-Gómez, A. (2001). Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Ed. UNAM, Cuautitlán, México. 6ª Reimpresión 2010.
- Alauzis, M. V., Mazzarino, E. R. y L. Roselli. (2004). Wildfires in NW Patagonia: long-term effects on a *Nothofagus* forest soil. *Forest Ecology and Management*, 192:131-142.
- Almeida-Leñero L., M. Escamilla, J. Jiménez de Azcárate, A. González Trapaga y A. M. Cleef. (2007). Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca. En: Luna, I. J. J., Morrone y D. Espinosa. (eds.) Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. Ed. CONABIO. UNAM, FES Zaragoza-Instituto de Biología. México. p. p. 179-198.
- Ángeles-Cervantes, E. R. (2010). Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias. Postgrado de Botánica. Colegio de Postgraduados.
- Arbelo, C. D., Rodríguez, R. A., Guerra, J. A. y J. L. Mora. (2002). Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias. *EDAFOLOGÍA*, Vol. 9 (1): 23-30.
- Badía, D. y Martí, C. (2003). Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management*, 17: 23-41.
- Breuer, L. y U. Schwertmann. (1999). Changes to hardsetting properties of soil by addition of metal hydroxides. *European Journal of Soil Science*, 50: 657-664.
- Buckman, H. O. y Brady, N. C. (1991). Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed. Limusa. México. p. p. 378.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G. y T. Tursina. (1985). Handbook for Soils Thin Descriptions. Waine Research Pub., Wolverhampton, England.
- Buytaert, W., G. Wyseure, G., De Bièvre, B. y J. Deckers. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrol. Process.* 19: 3985-3997.
- Calderón de Rzedowski G. y J. Rzedowski. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. CONABIO-Instituto de Ecología-UNAM. Pátzcuaro, Michoacán.
- Campillo, R. R., Jobet, F. C. y P. Undurraga, D. (2007). Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la región de La Araucanía, Chile. *Agricultura técnica (Chile)*, 67 (3): 281-291.
- Campos-Cascaredo, A., Oleschko, K., Cruz-Huerta, L., Etechevers, B. J. D. y C. Hidalgo M. (2001). Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *TERRA Latinoamericana* 19: 105-116.
- Castro-Alonso, A. (2009). Conductividad hidráulica en bosques y praderas de alta montaña de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México D.F.
- Challenger, A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO. Instituto de Biología-UNAM-Agrupación Sierra Madre. México. p. p. 521-530.
- Cheol, S. K. y M. Ishiguro. (1992). Effects of solution pH on ion transport in allophanic andisol. *Soil Sci, Plant Nutr.*, 38 (3): 477-484.

- Contreras, L. S. y A. Solé-Benet. (2003). Hidrofobia en suelos mediterráneos semiáridos: implicaciones hidrológicas para una pequeña cuenca experimental en El Iberico. *Rev. C & G.* 17 (1-2): 29-44.
- Cremona, M. V. y G. S. López. (2004). Niveles de fósforo en andosoles del Valle de el Bolsón. Resumen expandido de Comunicación. XIX Congreso de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos. Argentina. p. p. 1-5.
- Cruz, H. L. y D. Geissert K. (2000). Carga eléctrica de los andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 8 (002): 115-124.
- Cruz-Flores, G. (2006). Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. p. p. 49.
- De Bièvre, B. (2008). Las amenazas a los servicios ambientales hídricos que provee el páramo. En: Serrano, E. C. C. Páez R. A., y A. L. Kolter. Panorama y Perspectivas sobre la Gestión Ambiental de los Ecosistemas de Páramo. Memorias. Procuraduría General de la Nación Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios- Instituto de Estudios del Ministerio Público. Imprenta Nacional de Colombia. República de Colombia, Bogotá. p. p. 92-111.
- DeBano, L. F., Neary, D. G. y F. P. Ffolliott. (1998). Fire: its effect on soil and other ecosystem resources. John Wiley and Sons, Inc. U. S. A.
- DeBano, L. F., y J. S. Krammes. (1965). Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. Department of Agriculture. Glendora, California. p. p. 14-19.
- Dexter, A. R. y G. Richard. (2009). The saturated conductivity of soils with *n*-modal pore size distributions. *Geoderma*, 154: 76-85.
- Engström, E., Rodushkin, I., Öhlander, B., Ingri, J. y D. C. Baxter. (2008). Silicon isotopic composition of boreal forest vegetation in Northern Sweden. *Chemical Geology* 257: 247-256.
- Ezcurra, E. (1995). De las chinampas a la megalópolis. Colección La ciencia desde México. Secretaría de Educación Pública y Fondo de Cultura Económica. México. p. p. 117.
- Farrel, M., Healey, J. R., Godbold, D. L., Nason, M. A. Tandy, S. y D. L. Jones. (2010). Modification of fertility of soil materials for restoration of acid grassland habitat. *Society for Ecological Restoration International*, 1-11.
- Fontes, J. C., Gonçalves, M. C. y L. S. Pereira. (2004). Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena* 56: 145-154.
- Gabriels, D., Lobo, D. y M. Pulido. (2006). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos* 14: 7-22.
- Gandois, L. Probst, A. y C. Dumat. (2010). Modelling trace metal extractability y solubility in French forest soils by using soil properties. *European Journal of Soil Science*, 61: 271-286.
- García, C. N. E., Krasilnikov, P., Valera, P. M. A. y E. Torres, T. (2007). Suelos. En: Luna, I. J. J., Morrone y D. Espinosa. (eds.) Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. Ed. CONABIO. UNAM, FES Zaragoza-Instituto de Biología. México. p. p. 78-81.
- Girardin, M. P. y M. Mudelsee. (2008). Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecological Applications*, 18 (2): 391-406.
- GODF. Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2010). Décima séptima época. No. 904 tomo II.
- Gómez-Tagle, C. A. 2008. Variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y la conductividad hidráulica superficial en la cuenca de Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Instituto de Investigación sobre recursos naturales.
- González-Vargas T. (2011). Ecohidrología de un bosque de oyamel: Diagnostico y rehabilitación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, U. N. A. M. p. p. 70.

- Gudmundsson, T., Björnsson, H. y G. Thorvaldsson. (2004). Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. *Catena* 56: 213-224.
- Harden, C. P. y P. S. Delmas. (2003). Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, 55:5-24.
- Harsh, J. Chorover, J. y E. Nizeyimana. (2002). Allofane and Imogolite. En: Dixon J. B. y Darrell G. S. Soil mineralogy with environmental applications. Soil Science Society of America, Inc. Madison Wisconsin. U.S.A. 291-299.
- Hatton, T. J., Salvucci, G. D. y H. I. Wu. (1997). Eagleson's optimality theory of an ecohydrological equilibrium: quo vadis? *Functional Ecology* 11: 665-674.
- Huang, P. M., Wang, M. K., Kämpf, N. y G. Scheulze, D. (2002). Aluminium hydroxides. En: Dixon J. B. y Darrell G. S. Soil mineralogy with environmental applications. Soil Science Society of America, Inc. Madison Wisconsin. U.S.A. p. p. 261-268.
- Ice, G. G., Neary, G. D. y P. W. Adams. (2004). Effects of wildfire on soils and watershed processes. *Journal of Forestry*, 16-24.
- Iglesias, A. L. G., Alba, L., y Enríquez, J. L. (2000). Estrategias para la conservación de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. en la región del Perote, Veracruz. Cuadernos de biodiversidad, 4: 4-8.
- Immerzeel, W. (2008). Historical trends and future predictions of climate variability in the Brahmaputra basin. *Int. J. Climatol.* 28: 2243-254.
- INEGI (1976). Sistema de Clasificación de tipos de vegetación de México para la Carta de uso de suelo y vegetación del INEGI, escala 1: 250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, D. F. México.
- Ishiguro, M. y Nakajima T. (2000). Hydraulic Conductivity of an allophanic andisol leached with dilute acid solutions. *Soil Sci. Soc. Am.* Vol. 64 (3): 813-818.
- ISP Programa de Intercalibración de Análisis de suelos y plantas. (1994). Manual de procedimientos Analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT Colegio de Postgraduados, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. p.p. 38.
- Kleber, M., Mikutta, C. y R. Jahn. (2004). Andosols in Germany – pedogenesis and properties. *Catena* 56: 67-83.
- Leumbe, L. O., Bitom, D., Tematio, P., Temgoua, E. y Y. Lucas. (2005). Etude de sols ferrallitiques à caracteres andiques sur trachytes en zone de montagne humide tropicale. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 12 (4): 313-326.
- López, C. R., Ortiz, S. C. A., Quiñones, G. H. y J. D. Etchevers B. (1988). Relación del pH en NaF con algunas propiedades químicas útiles en la caracterización de los Andosoles de la Sierra Nevada. *Sobreretiro de Agrociencias*, 73. Colegio de Postgraduados. p. p. 144-158.
- Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants. Institute of plant nutrition. Second edition. Germany Academic Press. p. p. 285-312.
- Martínez, M. (1974). Pináceas mexicanas. Ed. Botas. p.p. 223-227.
- McMurry, J. (2008). Química orgánica. Ed. Cengage Learning. México. p. p. 809.
- Meza-Pérez, E. y D. Geissert-Kientz. (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *TERRA Latinoamericana*, 24 (2): 163-170.
- Mizota, C. y L. P. Van Reeuwijk. (1989). Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. International Soil Reference and Information Centre. Soil Monograph 2, ISRIC, Wageningen. p. p. 18-29.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M. y J. Braña. (2008). Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 65: 725-736.
- Ortíz, R. J. N. y Rodríguez, T. D. A. (2008). Incremento en biomasa y supervivencia de una plantación de *Pinus hartwegii* Lindl. en áreas quemadas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 14 (2): 89-95.

- Pagliai, M. y De Nobili, M. (1993). Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity in cultivated soils. *Geoderma*, 56: 243-256.
- Pape, T. y Lager, D. (1995). Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen, Netherlands. p. p. 164.
- Perea-Estrada, V. M., Pérez-Moreno, J., Isla-de Bauer, M. L. de la, Fenn, M. E., Trinidad-Santos, A., Hernández-Tejeda, T. (2005). Fertilización, tipos de suelo y hongos micorrízicos y endófitos radicales asociados al eucalipto. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 23 (2): 201-212.
- Perevochtchikova, M. y B. A. Vázquez. (2010). Los Servicios Ambientales Hidrológicos como herramienta de Política Pública Ambiental para la Gestión Integral del Recurso Hídrico: El Caso del Distrito Federal. Primer Congreso Internacional de la Sociedad Mesoamericana de Economía Ecológica. Sociedad Mesoamericana de Economía Ecológica-U. A. M. p. p 1-23.
- Ponce de León, C. E. (2008). Aspectos jurídicos y políticos de la conservación de páramos en el contexto subregional andino. En: Serrano, E. C. C. Memorias Panorama y Perspectivas sobre la Gestión Ambiental de los Ecosistemas del Páramo. Procuraduría General de la Nación. Imprenta Nacional de Colombia. Colombia. p. p. 34-51.
- Porta, J., López, A. M. y C. Roquero. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Ediciones Mundi-Prensa, 2ª ed. España. p. p. 256-257.
- Poulenard, J., Podwojewski, P. y J.L. Janeau. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45: 185-207.
- Prabagar, S., Hodson, M. J. y D. E. Evans. (2011). Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspensión cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Environmental and Experimental Botany*, 70: 226-276.
- Prado, B., Duwing, C., Hidalgo, C., Gómez, D., Yee, H., Prat, C., Esteves, M. y J. D. Etchevers. (2007). Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma*, 139: 300-313.
- Quantin, P., Dabin, B., Bouleau, A., Bondy, L. L. y D. Bidini, F. (1985). Characteristics and genesis of two andosols in central Italy. *Volcanic Soils Catena Supplement*. 7: 107-118.
- Ramírez, C. y Rodríguez, T. D. A. (2010). Resistencia a bajas temperaturas en *Pinus hartwegii* sometido a diferentes tratamientos con potasio. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16 (1): 79-85.
- Rangel, O. L. M., Trinidad, S. A. y D. Aguilar M. (1996). Efectos de algunos mejoradores sobre propiedades químicas de los andisoles. La investigación Edafológica en México. 1995-1996. Memorias XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Cd. Obregón, Son. p. p. 33.
- Rangel-Ch, J. O. (2008). La función natural de la alta montaña en Colombia: Servicios Ambientales. En: Serrano, E. C. C. Páez R. A., y A. L. Kolter. Memorias Panorama y Perspectivas sobre la Gestión Ambiental de los Ecosistemas del Páramo. Procuraduría General de la Nación. Imprenta Nacional de Colombia. Colombia. p. p. 23-25.
- Reynolds, W. D. y E. Elrick, D. (1990). Poned infiltration from a single ring: I. analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1233-1241.
- Ricker, M., Gutiérrez, G. G. y Daly, D. C. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Can J. For. Res.* 37: 977-989.
- Rivera-Hernández, J. E. y Espinosa-Henze, E. (2007). Flora y vegetación del Distrito Federal. En: Luna, I. J. J., Morrone y D. Espinosa. (eds.) Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. Ed. CONABIO. UNAM, FES Zaragoza-Instituto de Biología. México. p. p. 231-237.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Hernández H. C. y V. Ortega-Barranda. (2004). Ecología del fuego en bosques de *Pinus hartwegii*. En: Villers, R.L. y López, B. J. Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la atmósfera. U. N.A.M. México, p. p. 107-118.

- Rulli, M.C., Bozzi, S., Spada, M., Bocchiola, D., y Rosso, R. (2006). Rainfall simulations on a fire disturbed Mediterranean area. *Journal of Hydrology*, 327: 323-338.
- Ryder, M., Gérard, F., Evans, D. E. y M. J. Hodson. (2003). The use of root growth and modelling data to investigate amelioration of aluminium toxicity by silicon in *Picea abies* seedlings. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 97: 52-58.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Ed. Limusa, México.
- Sandoval, E. M., Castillo, S. C., Zagal, V. E., Stolpe, L. N. y P. Undurraga D. (2007). Parámetros hidráulicos determinados en un andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 7 (2): 32-45.
- Santander-González, M. (2004). Caracterización de materia orgánica por espectroscopia de infrarrojo (FT-IR) y su relación con Nitrógeno y Fósforo en suelo post-incendio de un bosque de oyamel. Tesis de Licenciatura. U. N. A. M. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. p. p. 111.
- Sarukán, J. y M. B. Franco. (1981). Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. Ed. *Subsria. For. y de la Fauna*. México. p. p. 72.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., y W. D. Broderson (eds). (2002). Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- SEMARNAT (2002). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. p.p. 85.
- Shing, C. J. y C. C. Yu. (2003). Characterization of soil organic matter in different particle-size fractions in humid subalpine soils by CP/MAS ¹³C NMR. *Geoderma*, 117: 129-141.
- Shoji, S., Nanzyo, M. y R. Dahlgren. (1993). Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Elsevier Science Publishers B. V. The Netherlands. P.p. 164-175.
- Siéwé, J. M., Djoufac, W. E., Bitom, D., Figueras, F., Djomgoué, P., Njopwouo, D. y A. Primus T. (2008). Andosols of the Bambouto Mountains (West Cameroon): Characteristics, Superficial Properties - Study of the Phosphate Ions Adsorption. *The Open Inorganic Chemistry Journal*, 2: 106-115.
- Sobieraj, J. A. (2003). Spatial patterns of saturated hydraulic conductivity and its controlling factors for forested soils. Doctor of Philosophy in: Environmental Science. Ohio, U. S. A.
- Soil Taxonomy. (2010). A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, D. C., United States.
- Stoops, G. (2007). Micromorphology of soils derived from volcanic ash in Europe: a review and synthesis. *European Journal of Soil Science*, 58: 356-377.
- Stoops, G. y Jongerius, A. (1975). A proposal for a micromorphological classification of soil materials. 1. A classification of the related distributions of fine and coarse particles. *Geoderma*, 13:189-199.
- Thoss, V., Shevtsova, A. y M. C. Nilsson. (2004). Environmental manipulation treatment effects on the reactivity of water-soluble phenolics in a subalpine tundra ecosystem. *Plant and Soil* 259: 355-365.
- Tivo, F. Y. y L. G. Iglesias A. (2003). Establecimiento de una metodología para análisis cromosómico de *Pinus hartwegii* Lindley. del Cofre de Perote. Cuadernos de biodiversidad, 13. p. p. 6-10.
- Torres, R. J. M. (2004). Informe nacional México. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. SEMARNAT-FAO. Roma. p. p. 86.
- Torres, R. J. M. y A. Guevara, S. (2002) El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, 063: 40-59.
- Touma, J., Voltz, M. y Albergel, J. (2007). Determining soil saturated hydraulic conductivity and sorptivity from single ring infiltration tests. *European Journal of Soil Science*, 58: 229-238.

- USDA (1995). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Soil survey laboratory information manual. Version No. 1.0. Soil Survey Investigations Report No. 45.
- USDA (2008). Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Indicators.
- Van der Hammen, T. (2008). El páramo: de la destrucción a la conservación. En: Serrano, E. C. C. Memorias Panorama y Perspectivas sobre la Gestión Ambiental de los Ecosistemas del Páramo. Procuraduría General de la Nación. Imprenta Nacional de Colombia. Colombia. p. p. 11-15.
- Van der Kamp, J., Yassir, I. y P. Buurman. (2009). Soil carbon changes upon secondary succession in Imperata grasslands (East Kalimantan, Indonesia). *Geoderma* 149:76-83.
- Van Ranst, E., Utami, S. R., Verdoodt, A. y N. P. Qafoku. (2008). Mineralogy of a perudic Andosol in central Java, Indonesia. *Geoderma*, 144: 379-386.
- Van Ranst, E., Utami, S.R., Shamshuddin, J. (2002). Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: physico-chemical properties and classification. *Soil Science*, 167 (1): 68-79.
- Van Reeuwijk, L. P. (1999). Procedures for Soil Analysis, 4th ed. *Tech. Pap.* Vol. 9. ISRIC. Wageningen, Netherlands.
- Veihe, A., Rey, J., Quinton, J. N., Strauss, P., Sancho, F. M. y M. Somarriba. (2001). Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. *Catena*, 44: 187-203.
- Velasco, M. H. A. (1983). Uso y manejo del suelo. Ed. Limusa. México, D. F. p. p. 81-184.
- Velásquez-Valle, M. A., Martínez-Menes, M. R., Bravo-Espinosa, M., Velázquez-García, J. de J., Potter, K. N., Tiscareño-López, M. (2006). Erosionabilidad acanalada de un andosol en dos sistemas de labranza en la Meseta Tarasca, Michoacán. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, 1: 119-123.
- Velázquez A. y F.J. Romero (eds). (1999). Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México bases para el ordenamiento ecológico. UAM-X-Secretaria del Medio Ambiente-CORENA, D. F. México. p. p. 40-48.
- Viveros-Viveros, H., Tapia-Olivares, B. L., Saénz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Santacruz-Varela, A. y G. Ramírez-Valverde. (2010). Variación isoenzimática de *Pinus hartwegii* Lindl. en un gradiente altitudinal en Michoacán, México. *Agrociencia*, 44: 723-733.
- Woods, S. W. y Balfour, V. (2001). Effect of vegetative ash on infiltration rates after forest wildfire in the Northern Rocky Mountain Region, U. S. A.
- World reference base for soil resources. WRB. (2006). 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Yatno, E. y S. Zauyahb. (2008). Properties and management implications of soils formed from volcanic materials in lembang area, West java. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 9 (2): 44-54.
- Zavala, L. M., González, F. A. y A. Jordán. (2009). Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*, 152: 361-374.