



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**ZARAGOZA**

**ECOHIDROLOGÍA DE UN BOSQUE DE OYAMEL:  
DIAGNÓSTICO Y REHABILITACIÓN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**B I Ó L O G A**

**PRESENTA**

**TANIA GONZÁLEZ VARGAS**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. EFRAÍN REYES ÁNGELES 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.

Seméjante a un relámpago, la idea brota absoluta, necesaria, sin dudas ni vacilación...

La ciencia no es más que muchas respuestas fáciles a preguntas difíciles...

Yo no recibí nada de lo que pedí, pero recibí todo lo que necesitaba...

Se puede albergar un sueño durante años y años, y convertirlo en realidad de repente...

## DEDICATORIA

A Dios, por dejarme vivir en este preciso momento y lugar. Por darme esta maravillosa oportunidad de superarme profesionalmente.

A mis padres: Graciela Vargas Pérez y Fernando González Flores, por haberme regalado el preciado regalo de la vida, por su tiempo, dedicación, empeño, para hacerme una mujer de bien; sin duda, todos sus esfuerzos se han vistos coronados con este triunfo, que si no es el último quizá sí es el más importante, y que también es suyo... Los amo!!!!

A mis hermanitos Brenda Luz y Alfredo David González Vargas .... Canijos!!! A pesar de que me hacen enojar, los quiero demasiado y son muy importantes para mí, espero mis éxitos les sirvan de ejemplo y mis fracasos les sirvan para no cometerlos, Confío mucho en ustedes y se que llegarán a donde quieran.

A Vicente López Bonilla, por ser como un padre para mi, por todos tus consejos, tu apoyo, tu tiempo, por todo lo que me haz dado y que ha sido de manera incondicional, no tengo como pagarte; más que con un sincero: GRACIAS!!.

A toda mi familia, por una palabra de apoyo, un gesto amable, una sonrisa, un comentario alentador... simplemente por estar ahí.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por dejarme ser parte de ti, tus ideales, esencia, pasión... siempre quedarán plasmadas en mi ser y mi corazón: Por mi raza hablará el espíritu.

A mi México lindo y querido porque, ante todos los problemas actuales, siempre serás un gran y hermoso país.

A ti....

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena, por su tiempo y dedicación, fue un verdadero honor trabajar con una mujer tan distinguida, preparada y profesional como lo es usted.

Al Dr. Efraín R. Ángeles Cervantes, por dejarme formar parte de su equipo de trabajo, por su confianza; es usted, desde el momento en que lo conocí, parte importante de mi formación profesional... pero, sobre todo quisiera hacer extensivos mis agradecimientos por su gran amistad y generosidad. Gracias, también por hacerme tener más confianza en mí misma, y demostrarme que las ideas se pueden convertir en grandes proyectos de vida, y por alentarme a llegar más y más lejos.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, por su gran calidad humana y profesional; por sus valiosos consejos y sugerencias en la mejora de este escrito. Fue un gran placer para mí, haber compartido el mismo laboratorio y dejarme aprender un poco más de usted.

Al M. en C. Ramiro Ríos Gómez, por sus valiosos consejos para la mejora de este escrito, por compartir un poco de su visión crítica, la cual sin duda fue muy importante para mi formación académica.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez, por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo y por sus consejos en el área personal, le aseguro los tomaré mucho en cuenta.

A la Biól. Diana Jiménez Cruz, por su preciosa, invaluable e incondicional amistad. MBF te agradezco por todos los maravillosos momentos que me dejaste pasar a tu lado. Dios me puso a la personita con más luz, para que estuviera ahí cuando más la necesitará: tu!!.

A la Biól. Cecilia de Dios Arcos, Biól. Sacnité Chavez Barrera; Biól. Mariana Zamudio Guevara, Ericka Rojas Monroy, Adriana Vallejo Fernández, Itzel Morales Sánchez; por ser mujeres extraordinarias, cada una de ustedes me brindo un regalo de vida, un momento divertido, un consejo, una palabra de aliento. Gracias por su maravillosa, bella y cálida amistad ... Las adoooo niñas!!!

Al Biól. Osvaldo Rodríguez Calderón, por aquellos momentos tan agradables y divertidos, por tu calidez, tus consejos y porque siempre tienes una sonrisa que arrancarme!!! te quiero mucho!!!; a Juan Poblano Olivares... brothercito!!! por tus consejos, tu apoyo en los momentos difíciles, en fin, gracias por tu fidedigna amistad y al Lic. en Diseño y Comunicación visual (y futuro biólogo) Jesús Salgado Vásquez, porque se que aunque no me lo digas, siempre estarás si es que un día te llevo a necesitar.

Al Biól y futuro M. en C. Enrique Suastegui Méndez, por todo tu apoyo y tiempo brindado, durante la realización de este trabajo. Al Biól. Manuel García Castro por compartir algunos momentos que fueron muy gratos.

A todos mis compañeros y amigos que me brindaron una sonrisa, un buen consejo, un gesto amable, y que hicieron un día, un instante más ameno: Blanca S., Diana (muñe), Dafne, Karina, Regina, Mariana L.G., Alejandro M, Diana G., Nadia, Hilda, Mariano, Paulina, Alejandro R., Janeth, Hilda, Mariano, Alejandro M., Regina, Luhma, Hector, Edgardo, Blanca Martínez y Brenda Bonilla

A mis amigos y compañeros de Laboratorio: Sandra, Marisol, Valeria, Elizabeth, Beyibet, Alma Bella, Jesús L., Anayeli, Juan y Ernesto por hacer más amena mi estancia.

Al Biól. Juan Valderrábano, Biól. José Luis Guzmán, M. en C. Jorge Gutiérrez, y a todos los profesores que formaron parte fundamental en mi desarrollo profesional.

Al Colegio de Postgraduados, y en particular al Laboratorio de Génesis y Clasificación de suelos por permitirme realizar parte de mis análisis químicos, en especial a Pedro por su cortesía durante mi estancia en el laboratorio, y a ti M. en C. Patricio Sánchez Guzmán, por todo tu tiempo y atención brindada hacia mi, por tu sencillez, calidad humana; en fin, por tu gran y valiosa amistad. Eres un ser humano excepcional.

Al futuro M. en C. Daniel Arias Cervantes, por todo lo que me brindaste, eres un excelente ser humano, ojala me consideres cuando necesites de alguien, es lo menos que puedo hacer por ti.

Al futuro Dr. en I. Jesús Israel Barraza Fierro, por tus consejos académicos, por aquellos amenos instantes que pasamos; y por cierto, también por la presión para que terminara este trabajo.

A los futuros M. en C.: Q.B.P Adriana Posadas Beltrán, Laura Mondragón Mora, así como, al Biól. Fidel Armendariz Galván, por todos los valiosos conocimientos y consejos brindados durante mi estancia en el Instituto Mexicano del Petróleo; pero, también quiero agradecerles su linda amistad.

A todos los que me apoyaron en las salidas a campo e hicieron posible la realización de este trabajo.

A la familia Ruíz por haberme mostrado ese gran regalo de Dios, de vida; siempre les estaré muy agradecida...

Finalmente, a todas aquellas personas que se cruzaron en mi camino y que me aportaron o regalaron algo, a veces sin darse cuenta...

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Antecedentes.....	3
2.1 Andosoles y el servicio ambiental hidrológico.....	3
2.2 Propiedades hídricas del suelo.....	4
2.3 Propiedades químicas.....	8
2.4 Propiedades mineralógicas.....	12
2.5 Micromorfología de suelos.....	12
2.6 Problemática.....	14
3. Objetivo General.....	15
3.1 Objetivos particulares.....	15
4. Materiales y métodos.....	16
4.1 Zona de estudio.....	17
4.2 Características de <i>Abies religiosa</i> (H.B.K) Cham <i>et</i> Schelecht.....	18
4.3 Selección de la zona de muestreo.....	18
4.4 Diagnóstico de suelo.....	18
4.5 Aplicación de tratamientos.....	19
4.6 Efecto de la aplicación de hidróxidos sobre:	
4.6.1 Biomasa de yemas de renuevo.....	21
4.6.2 Propiedades hídricas del suelo.....	21
4.6.3 Propiedades químicas del suelo.....	26
4.6.4 Mineralogía del suelo.....	28
4.6.5 Micromorfología del suelo.....	28
4.7 Análisis estadístico.....	29

5. Resultados	
5.1 Diagnóstico de las propiedades hídricas.....	29
5.2 Diagnóstico de las propiedades químicas.....	31
5.3 Requerimientos de alcalinizante y efecto de hidróxidos sobre el pH del suelo..	36
5.4 Efecto de la aplicación de hidróxidos sobre las propiedades hídrica.....	38
5.5 Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas.....	43
5.6 Efecto de la adición de hidróxidos sobre la mineralogía del suelo.....	51
5.7 Efecto de la adición de hidróxidos sobre la micromorfología del suelo.....	56
5.8 Efecto de la adición de hidróxidos sobre la biomasa de yemas de renuevo.....	61
6. Discusión general.....	63
7. Conclusiones generales.....	64
8. Sugerencias.....	65
9. Literatura citada.....	66



## CUADROS

	<b>Página</b>
1. Intervalo de Kfs propuesta por Shoeneberger <i>et al.</i> (2002).....	5
2. Intervalos de acidez por tipo de Andosol según Shoji <i>et al.</i> (1993).....	9
3. Clasificación de la acidez del suelo de acuerdo a la NOM-021-RECNAT, 2000.....	9
4. Clasificación de acidez del suelo propuesta por Shoeneberger <i>et al.</i> (2002).....	10
5. Categorías de medios porosos para la ecuación de Richards.....	23
6. Diagnóstico de las propiedades hídras de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	35
7. Diagnóstico de las propiedades químicas de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	35
8. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídras de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	40
9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	48
10. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la Micromorfología de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	58

## FIGURAS

	<b>Página</b>
1. Ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	16
2. Individuo de <i>Abies religiosa</i> en condiciones de bajo desarrollo y crecimiento.....	20
3. Escala del factor C en función de h/a en la ecuación de Richards.....	24
4. Efecto de la adición de hidróxidos sobre el pH de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	37
5. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídras de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	41
6. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	49
7. Efecto de la adición de KOH [35 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	53
8. Efecto de la adición de Al(OH) <sub>3</sub> [35 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	54
9. Efecto de la adición de Ca(OH) <sub>2</sub> [20 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	55



## RESUMEN

En el Parque Nacional Desierto de los Leones (PNDDL), se presentan zonas con mortalidad masiva y bajo crecimiento de individuos de *Abies religiosa*. Los suelos donde se desarrolla este tipo de vegetación son Andosoles, uno de los más productivos a nivel internacional; estos se caracterizan por presentar alto contenido de minerales amorfos, como alófono e imogolita; altos valores de porosidad, infiltración, conductividad hidráulica saturada (Kfs), retención de humedad y una baja densidad aparente. Sin embargo, cuando los Andosoles son expuestos a deshidratación directa al sol por efecto de tala, o bien por la ocurrencia de un incendio forestal; se ven afectadas varias de sus propiedades hídricas; además, este tipo de suelos poseen un carácter ácido. Este trabajo tuvo como objetivo diagnosticar las propiedades hídricas y químicas de Andosoles, para determinar qué tipo de hidróxido puede ser utilizado para mejorar estas propiedades y favorecer el crecimiento de *A. religiosa*. Se localizó una zona dentro del PNDDL, con individuos de bajo desarrollo, y en este sitio se ubicaron 45 individuos, en los cuales se adicionaron KOH, Al(OH)<sub>3</sub> [25, 30 y 35 ppm] y Ca(OH)<sub>2</sub> [10 ppm]. En la parte media de la época de crecimiento y al final de la época seca, se recolectaron dos yemas apicales de cada individuo, a las que se les determinó su biomasa seca. Asimismo, se tomaron muestras inalteradas en su estructura, en las que se evaluó el efecto de la adición de hidróxidos sobre la porosidad y microestructura y, además, se realizaron análisis mineralógicos. Los resultados mostraron que el pH del suelo fue de 5.84 valor que, se cataloga como moderadamente ácido; también se presentó baja fertilidad de los suelos, probablemente provocada por la ocurrencia de un incendio superficial, el cual fija los nutrientes, haciéndolos menos disponibles para las plantas. Después de la adición de KOH [25 ppm], se incrementó significativamente el contenido de humedad del suelo. En tanto, la adición de Al(OH)<sub>3</sub> [25 ppm], aumentó la porosidad y se formaron poros de empaquetamiento compuesto; además, se incrementó la concentración de N total, y K<sup>+</sup>, lo que triplicó la producción de biomasa de yemas apicales en *A. religiosa*. Finalmente, no se detectaron cambios a nivel mineralógico, con la adición de estos tratamientos. La adición de hidróxidos representa una opción viable para aumentar el contenido de humedad en el suelo, lo que permitiría elevar el porcentaje de sobrevivencia de individuos plantados en las reforestaciones.

**Palabras clave:** Andosoles, propiedades hídricas, *Abies religiosa*, hidróxidos.



## 1. INTRODUCCIÓN

La ecohidrología es una disciplina que considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota; los cuales son enfocados al manejo integrado del ecosistema (Diez-Hernández, 2008). Los estudios que vinculan el flujo hidrológico entre los bosques, el suelo y su servicio ambiental en la recarga de acuíferos, están ubicados en este campo.

El servicio ambiental hidrológico que ofrecen los bosques, depende de las propiedades hídricas del suelo, entre las que destacan la infiltración, conductividad hidráulica, la retención de humedad, y densidad aparente. Estas propiedades presentan relación con la vitalidad del arbolado (Van der Salm *et al.*, 2007).

Los bosques de oyamel (*Abies religiosa* Schlecthl. *et* Cham.) son endémicos de la Faja Volcánica Transmexicana y se desarrollan sobre Andosoles, los cuales se sitúan entre los más productivos en el mundo (Nanzoyo, 2002). Su alta productividad se debe al contenido de alófono e imogolita, minerales pobremente cristalizados, con una alta área superficial específica, espacio poroso y de carga variable, lo que confiere una alta capacidad de retención de humedad y por tanto, una alta cantidad de agua disponible. Además, el suministro de nutrimentos es alto, debido a la rápida intemperización de cenizas volcánicas residuales (Harsh *et al.*, 2002).

Cuando los Andosoles son expuestos a deshidratación por exposición directa al sol o por incendios, la estructura mineral se altera y se reducen de manera irreversible las propiedades hídricas, disminuye la disponibilidad de agua para la vegetación incidiendo en su desarrollo y mortalidad, además disminuye la recarga de mantos acuíferos (Ángeles-Cervantes, 2010). Otro problema es que los suelos forestales de estas regiones generalmente son ácidos y una alternativa para mejorar la acidez es el encalado con hidróxidos (Carter *et al.*, 2009).

En el Parque Nacional (PN) Desierto de los Leones los suelos son de tipo Andosol, existen bosques de oyamel con zonas de arbolado muerto y otras zonas presentan árboles con limitaciones de crecimiento, por lo que es necesario realizar un diagnóstico de la acidez del suelo, de sus propiedades hídricas y evaluar el efecto de la adición de hidróxidos, sobre su pH



y el desarrollo de yemas apicales de *Abies religiosa*. Los resultados permitirán proponer una alternativa para la rehabilitación de las propiedades hídricas del suelo, en esta zona importante en la recarga de acuíferos del D.F. y por lo tanto del servicio ambiental hidrológico del bosque de oyamel.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Andosoles y el servicio ambiental hidrológico

Los Andosoles presentan minerales hidratados, alófano e imogolita, que forman complejos y por su forma tubular, genera un gran espacio poroso, por lo que poseen altos valores de infiltración, conductividad hidráulica, retención de humedad y por tanto la captura de agua y el servicio ambiental hidrológico (Nanzyo, 2002). Por lo anterior, los bosques y praderas de alta montaña de la Franja Volcánica Transmexicana se han considerado como zonas de recarga de acuíferos. En México la superficie total reportada para Andosoles es de 83 730 km<sup>2</sup> (Oleschko y Chapa 1989); en tanto que para la Faja Volcánica Transmexicana, se reporta una superficie de 971.93 km<sup>2</sup> de acuerdo con García *et al.* (2007).

Sin embargo, se ha encontrado que los Andosoles pierden sus propiedades hídricas de manera irreversible si se desecan cuando el suelo es expuesto a la superficie (Oleschko y Chapa, 1989; Wada, 1989). De acuerdo con Harsh *et al.* (2002) los suelos alofánicos son también sensibles al cambio de estructura después de un disturbio.

En estudios recientes se ha demostrado que existe una relación entre el bajo desarrollo, la supervivencia de arbolado y las propiedades hídricas del suelo. Castro-Alonso (2009), indica que el bajo crecimiento de árboles de *Pinus* ocurre en zonas con una baja conductividad hidráulica, en Andosoles del Parque Nacional Izta-Popo. Además, Ángeles-Cervantes (2010) registró un menor desarrollo y supervivencia de *Abies religiosa* en sitios afectados por incendio superficial, porosidad menor a 30%, bajas tasas de infiltración y conductividad hidráulica, y dominancia de minerales deshidratados.



El conocimiento de la relación que guardan los ecosistemas de montañas, con los recursos hídricos (ríos, lagos, acuíferos), es necesario para lograr los fines de conservación biológica y mantenimiento de especies (Vance Borland *et al.*, 2008).

Los servicios ambientales son el conjunto de condiciones y procesos naturales que la sociedad puede utilizar y que ofrecen las áreas naturales por su simple existencia: la producción de madera y leña, plantas medicinales, densidad faunística, captura de carbono, captura y almacén de agua a través de la infiltración y recarga de acuíferos (Torres, 2004).

La captura de agua o desempeño hidráulico es el servicio ambiental que producen las áreas arboladas al impedir el rápido escurrimiento del agua de lluvia precipitada, propiciando su infiltración que alimenta los mantos acuíferos y alargando la duración del ciclo del agua (Torres, 2004).

## **2.2 Propiedades hídricas del suelo**

Son aquellas que determinan la capacidad del suelo para transmitir, conducir y almacenar agua. Las propiedades hídricas del suelo que son responsables del flujo hídrico pluvial hacia los mantos acuíferos son la conductividad hidráulica saturada (Kfs), la tasa de infiltración, el tamaño y distribución de poros, la densidad aparente y retención de humedad (Lipiec *et al.*, 2009), las cuales son sensibles a los disturbios que afectan el suelo superficial (Ziegler *et al.*, 2006).

***Infiltración.*** Es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Por su parte, la capacidad de infiltración es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora. La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi constante a medida que la precipitación se prolonga y es entonces cuando empieza el escurrimiento (Maderey, 2005).

La infiltración varía de acuerdo con el tipo de suelo y vegetación; por ejemplo, Harden y Scruggs (2003) determinaron infiltración en un bosque mixto en las montañas Apalaches encontrando un rango de infiltración de 16 a 117 mm h<sup>-1</sup>, y además, indican que hay que tener precaución en la extrapolación de la velocidad de infiltración. En tanto, en los Andes



Ecuatorianos Zehetner y Miller (2006) determinaron una infiltración de  $56.9 \text{ mm h}^{-1}$  y en el Parque Nacional el Chico, en Hidalgo, México; Ángeles-Cervantes (2010) encontró una tasa de infiltración de  $173.55 \text{ mm h}^{-1}$  en un bosque de oyamel.

**Conductividad Hidráulica Saturada (Kfs).** Es la medición de la capacidad de un suelo para conducir agua y se utiliza para determinar la velocidad de su movimiento a través de un suelo bajo condiciones saturadas de campo. Schoeneberger *et al.* (2002) recomiendan realizar cuando menos tres repeticiones con algún Permeámetro. El permeámetro Gelfh es uno de los aparatos utilizado para determinar, infiltración, la conductividad hidráulica saturada en campo (Kfs) y el potencial de flujo mátrico  $\Phi_m$  (potencial mátrico) para un suelo en particular. De acuerdo al valor de Kfs, se puede asignar las siguientes categorías:

Cuadro 1. Intervalo de Kfs de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002).

<b>Kfs</b>	<b>Criterio estimado en <math>\text{mm hr}^{-1}</math></b>
<b>Muy baja</b>	Menor a 0.036
<b>Baja</b>	0.036 a 0.36
<b>Moderadamente baja</b>	0.36 a 3.6
<b>Moderadamente alta</b>	3.6 a 36
<b>Alta</b>	36 a 360
<b>Muy alta</b>	Mayor a 360

En Andosoles, existe un intervalo de la variación en la Kfs, de  $13.4$  a  $168 \text{ mm h}^{-1}$ . Rodríguez *et al.* (2002), determinaron una Kfs de  $168 \text{ mm h}^{-1}$  para las Islas Canarias, España; en tanto que Fontes *et al.* (2004), obtuvieron por medio de ecuaciones, valores de Kfs de  $42.9 \text{ mm h}^{-1}$  y  $62.5 \text{ mm h}^{-1}$ , en las islas Azores. En los páramos ecuatorianos, Poulenard *et al.* (2001) registraron una Kfs de  $60$  y  $70 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que Buytaert *et al.* (2005) estimaron una Kfs de  $13.4 \text{ mm h}^{-1}$ .



En Andosoles de México, existe un intervalo en la Kfs de 24 a 3276 mm h<sup>-1</sup> conforme a los siguientes autores: Bravo *et al.* (2006) indicaron un intervalo general de Kfs de 24 a 90 mm h<sup>-1</sup>; sin embargo, Castro-Alonso (2009) obtuvo una Kfs de 3276 mm h<sup>-1</sup> y Ángeles-Cervantes (2010) registró una Kfs de 176.4 mm h<sup>-1</sup> bajo bosques de oyamel. La variación de la Kfs entre los diferentes autores, puede deberse a la heterogeneidad de los suelos (Gómez-Tagle, 2008).

Por otra parte, la conductividad hidráulica se incrementa con el pH, pero depende del tipo de ácido. Al respecto Ishiguro y Nakajima (2000) en un Andosol alofánico encontraron un valor de Ks de 61.2 mm h<sup>-1</sup> con la adición de una solución de HNO<sub>3</sub> a pH 3 y, la adición de HNO<sub>3</sub> a pH 4, aumenta la Ks a 270 mm h<sup>-1</sup>; es decir, si el pH se incrementa también lo hace el valor de Kfs; comportamiento que no ocurre con la adición de soluciones similares de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pues a pH 3 se registró una Ks de 39.6 mm h<sup>-1</sup> y a pH 4 fue de 24.84 mm h<sup>-1</sup>.

Estos autores, proponen que la adición de los iones NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aumentan la fuerza de repulsión y junto con el ión Al<sup>3+</sup>, que está altamente disponible a esos pH, forman complejos e inducen floculación, lo que reduce el movimiento del agua y por lo tanto la Kfs e infiltración. No obstante, para el caso del ión SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, esta tendencia no se cumple. Además, Nakagawa e Ishiguro (1994) encuentran que la Kfs disminuye con HCl a pH 3 y también con NaOH a pH 11, debido a la dispersión de arcillas.

**Potencial de flujo mátrico ( $\Phi_m$ ).** Es la medida de la capacidad de un suelo para almacenar agua, por fuerza de capilaridad, a través de una sección longitudinal en una unidad de tiempo. Castro-Alonso (2009) registró en el Parque Nacional Izta-Popo bajo un bosque afectado por incendio, un flujo de potencial mátrico de 0.245232 cm<sup>2</sup> seg<sup>-1</sup> y en un bosque no afectado por incendio un valor de 0.2177 cm<sup>2</sup> seg<sup>-1</sup>.

**Densidad aparente ( $D_a$ ).** Es definida como la relación de la masa de suelo y el volumen total o sea el volumen de partículas más el espacio entre ellas ( $D_a=ms/Vt$ ). La  $D_a$  se utiliza principalmente para calcular la porosidad total del suelo y por ende en estudios de relación suelo-agua, aunque también se emplea para la interpretación de análisis de laboratorio para el campo (Forsythe y Díaz-Romeu, 1969).





La densidad aparente puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo. Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre la densidad aparente y la porosidad total.

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido a la influencia que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar, y la porosidad del suelo a disminuir; con estos cambios se limita el crecimiento de las raíces a valores críticos (Ingaramo *et al.*, 2003).

Kleber *et al.* (2004) determinaron la densidad aparente de dos sitios, en Andosoles de Alemania, mediante la correlación del peso seco de  $100 \text{ cm}^3$  y su volumen de muestras inalterada y, encontraron valores de  $0.5 \text{ g/cm}^3$  y de  $0.8 \text{ g/cm}^3$ . Fontes *et al.* (2004) estimaron una densidad de  $0.74 \text{ g/cm}^3$  en Azores, España. Por otra parte, Alvarado y Forsythe (2005) registraron una densidad aparente promedio de  $0.87 \text{ g/cm}^3$  para Andosoles de Costa Rica, valor que, se encuentra dentro del intervalo requerido para su clasificación.

En México, Meza-Pérez y Geissert-Kientz (2006), indicaron una DA de  $0.7 \text{ g/cm}^3$  para una zona de uso forestal en el Volcán Cofre de Perote, Veracruz; en tanto, Bravo *et al.* (2006) determinaron una DA de  $0.89 \text{ g/cm}^3$  en Michoacán y, por su parte, Ángeles-Cervantes (2010) registró una DA de  $0.65 \text{ g/cm}^3$  en Andosoles del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

**Porosidad.** Una modificación de los patrones de la porosidad, distribución de tamaños y abundancia de poros influye en la tasa de infiltración del agua. Los macroporos son fundamentales en la determinación de la velocidad de la conducción del agua. Una reducción de poros es particularmente importante en los principales fenómenos del crecimiento de las plantas, tal como la facilidad de la penetración de las raíces, almacenamiento de agua y gases, etc., que dependen de la forma, tamaño y distribución de poros.

La captación de nutrimentos para las raíces necesita poros que van de  $100$  a  $200 \mu\text{m}$ ; poros con un diámetro de  $0.5$  a  $50 \mu\text{m}$  son poros de almacenamiento, los cuales son reservorio de agua para plantas y microorganismos; mientras que los poros de  $50$  a  $500 \mu\text{m}$  son poros de transmisión (poros elongados y continuos) y son considerados los más importantes en la relación suelo-agua-planta y en el mantenimiento de una buena estructura del suelo. Daños en



la estructura del suelo pueden ser reconocidos por la disminución en la proporción del espacio poroso particularmente de los poros de transmisión (Panini *et al.*, 1997).

En los estudios de porosidad generalmente se realizan de manera indirecta, a través de modelos y de ecuaciones basados en la densidad aparente (Kay y VandenBygaart, 2002) y otros métodos como el utilizado por Barral *et al.* (1998) denominado método de porosimetría por intrusión de mercurio en donde determinaron una porosidad de 45 a 47%.

Meza-Pérez y Geissert Kientz (2006) encontraron una porosidad de 65% en suelos de uso forestal, en el Cofre de Perote. Ángeles-Cervantes (2010) realizó estudios micromorfológicos en el Parque Nacional el Chico y encontró agregados en bloques subangulares y poros tipo fisura, con algunos agregados oscuros y restos vegetales de incendios anteriores. Obtuvo un porcentaje de porosidad total de 35.08%.

### 2.3 Propiedades químicas del suelo

Los indicadores químicos son usados en su mayoría en el contexto de las relaciones nutrimentales de los vegetales y son indicadores de su desarrollo (Schoenholtz *et al.*, 2000).

**pH.** El potencial de hidrógeno (pH) se mide en una solución del suelo y agua, con lo que se mide la acidez activa, pero cabe señalar que en los suelos también existe una reserva de acidez intercambiable (o potencial), lo que en suma proporciona la acidez total de un suelo. La mayor parte de los suelos forestales tienen una reserva sustancial de acidez potencial; van de moderada a extremadamente ácidos como resultado de la liberación de ácidos orgánicos, durante la descomposición del mantillo y la consiguiente lixiviación de las bases del suelo mineral superficial. Además, es el parámetro químico que determina la disponibilidad de nutrimentos (Pritchett, 1986).

En tanto, la determinación del pH con KCl permite conocer la acidez total del suelo, al extraer los iones  $Al^{3+}$  los cuales contribuyen a aumentar la acidez. Los valores de pH con agua y con KCl de los tres grupos de Andosoles se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Intervalos de acidez por tipo de Andosol según Shoji *et al.* (1993)

<b>Tipo de Andosoles</b>	<b>pH (KCl)</b>	<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>
<b>Grupo 1: Alofánicos, pobres en humus</b>	5.0-5.6	5.2-6.0
<b>Grupo 2: No alofánicos</b>	3.8-4.4	4.8-5.3
<b>Grupo 3: Alofánicos ricos en humus</b>	4.3-5.0	5.0-5.7

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana 021-RECNAT, 2000 los niveles de acidez para suelos se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de la acidez del suelo de acuerdo a la NOM-021-RECNAT, 2000.

<b>Clasificación</b>	<b>pH</b>
<b>Fuertemente ácido</b>	< 5.0
<b>Moderadamente ácido</b>	5.1-6.5
<b>Neutro</b>	6.6-7.3
<b>Medianamente alcalino</b>	7.4-8.5
<b>Fuertemente alcalino</b>	>8.5

Además, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, presenta otra escala, como se observa en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Clasificación de acidez del suelo propuesta por Shoeneberger *et al.* (2002).

<b>Termino descriptivo</b>	<b>Intervalo de pH</b>
<b>Ultra ácido</b>	< 3.5
<b>Extremadamente ácido</b>	3.5 a 4.4
<b>Muy fuertemente ácido</b>	4.5 a 5.0
<b>Fuertemente ácido</b>	5.1 a 5.5
<b>Moderadamente ácido</b>	5.6 a 6.0
<b>Ligeramente ácido</b>	6.1 a 6.5
<b>Neutral</b>	6.6 a 7.3
<b>Ligeramente alcalino</b>	7.4 a 7.8
<b>Moderadamente alcalino</b>	7.9 a 8.4
<b>Fuertemente alcalino</b>	8.5 a 9.0
<b>Muy fuertemente alcalino</b>	> 9.0

**pH con NaF.** Esta variable se utiliza para evaluar la presencia de minerales de rango corto. La acción de NaF en estos minerales provoca la liberación de iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) en la solución del suelo e incrementa el pH (Soil Survey Staff, 1999).

Song e Ishiguro (1992) registraron en Japón un pH real de 5.62 y un pH potencial de 5.56. En la Isla Guadalupe Ndayiragije y Delvaux (2003), determinaron un pH real y potencial de 5.4 y 5.1 respectivamente; en Islandia Gudmundsson *et al.* (2004), reportaron un pH real de 6.3. Van Ranst *et al.* (2008) estimaron un pH real de 4.5; pH potencial de 4.4 y pH medido en NaF de 11.9; en Andosoles de Indonesia.

Para Andosoles en México, Romero-Carmona (1986) para el Parque Nacional Desierto de los Leones, determina un pH de 5. Campos *et al.* (2001) obtuvieron valores de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  de 4.8-5.5 y un  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  de 10.37- 11.26, para el cofre de Perote. En tanto, Bravo *et al.* (2006)



reportaron un pH de 6.4 en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, y por su parte Ángeles-Cervantes (2010) para el Parque Nacional El Chico, Hidalgo estimó un pH de 5.3.

**Materia orgánica.** Kleber *et al.* (2004) indicó un intervalo de MO de 7.46 a 19.6% para dos sitios de Alemania. Ángeles-Cervantes (2010) registró para Andosoles, bajo bosques de oyamel del PN El Chico, Hidalgo, un porcentaje de materia orgánica de 27.32; asimismo, Domínguez-Bernal (2011) estimó para del Parque Nacional Izta-Popo, un porcentaje de materia orgánica de 5.7.

**Nitrógeno.** Para dos localidades de Alemania Kleber *et al.* (2004), determinaron un porcentaje de nitrógeno de 0.45-0.61; Gudmundsson *et al.* (2004) registraron 0.87% de nitrógeno en Islandia. En México, Romero-Carmona (1986) estimó un porcentaje para el PNDDL de 0.826; López-López (2010) estimó para bosques de *A. religiosa* un porcentaje de 0.61; en tanto Ángeles-Cervantes (2010) en el P.N. El Chico citó un porcentaje de 0.77.

**Fósforo.** Para Andosoles de las Islas Canarias, España; Arbelo *et al.* (2002) determinaron concentraciones de 11.6 ppm. En Andosoles de México, Romero-Carmona (1986) en el PNDDL registró una concentración de 356 mg kg<sup>-1</sup>; Campos *et al.* (2001) para el P.N. Cofre de Perote determinaron una concentración de 5-7 mg kg<sup>-1</sup>; López-López (2010) una concentración de 69 mg kg<sup>-1</sup> bajo bosques de *A. religiosa*; Ángeles-Cervantes (2010) para el P.N el Chico registra una concentración de 3.66 mg kg<sup>-1</sup>.

**Cationes.** En Andosoles de Japón Song e Ishiguro (1992), determinaron estos parámetros, obteniendo para Ca 1.43 cmol kg<sup>-1</sup>; para Mg 2.96 cmol kg<sup>-1</sup>; para K 0.18 cmol kg<sup>-1</sup> y para Na 0.28 cmol kg<sup>-1</sup>. Kleber *et al.* (2004) registraron para Andosoles de Alemania, concentraciones de 4.1-10 cmol kg<sup>-1</sup>; 1.6-4.4 cmol kg<sup>-1</sup>; 0.1-0.4 cmol kg<sup>-1</sup> y 0.1-0.4 cmol kg<sup>-1</sup> para Ca, Mg, K y Na respectivamente.

Por su parte, Romero-Carmona (1986) en el PNDDL registró para Ca un valor de 4.95 cmol kg<sup>-1</sup>, para el Mg de 0.46 cmol kg<sup>-1</sup>, para K de 0.20 cmol kg<sup>-1</sup> y 0.06 cmol kg<sup>-1</sup> para Na.



Para el Parque Nacional el Chico, Ángeles-Cervantes (2010) determinó para Ca, Mg y K, valores de  $16.68 \text{ cmol kg}^{-1}$ ;  $3.16 \text{ cmol kg}^{-1}$ ;  $0.01 \text{ cmol kg}^{-1}$  respectivamente.

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000; los valores registrados por Romero-Carmona (1986) para Ca son catalogados como altos, para el Mg muy bajos y en el caso de K se reporta como bajos, lo que puede indicar un déficit en los nutrimentos. En cambio, en el caso de nitrógeno (0.826%) y fósforo ( $356 \text{ mg kg}^{-1}$ ) los valores obtenidos se califican como altos de acuerdo a la misma norma.

## 2.4 Propiedades mineralógicas de Andosoles

La mineralogía de Andosoles es responsable de sus propiedades físicas y químicas únicas. Los principales minerales son alofano, imogolita y arcillas aluminosilicatadas cristalinas. Todos los tipos de minerales arcillosos pueden ser localizados en Andisoles, pero aquellos de gran interés son alofano, imogolita e hidróxidos de hierro pobremente cristalizados (ferrihidrita) debido a que confieren propiedades ándicas (Shoji *et al.*, 1993; Kimble *et al.*, 2002).

Van Ranst *et al.* (2008), detectaron en Andosoles perúricos minerales arcillosos referentes a esmectitas, cloritas de aluminio, cristobalita, pirofilitas y caolinitas, además de pequeñas cantidades de gibsita; en tanto, en la fracción limosa y arenosa se determinaron minerales como piroxenos y plagioclasas. Para Andosoles de Alemania, Kleber *et al.* (2004) reconocieron minerales correspondientes a alofano, gibsita y opalina silíceas. Para Andosoles de México, Prado *et al.* (2007), registraron principalmente la presencia de cristobalita, plagioclasas cuarzo y hornablenda y, en la fracción arcillosa, halloisitas y gibsita asociadas con hierro.

**Micromorfología de suelos.** La micromorfología es una rama de la edafología que se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes, rasgos y el arreglo de los constituyentes (fábrica) de los suelos a un nivel microscópico.

El lado descriptivo de la micromorfología es indispensable por varias razones: (i) para registrar con detalle las características de los suelos ya sea a nivel de un grano de cuarzo, de un arreglo estructural o de un rasgo debido a un proceso en particular; (ii) para establecer las bases en la reconstrucción de los procesos que han ocurrido o que se están desarrollando en los



suelos; (iii) para proporcionar bases sólidas en la clasificación de los suelos ya sea con propósitos generales o específicos; (iv) para comparar las propiedades de diferentes suelos dentro de un orden, un suborden o un gran grupo o aun a niveles inferiores del sistema de clasificación tales como las series de suelos y (v) para apoyar a otros análisis y para escoger de manera selectiva a los análisis mineralógicos, químicos y físicos, que deban realizarse (Bullock *et al.*, 2004).

La micromorfología de suelos ofrece datos exactos *in situ* de la zona de estudio, a través de muestras inalteradas y resulta muy útil para observar y valorar el grado de perturbación o efectos ecológicos sobre un sitio en particular.

Los Andosoles generalmente tienen una estructura granular en el horizonte A debido a perturbaciones causadas por raíces y a la fauna del suelo; mientras que la estructura en el horizonte Bw es generalmente débil y de bloques subangulares (Kimble *et al.*, 2002).

Los estudios sobre porosidad y micromorfología en Andosoles, a nivel internacional son escasos. Al respecto Stoops (2007) realizó una compilación de datos para Europa y menciona que para España Bech-Borras *et al.* (1977) describen dos Andosoles con una microestructura combinada con granular (400 mm) a granular fina (30-40  $\mu\text{m}$ ). Los agregados grandes son formados por una aglomeración de los agregados finos. La unión se supone, es causada por la materia orgánica monomórfica. Stoops y Gerard (2007) señalaron que la Meseta Central de Europa, está caracterizada por una microestructura granular y tienden a presentarse bloques angulares en el horizonte Bw. Para Andosoles de México, Prado *et al.* (2007) determinaron bloques subangulares en la parte superficial del suelo en el Valle de Bravo.



## 2.5 Problemática

En los bosques del Parque Nacional Desierto de los Leones, se ha observado declinación forestal o zonas con mortalidad masiva de arbolado adulto.

Existe una controversia sobre la causa de dicha mortalidad. Romero-Carmona (1986), no registró una falta de nutrimentos en el suelo; Alvarado-Rosales (1989) y Saavedra-Romero (2001) consideran que se debe a la exposición a los vientos contaminados procedentes de la Ciudad de México. No obstante, un estudio reciente llevado a cabo por Castro-Barrales *et al.* (2007) han concluido que el decline forestal no es una consecuencia directa de la contaminación atmosférica.

Otros autores consideran que el decline forestal puede estar ocasionado por la ocurrencia de incendios forestales superficiales. Al respecto, Conard y Gallina (1997) en la URSS han observado la extensiva mortalidad después de un incendio forestal. En tanto Ikkonen *et al.* (2004) en el Parque Nacional el Chico, Hidalgo, registraron una disminución de la actividad biológica en el suelo; y Ángeles-Cervantes (2010) encontró compactación y reducción de los valores de las propiedades hídricas del suelo, relacionadas con la baja supervivencia y desarrollo de plántulas de oyamel, por lo que se puede inferir que los incendios superficiales afectan las propiedades hídricas y micromorfológicas, y ocasionan un escaso desarrollo de los árboles.

Por lo anterior, en este trabajo se propone la hipótesis de que en el Parque Nacional Desierto de los Leones, ocurrieron incendios forestales superficiales, provocando compactación y generación de capas hidrófobas, lo que afectó negativamente las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas.

La compactación de la estructura edáfica se ha tratado de solucionar con la adición de agentes agregantes tales como los hidróxidos metálicos. En experimentos de laboratorio Breuer y Schwertmann (1999) adicionaron  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{Fe}_2(\text{OH})_3$  (0.325 g de Al y 0.05 g de Fe, respectivamente) a un suelo compactado y se formaron agregados y devolvió la estructura al suelo. También se plantea la hipótesis de que la adición de hidróxidos puede ser una alternativa para la rehabilitación de estos suelos, al mejorar sus propiedades hídricas y el crecimiento de las especies arbóreas. Sin embargo, debido a la variabilidad de la composición





mineralógica de los Andosoles hace necesaria la adición de varios tipos de hidróxidos, por lo anterior este trabajo tiene los siguientes objetivos:

### **3. Objetivo general**

Evaluar las propiedades hídricas del suelo en un bosque de oyamel y proponer una estrategia de rehabilitación, a través de la adición de minerales que favorezcan las propiedades hídricas del suelo, el servicio ambiental hidrológico y el crecimiento de *Abies religiosa*.

#### **3.1 Objetivos particulares**

- a) Valorar las propiedades hídricas (Kfs, infiltración, potencial de flujo mátrico,) y químicas (pH, nutrimentos) del suelo en una zona con mortalidad arbórea en el Parque Nacional Desierto de los Leones D.F.
- b) Estimar la acidez total del suelo y el efecto alcalinizante de los hidróxidos de Aluminio, Calcio, Potasio y Magnesio sobre el pH.
- c) Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídricas y químicas del suelo.
- d) Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos sobre la mineralogía del suelo.
- e) Determinar el efecto de la adición de hidróxidos sobre la microestructura del suelo.
- f) Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos sobre la biomasa seca de yemas apicales de *Abies religiosa*.

#### 4. Materiales y Métodos

**4.1 Zona de estudio.** El Parque Nacional Desierto de los Leones se ubica dentro de la Región Mesoamericana de Montaña, formando parte de la provincia florística de las serranías meridionales, a la cual se adscribe la Faja Volcánica Transmexicana. Se encuentra dentro de las Coordenadas geográficas 19°18'5.1" y 99°18'55.1" y presenta un intervalo de altitud que va de los 2700 a los 3790 m.s.n.m. El parque se ubica al poniente de la Ciudad de México, dentro de las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos, en el Distrito Federal.

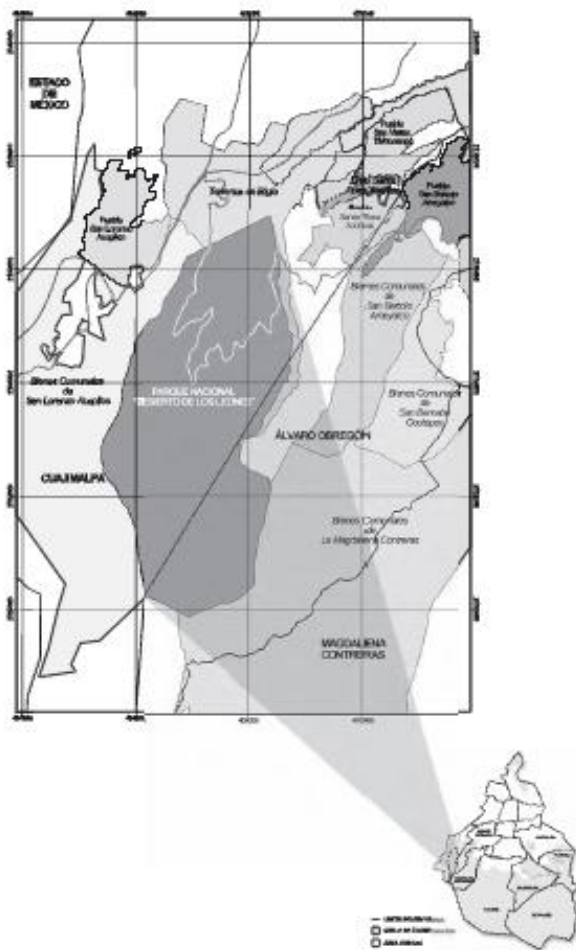


Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones



**Edafología.** Los suelos del PNDDL son de origen volcánico, donde el material parental son andesitas; son profundos, bien drenados y fértiles; húmedos la mayor parte del año. Los valores de pH son, por lo general, ligeramente ácidos. De acuerdo con Palma *et al.* (1999) y García *et al.* (2007) el tipo de suelo del Parque Nacional se clasifica como Andosol.

**Clima.** El clima corresponde a C(W2) W (b')ig, que equivale a: templado, con lluvias en verano; precipitación invernal menor de 5%, del más húmedo de los subhúmedos e isotermal (García, 1988).

**Vegetación.** Los tipos de vegetación dominantes que se presentan son:

- a) Bosque de *Abies-Pinus-Quercus*. Esta formación comprende la mayor parte del área del parque, se ubica al norte de la misma, en un rango altitudinal de 2,800 a 3,000 msnm, predominan en el dosel *Abies religiosa* y *Pinus patula*.
- b) Bosque de *Abies religiosa*.- Se ubica en la parte central del parque por arriba de los 3,000 msnm, la especie dominante es *Abies religiosa*. Se encuentra en laderas de cerros o cañadas protegidas contra la acción de vientos fuertes e insolación.
- c) Bosque de *Abies-Pinus hartwegii*.- Esta formación vegetal se ubica al sur del área, ocupa una franja angosta alrededor de los 3,650 msnm, la que representa la transición entre el bosque de *Abies religiosa* perturbado por incendios y las partes más altas ocupadas por *Pinus hartwegii*-pastizal.

Además de los anteriores, también se encuentra una zona de *Abies religiosa* afectada por incendio de 1998, y la mayoría de los árboles se encuentran muertos (en pie y derribados). En la actualidad, existen superficies que han sido reforestadas, principalmente con *Pinus ayacahuite*, aunque también se han utilizado *Cupressus lusitanica*, *Abies religiosa* y *Pinus spp.*, según el Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Desierto de los Leones (2006).



#### **4.2 Características de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. et Schlecht**

Árbol corpulento, hasta de 40 (60) m de alto; hojas alternas de 20 a 30 mm de ancho, ápice agudo y córneo, base torcida, de color verde oscuro en el haz y glaucas en el envés; inflorescencias masculinas oblongas, de 12 a 14 mm de largo por 5 mm de ancho, de color violáceo, al principio protegidas por resina; inflorescencias femeninas en forma de conillos subcilíndricos, de 7 cm de largo, con las brácteas rojizas de margen rasgado; los conos maduros son cilíndrico-oblongos, de 10 a 16 cm de largo por 4 a 6 cm de ancho, casi sésiles; semillas resinosas de 9 a 10 mm. de largo por 5 mm de ancho, lisas, de color castaño brillante, el ala mide 22 a 25 mm de largo por 10 a 15 de ancho. A menudo forma bosque puro, pero también convive con otros árboles. Fuera del Valle se extiende de Sinaloa y San Luís Potosí a Guatemala (Calderón y Rzedowski, 2001).

#### **4.3 Selección de zona de muestreo**

Se eligió el paraje denominado “El Cementerio-Sabandijas por la presencia de mortalidad masiva de arbolado adulto (Romero-Carmona, 1986). En este paraje se ubicaron dos parcelas.

La parcela 1 presentó individuos de *A. religiosa* de cerca de 3 m de altura. La parcela 2 presento individuos de *A. religiosa* de 1.20m de altura.

#### **4.4 Diagnóstico de suelo**

**Muestreo.** Se obtuvieron 6 muestras de suelo alteradas en su estructura; 3 de la parcela 1 y 3 de la parcela 2, a las cuales se le determinó pH (potenciómetro digital), acidez total y requerimientos de alcalinizante, de acuerdo con Velasco (1983).

#### ***Determinación de acidez total y requerimientos de alcalinizante.***

Con el fin de conocer que hidróxido  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{Al(OH)}_3$  y  $\text{KOH}$ , mejora el pH del suelo, se realizó el siguiente procedimiento, de acuerdo con Velasco (1983).

Se colocaron 10 g de suelo en cada uno de los 7 matraces Erlenmeyer y se agregó a cada uno  $\text{KOH}$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  ó  $\text{Al(OH)}_3$  (0.04N) según fuera el caso; también se adicionó agua destilada en las cantidades que indica el siguiente Cuadro:



Recipiente número	mL de XOH (0.04N)	mL de agua destilada
1	0	20
2	2.0	18
3	5.0	15
4	8.0	12
5	11.0	9
6	14	6.0
7	17	3.0

Posteriormente se añadieron 4 gotas de cloroformo a cada matraz para prevenir el desarrollo bacteriano. Se dejaron reposar los matraces tapados por un periodo de 4 días, y se agitaron una vez al día durante cuatro días. Al término de estos días se determinó el pH de las suspensiones (Velasco, 1983). Después, se procedió a construir una curva de equilibrio utilizando la ordenada para los diversos valores de pH obtenidos y la abscisa para los diversos volúmenes de KOH,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  y  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que se utilizaron.

Con base en esta curva se calculó la cantidad de KOH,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  y  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que se necesita para elevar el pH del suelo, a partir del pH original o hasta el deseado (Velasco, 1983), utilizando la densidad aparente del lugar y una profundidad de 2.5 cm. Los incendios superficiales afectan en mayor grado este espesor del suelo (DeBano, 1998).

#### 4.5 Aplicación de tratamientos

Se aplicaron los siguientes tratamientos:

Se eligieron cinco árboles para cada uno de los tratamientos: KOH a 25, 30 y 35 ppm;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , (10 ppm),  $\text{Al}(\text{OH})_3$  a 25 y 35 ppm. Otros 2 árboles cercanos a cada uno fueron tomados como árboles sin tratamiento. Cada árbol representó una unidad experimental. En total se obtuvieron 37 unidades experimentales.

La aplicación de los tratamientos se realizó a fines de octubre, a fines de la temporada de lluvias, con la finalidad de detectar el efecto de los hidróxidos sobre la retención de la

humedad y el efecto sobre el incremento de la biomasa de yemas apicales (Moreno *et al.*, 2002) de *A. religiosa*. Las yemas apicales inician su desarrollo durante el mes de marzo.

Si se logra incrementar la humedad del suelo en la temporada invernal, se espera un crecimiento en las yemas apicales al inicio de la temporada de primavera. Al respecto Bernal-Salazar (2004) encontró que la precipitación invernal está relacionada con el crecimiento de *A. religiosa*, el cual comienza en febrero y alcanza un máximo en mayo.



Figura 2. Individuo de *Abies religiosa* en condiciones de bajo desarrollo y crecimiento.



#### **4.6 Efecto de la aplicación de hidróxidos sobre:**

##### **4.6.1. Biomasa de yemas apicales**

Durante el mes de abril, previo a la temporada de lluvias, se evaluó la biomasa vegetal de las yemas apicales, recolectando dos ramas de cada individuo, de la parte media de la copa. En abril Bernal-Salazar (2004) reportó un máximo de crecimiento vegetal en *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*.

Las ramas recolectadas se colocaron en una estufa a 80°C para su deshidratación. Posteriormente, se pesaron en una balanza Ohaus 250 y se obtuvo el peso de la biomasa.

##### **4.6.2. Propiedades hídricas del suelo**

Con base en el hidróxido que presentó mayor beneficio sobre el crecimiento de los árboles, se eligió el tipo de hidróxido y su concentración. Se aplicó a un metro cuadrado de suelo, con tres repeticiones. El área adjunta también de un m<sup>2</sup>, fue utilizada como testigo o sin tratamiento.

En cada metro cuadrado se evaluaron las propiedades hídricas siguientes:

###### **a) Determinación de la tasa de infiltración**

Se realizaron tres determinaciones *in situ* por cada uno de los tratamientos utilizando el Permeámetro Guelph en la superficie del suelo. La tasa de infiltración se obtiene cuando se obtengan tres lecturas constantes o se realiza un promedio de las tres últimas lecturas, después de 10 lecturas con el tiempo utilizado. Los resultados se expresaron en mm h<sup>-1</sup> (Schoeneberger *et al.*, 2002)

###### **b) Conductividad hidráulica**

Se realizaron tres determinaciones *in situ* por cada uno de los tratamientos utilizando el Permeámetro Guelph modelo 2800K1 (Soilmoisture Equipment Corp) (Schoeneberger *et al.*, 2002).

El permeámetro mide la penetración a velocidad constante de agua en el suelo no saturado desde un pozo cilíndrico, en el cual se mantiene una carga constante de agua. En el



suelo se forma un bulbo con dimensiones que depende de tipo de suelo, radio del pozo y de la carga de agua en el pozo.

Este método se sustenta en los análisis efectuados por Richards, que ha encontrado una solución efectiva de cálculo de la conductividad hidráulica saturada (Kfs), considerando el flujo tridimensional del agua en el suelo, a partir de un hoyo en donde se mantiene una carga hidráulica (h) constante. Mientras el agua fluye a través del suelo, la columna de agua en los reservorios del permeámetro desciende, manteniendo estable la altura de h. Esta velocidad de descenso es registrada por medio de una escala graduada a 0.1 cm, en intervalos constantes de tiempo, permitiendo las lecturas correctas aún a muy bajos caudales. Cuando las velocidades de descenso se estabilizan obteniendo 3 ó 4 valores iguales se termina la medición. (Gabriels *et al.*, 2006). Con el valor de velocidad de descenso estable obtenido se procede al cálculo de la Kfs:

$$2\pi H^2 Kfs + C\pi a^2 Kfs + 2\pi H \Phi m = CQ \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$$Kfs = \frac{C Aq}{2\pi h^2 + C\pi a^2 + \left(2\pi \frac{h}{a^*}\right)} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

C = factor de forma adimensional obtenido de h/a

A = área de la sección transversal del reservorio del permeámetro (m<sup>2</sup>)

q = estado estable de la caída del nivel de agua en el reservorio del permeámetro (m s<sup>-1</sup>)

h = profundidad de agua en el pozo (controlada por la altura del tubo de aire) (m)

a = radio del pozo (m).

a\* = parámetro de textura/estructura (m<sup>-1</sup>)

El parámetro textura/estructura (a\*) se reporta en el Cuadro 5; mientras que el factor de forma (C) se puede observar en la Figura 4.



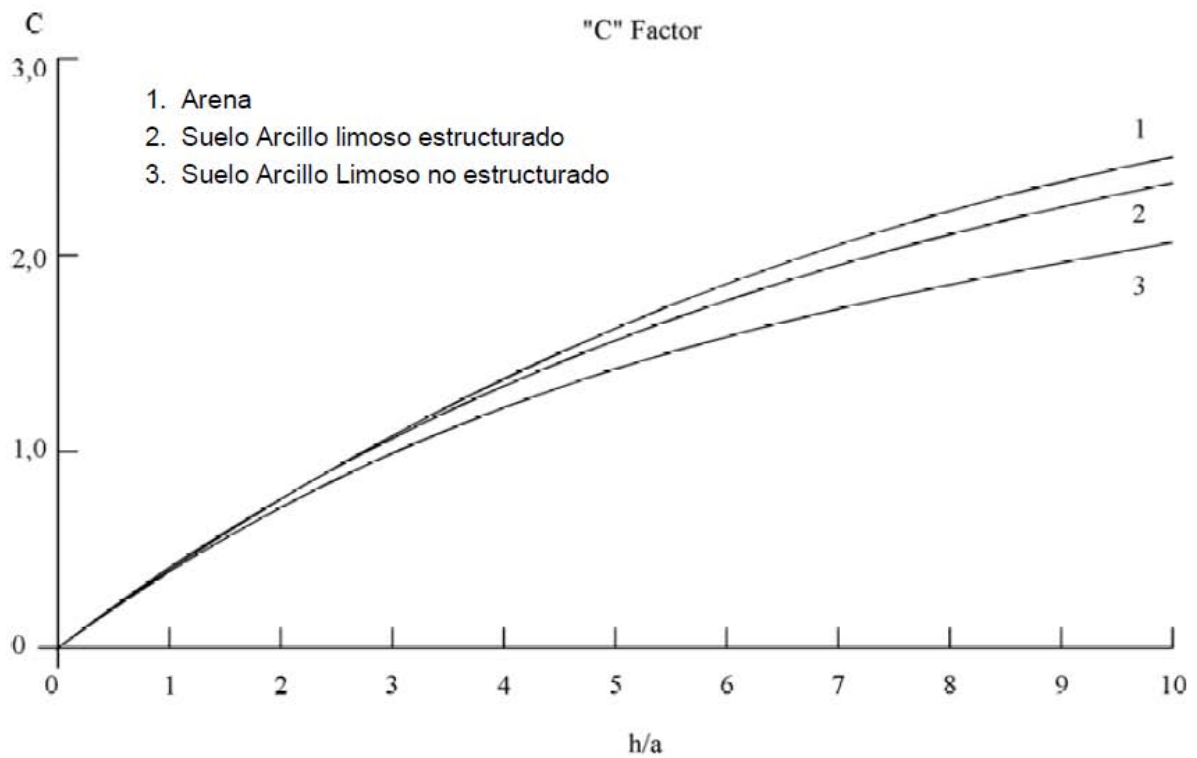


**Cuadro 5.** Categorías de medios porosos usados para la estimación de  $a^*$ . (Reynolds y Elrick, 1987).

---

<b>Categoría del medio poroso</b>	<b>Valor de <math>a^*</math> (m-1)</b>
Materiales compactados, materiales arcillosos o limosos poco estructurados, tales como sedimentos marinos o lacustrinos, materiales de relleno, etc.	1
Suelos que tienen textura fina y sin estructura.	4
La mayor parte de los suelos estructurados desde arcillas, pasando por francos; además incluyendo arenas finas y gruesas desestructurados. Categoría más frecuentemente aplicada a suelos agrícolas.	12
Suelos pedregosos y arenas gruesas, pueden además incluir algunos suelos con buena estructura con grandes grietas y macroporos.	36

---



**Figura 3.** Escala del factor C en función de h/a (Reynolds y Elrick, 1987).

Para el cálculo de la  $K_{fs}$  se utiliza la siguiente fórmula obtenida del manual de uso del permeámetro Guelph:

$$K_{fs} = [(0.0041) (35.22) (R_2)] - [(0.0054) (35.22) (R_1)]$$

Donde  $K_{fs}$  = Conductividad Hidráulica Saturada de Campo

$R_1$  = Constante de la primera lectura

$R_2$  = Constante de la segunda lectura

### c) *Potencial de flujo mátrico*

Con las determinaciones obtenidas para  $K_{fs}$  ( $R_1$  y  $R_2$ ), se sustituyeron dichos valores en la fórmula utilizada para el cálculo para este parámetro:



$$\Phi_m = [(0.0572) (35.22) (R_1)] - [(0.0237) (35.22) (R_2)]$$

Donde  $\Phi_m$  = Flujo de Potencial Mátrico

$R_1$  = Constante de la primera lectura

$R_2$  = Constante de la segunda lectura

El flujo de potencial mátrico  $\Phi_m$  es definido como:

$$\Phi_m = \int_{\Psi_i}^0 K(\psi) d\psi \dots\dots\dots(3)$$

Donde  $\Psi_i$  es la presión inicial del bulbo en el suelo y  $K(\psi)$  es la relación de la conductividad hidráulica y la presión del bulbo para la infiltración. El primer término a la izquierda de la ecuación (1) representa el "empuje hidráulico" de agua en el suelo debido a la presión hidrostática del agua en el pozo; el segundo término representa la "fuerza de gravedad" del agua en el fondo del pozo debido a las fuerzas capilares en el suelo. Los primeros dos términos de la ecuación (1) pueden ser considerados como la "saturación de campo" un componente fuera del flujo del pozo y el tercer término como el componente de flujo no saturado.

El análisis resuelto de Richards de la ecuación (1) para  $K_{fs}$  y  $\Phi_m$  usando ecuaciones simultáneas o de mínimos cuadrados. (Reynolds y Elrick, 1985).

$K_{fs}$  y  $\Phi_m$  son resueltos por medio de dos ecuaciones simultáneas

$$2\pi H_1^2 + (C_1 \pi a^2) K_{fs} + (2\pi H_1) \Phi_m = C_1 Q_2$$

$$2\pi H_2^2 + (C_2 \pi a^2) K_{fs} + (2\pi H_2) \Phi_m = C_1 Q_2$$

(Reynolds y Elrick, 1985)



#### d) *Densidad aparente por método del cilindro*

Se utilizaron cilindros de cobre de 3 x 5 cm según (Arshad *et al.* 1996); éstos se hunden completamente y se extraen con el cilindro totalmente lleno de suelo, después se retiran cuidadosamente del suelo y se cubren con cinta de ambos extremos para evitar alguna pérdida.

En el laboratorio los tubos se pesaron, este peso es considerado como el inicial. Posteriormente, los tubos se colocaron dentro de una estufa a 70 °C y cada día se registró el peso de cada tubo, hasta que fue constante. Una vez determinado el peso constante y el volumen del tubo, se empleó la fórmula:

$$\text{Densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$$

#### 4.6.3. Propiedades químicas del suelo

Se tomaron tres muestras de suelo por cada tratamiento y tres muestras de suelo sin tratamiento, durante el mes de abril. A cada muestra se le determinó: pH (potencial, real y con NaF), nitrógeno, fósforo y cationes (Ca, Mg, K y Na), capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza y en el Laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos, del Colegio de Postgraduados. Los análisis fueron:

- a) **pH.** Para el análisis de este parámetro se utilizaron tres modalidades: la primera de ellas es la que corresponde al pH real (1:2.5 relación suelo:agua) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000; pH potencial, relación suelo:KCl de 1: 2.5 (Van- Reeuwijk, 2002) y pH medido en NaF 1:50 (López *et al.*, 1988).
- b) **Materia orgánica.** Se determinó por método de Walkley y Black. El método se basa en la oxidación de carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que genera al mezclarla con ácido sulfúrico. Después de un tiempo la mezcla se diluye y se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de  $\text{Fe}^{3+}$  y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso (NOM-021-RECNAT, 2000).



- c) **Nitrógeno total.** De acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000, la determinación del nitrógeno total involucra dos pasos: (a) digestión de la muestra para convertir el nitrógeno a  $\text{NH}_4^+$  y (b) la determinación de  $\text{NH}_4^+$  en el digestado. La digestión de la muestra es desarrollada por el calentamiento de la muestra con ácido sulfúrico concentrado y sustancias como el  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . El amonio en el digestado es determinado por titulación del amonio liberado del digestado con álcali. El contenido de N total en el suelo se expresa en términos de porcentaje en peso de la muestra.
- d) **Fósforo.** Se realizó la extracción de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000 por método de Bray-Kurtz. El fósforo es extraído del suelo con una solución de  $\text{NH}_4\text{F}-\text{HCl}$ . Se realizó una curva de calibración y se leyó la muestra a una longitud de onda de 882 nm. Los resultados se expresaron en  $\text{mg kg}^{-1}$ .
- e) **Cationes (K, Ca, Mg y Na).** Para su determinación se utilizó la técnica de extracción de Ca, Mg, K y Na con  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  pH 7 de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000; y posteriormente se realizó su cuantificación por absorción atómica con el equipo Spectraa 200 Marca Varian.
- f) **Capacidad de intercambio Catiónico (CIC).** La muestra es percolada con acetato de amonio  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  pH 7; las bases se miden en el percolado, este posteriormente se destila y se determina el amoniaco solubilizado el cual contiene las bases totales (Van Reeuwijk, 1999).
- g) **Porcentaje de Saturación de Bases (PSB).** Se define como el porcentaje de la capacidad de cambio catiónico total ocupada por cationes alcalinos como el calcio, magnesio, sodio y potasio. Se obtiene con la siguiente fórmula :



$$V = \frac{[Ca^{+2}] + [Mg^{+2}] + [K^{+1}] + [Na^{+1}]}{CIC \text{ cmoles } kg^{-1}} \times 100$$

(Porta *et al.*, 1994)

#### 4.6.4. Mineralogía del suelo.

De las muestras con la más alta concentración de hidróxidos y que fueron obtenidas en campo de la capa superficial (0-5cm de profundidad), se tomaron cantidades representativas para realizar el análisis mineralógico descrito por Van Reeuwijk (1999). En cada muestra se añadió H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la destrucción de la materia orgánica, y el producto que se obtuvo fue tamizado en una malla fina; posteriormente se maceró hasta alcanzar una textura muy fina (tamaño aproximado de 50µm), y se colocaron en un portamuestra.

Estas muestras fueron analizadas utilizando un Difractómetro de Rayos X. Las mediciones se realizaron por la técnica de barrido en un equipo GBC 112D Automation Interface ®. Los minerales se determinaron utilizando el software ICDD (2002).

#### 4.6.5. Micromorfología del suelo

##### *Porosidad total, tipos de poros y Microestructura*

En cada sitio se tomó una muestra inalterada en su estructura con ayuda de cajas tipo Kubiena. Las cajas se enterraron verticalmente y se extrajeron excavando de manera cuidadosa para evitar que se altere la muestra. En laboratorio, con base a su volumen y peso se adicionaron los tipos de hidróxidos cuya aplicación mejoró el crecimiento de los árboles *in situ*.

Las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente. Las cajas se trasladaron al laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos, del Colegio de Postgraduados para ser preparadas. A las cajas se les agregó resina poliéster insaturada, monómero de estireno (relación 1:12) y 1.5 ml de catalizador (Peróxido de metil-etil-cetona). Enseguida, las cajas con resina se introdujeron a una caja de vacío a una presión de 18 libras durante tres horas, ello con el fin de que la resina penetre más rápido en el suelo y logre impregnarse en todos los



espacios del suelo, si el volumen de la resina disminuyó, se agregó más resina a la muestra y se volvió a colocar en la caja de vacío durante 3 horas más. Concluido el paso anterior, se dejaron en gelación, aproximadamente por 15 días (depende el clima) para una impregnación total. Una vez, endurecidos los bloques, se realizaron cortes longitudinales (utilizados para evaluar el drenaje y porosidad del suelo) y se colocaron en portaobjetos. Las muestras se pulieron hasta alcanzar un grosor de 30 micras. Posteriormente, se cubrieron con un portaobjetos.

Para el análisis de porosidad, se utilizó en primer lugar un microscopio petrográfico marca Olympus BX51 con compensador y se obtuvieron alrededor de 9 a 12 imágenes de cada sección delgada. En cada imagen se obtuvo el porcentaje de porosidad total con el software Image Pro Plus ver. 0.5; además se describió la distribución y tipos de poros. La microestructura se describió utilizando el manual para la descripción micromorfológica de suelos (Bullock *et al.*, 2004).

#### **4.7 Análisis estadístico de los datos.**

Se realizaron análisis estadísticos con el software STATA 8. Los datos obtenidos en porcentaje (N, porosidad) fueron transformados por medio de la raíz cuadrada del arcoseno, para ajustar los datos a una curva normal. Todos los datos fueron sometidos a un análisis de varianza, para determinar diferencias significativas entre los tratamientos con una significancia de  $p < 0.05$ .



## 5. RESULTADOS

### 5.1 Diagnóstico de las propiedades hídricas

En la zona de estudio se obtuvo una tasa de infiltración superficial de  $2240 \text{ mm h}^{-1}$  ( $\pm 454$ ), pero a los 2.5 cm de profundidad se redujo a  $350 \text{ mm h}^{-1}$  ( $\pm 258$ ), lo que significa una reducción de 84%. La Kfs registró valores de  $426 \text{ mm h}^{-1}$  ( $\pm 356$ ); mientras que en el potencial de flujo mátrico se registraron valores negativos ( $-0.08 \pm 0.06 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ ). El suelo presenta una densidad aparente de  $0.73 \text{ g/cm}^3$  ( $\pm 0.02$ ) y el contenido de humedad es de 30% ( $\pm 0.8$ ). La porosidad es de 37% ( $\pm 7$ ), como se reporta en el Cuadro 6 y en las Figuras 5a-5f.

El valor de infiltración superficial obtenido en este estudio (Figura 8a), se ubica como alto con respecto a los valores reportados para Andosoles por Zehetner y Miller (2006) quienes encontraron un valor de  $56.9 \text{ mm h}^{-1}$  en páramos ecuatorianos y, asimismo, al registrado por Ángeles-Cervantes (2010) quien determinó un valor de  $173.55 \text{ mm h}^{-1}$  en el mismo tipo de suelo y bajo bosque de oyamel. Sin embargo, es bajo si se compara al citado por Castro-Alonso (2009) quien registró un intervalo de 16 920 a 23 760  $\text{mm h}^{-1}$  en bosques similares del Parque Nacional Izta-Popo. La reducción drástica a los 2.5 cm de profundidad en un 84% (Figura 6b), está generando problemas de drenaje superficial.

Los problemas de drenaje, pueden tener varias causas: la porosidad, la agregación y los incendios. En secciones delgadas se observaron que los poros fisura se acomodan parcialmente, lo que reduce la conductividad hidráulica del suelo. Además se observan bloques subangulares con un desarrollo moderado; también se aprecian residuos vegetales carbonizados (Figura 8 a y b; Figura 9b), por lo que se puede inferir que han ocurrido incendios superficiales. De acuerdo con Santander-González (2004), en este tipo de incendios se generan sustancias hidrófobas, debido a la combustión incompleta de polisacáridos que crean una capa hidrófoba de ésteres y éteres. Las sustancias hidrófobas avanzan hacia abajo a lo largo de gradientes de temperatura, y la capa repelente al agua se presenta paralelamente a la superficie del suelo en el área quemada (DeBano *et al.*, 1998). Con base en lo anterior, se sugiere que en esta zona ocurrieron incendios superficiales, los cuales formaron una capa repelente a los 2.5 cm de profundidad. Ángeles-Cervantes (2010) reportó que los incendios forestales de baja intensidad (menos de  $250^\circ\text{C}$ ) generan que las partículas se colapsen y se reduzca el espacio poroso.





La formación de la capa repelente está afectando la capacidad del suelo para conducir agua (Kfs), lo que puede explicar el bajo valor obtenido ( $426 \text{ mm h}^{-1}$ ) mostrado en la Figura 5d, el cual es menor en un 87% con respecto al reportado por Castro-Alonso (2009) quien obtuvo un valor de  $3276 \text{ mm h}^{-1}$  en bosques de oyamel; sin embargo, es mayor al registrado por Ángeles-Cervantes (2010) quien determinó  $137.92 \text{ mm h}^{-1}$  en bosques afectados por incendio superficial del PN El Chico.

Otra propiedad hídrica que es afectada por las sustancias hidrófobas, es la capacidad de adsorción de agua a través de los agregados del suelo (potencial de flujo mátrico). En este estudio se obtuvieron valores negativos, indicando un problema en la adsorción de agua en los agregados, afectando la disponibilidad para las plantas. En los Andosoles la capacidad de retención de humedad se pierde de manera irreversible cuando esta se expone a la superficie o bien cuando es sometida a incendios forestales (Wada, 2002).

Con respecto a la densidad aparente ( $0.74 \text{ g cm}^{-3}$ ), este valor se encuentra dentro del intervalo reportado para Andosoles:  $0.5$  y  $0.8 \text{ g cm}^{-3}$  (Kleber *et al.*, 2004),  $0.74 \text{ g cm}^{-3}$  (Fontes *et al.*, 2004),  $0.7 \text{ g cm}^{-3}$  (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006),  $0.89 \text{ g cm}^{-3}$  (Bravo *et al.*, 2006) y  $0.81 \text{ g cm}^{-3}$  (Ángeles-Cervantes, 2010).

Con base en lo anterior, se puede diagnosticar que: El bosque de la zona del cementerio del PNDLL registró en años anteriores un incendio superficial, que provocó una disminución de la porosidad y propició que en esta zona existan problemas de infiltración, Kfs y potencial de flujo mátrico. Esta porosidad está por debajo del mínimo requerido para *A. religiosa*, lo que puede explicar la mortalidad arbórea y el bajo crecimiento de individuos en reforestaciones. Asimismo, es altamente posible que también se generaran sustancias hidrófobas en la capa superficial del suelo.



## 5.2 Diagnóstico de las propiedades químicas

En el Cuadro 7, se observa que el  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  obtenido fue de 5.84 ( $\pm 0.32$ ), en tanto el valor de  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  fue de 5.61 ( $\pm 0.07$ ) y el  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  registró un valor de 10.69 ( $\pm 0.33$ ). Se determinó un porcentaje de nitrógeno de 0.14 ( $\pm 0.02\%$ ) y una concentración de fósforo de 3.15 ( $\pm 1.16 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Se obtuvieron concentraciones para Ca de 8.04 ( $\pm 4.88 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ), Mg de 1.64 ( $\pm 0.83 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ), K de 0.23 ( $\pm 0.08 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ) y para Na de 0.07 ( $\pm 0.04 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ). El valor de CIC registrado fue de 47.65 ( $\pm 21.63 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ); mientras que, el porcentaje de saturación de bases fue de 19.78 ( $\pm 4.71\%$ ).

El  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  se clasifica de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000 y con Schoeneberger *et al.* (2002) como moderadamente ácido. Este valor se encuentra dentro del intervalo registrado para Andosoles a nivel mundial: 5.62 en Japón (Song e Ishiguro, 1992); 6.3 en Islandia (Gudmundsson *et al.*, 2004) y 4.5 en Indonesia (Van Ranst *et al.*, 2008).

Para Andosoles de México, bajo bosques de oyamel, se reportan los siguientes valores: 5 en el PNDDL (Romero-Carmona, 1986); 5.5 en el PN Cofre de Perote (Campos *et al.*, 2001); 5.9-6.7 en el PN Izta-Popo (García-Hernández, 2003) y 5.3 en el PN El Chico, Hidalgo (Ángeles-Cervantes, 2010).

El  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  obtenido en este estudio se encuentra dentro del intervalo reportado para Andosoles. El pH refleja que no existe toxicidad por aluminio ni se ve afectada la biodisponibilidad de nutrimentos. De acuerdo con Porta *et al.* (1999), los efectos de toxicidad comienzan a pH menores a 5.5.

Por otra parte, de acuerdo con Mayen (1987) y Manzanilla (1974), el pH adecuado para el establecimiento de *A. religiosa* debe de encontrarse dentro de un intervalo de 5-7, por esta razón puede deducirse que el valor de pH registrado en este estudio, no representa un impedimento para el crecimiento de esta especie.

El  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  determinado en este estudio (5.61) refleja que el aluminio presente no se encuentra disponible, porque no es intercambiable, debido a su hidrólisis, polimerización y precipitación (Soil Survey Staff, 1999); en tanto, el valor de  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  (10.66) indica la presencia de minerales de rango corto, como alofano e imogolita e incluso ferrihidrita. Al respecto, tanto López *et al.* (1988) y Kimble *et al.* (2002) mencionan que un valor por encima de 9.4 señala la ocurrencia en el suelo de este tipo de minerales.



El porcentaje de materia orgánica obtenida en este estudio (17.12) se ubica dentro del intervalo reportado para Andosoles por diversos autores. Además, este se califica como muy alto de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000, lo anterior, indica que hay un aporte alto de M.O. hacia el suelo.

El porcentaje de N (0.14%), se clasifica como bajo, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000. Para Andosoles, bajo bosques de oyamel, se han reportado valores de 0.87% (Romero-Carmona, 1987), 0.61% (López-López, 2010) y de 0.77% (Ángeles-Cervantes, 2010). Además, Kleber *et al.* (2004) para Andosoles de Alemania determinaron un valor de 0.45-0.61%. Por tal razón se infiere que el N puede estar actuando como un factor limitante en el crecimiento de los árboles de esta especie.

La concentración de fósforo registrada en este estudio ( $3.15 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se califica como baja según norma citada anteriormente; sin embargo, se encuentra dentro del intervalo reportado para bosques de oyamel por los siguientes autores: Campos *et al.* (2001) reportaron una concentración de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Arbelo *et al.* (2002) registraron un valor de  $11.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ; y Ángeles-Cervantes (2011) que determinó un valor de  $3.66 \text{ mg kg}^{-1}$ . En tanto Romero-Carmona (1986) y López-López (2009) encontraron valores superiores ( $356$  y  $69 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente).

La formación compuestos hidrófobos en el suelo, debida a la quema incompleta de materia orgánica, provoca la formación de complejos con el nitrógeno y la retención de fósforo, lo que explica la baja disponibilidad en el suelo para estos dos elementos (Santander-González, 2004). Además, dada la naturaleza de estos suelos, es común encontrar retención de fósforo por los minerales amorfos (Porta *et al.*, 1999).

Para la concentración de Ca y Mg, los valores se clasifican como medios y para el valor de K como bajo de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000. En Andosoles de Japón, Song e Ishiguro (1992) determinaron una concentración de Ca de  $1.43 \text{ cmoles kg}^{-1}$ , Mg de  $2.96 \text{ cmoles kg}^{-1}$ , K de  $0.18 \text{ cmoles kg}^{-1}$  y Na de  $0.28 \text{ cmoles kg}^{-1}$ . En tanto, Kebler *et al.* (2004) registraron para Alemania intervalos de concentraciones de  $4.1-10 \text{ cmoles kg}^{-1}$  para Ca,  $1.6-4.4$  para Mg,  $0.1-0.4 \text{ cmoles kg}^{-1}$  para K y  $0.1-0.4$  para Na. Para Andosoles y bajo bosques de oyamel en México, Romero-Carmona (1986), reportó en el PNDDL una concentración de Ca de  $4.95 \text{ cmoles kg}^{-1}$ , Mg de  $0.46 \text{ cmoles kg}^{-1}$ , K de  $0.20 \text{ cmoles kg}^{-1}$  y Na de  $0.06 \text{ cmoles kg}^{-1}$ . Ángeles-Cervantes (2010) para el P.N. El Chico, Hidalgo registró concentraciones de



16.41 cmoles  $\text{kg}^{-1}$  para Ca, 3.24 cmoles  $\text{kg}^{-1}$  para Mg 0.01 cmoles  $\text{kg}^{-1}$  y en el caso de Na no detectó cantidades significantes.

Los resultados de este estudio, son similares a los reportados en investigaciones anteriores; sin embargo, la heterogeneidad en los valores es debida al tipo de Andosol que se presente. Por ejemplo, en el caso de Japón se encuentran Andosoles alofánicos, es decir, presentan aproximadamente 40% de contenido de alofano, el cual tiene una CIC muy elevada y además una gran superficie específica; por tanto, los cationes estarán ligados fuertemente a este mineral, haciendo menor su disponibilidad (Porta *et al.*, 1999). En tanto para Andosoles de Alemania, donde se trata de Andosoles sílicos, el alofano se encuentra en un porcentaje de 10, por esta razón la disponibilidad de cationes es mayor al no ser retenidos por este mineral.

Los cationes son importantes debido a su efecto en el pH del suelo después de un incendio forestal y la inmovilización del P (DeBano, 1998). Wright y Bayley (1982), mencionan que el nitrógeno y el azufre son fácilmente volatilizados después de un incendio, pero los cationes son aún más difíciles de volatilizar y la pérdida es mucho menor.

El valor de CIC registrado en este estudio se cataloga como alto de acuerdo con la misma norma; en tanto, Ángeles-Cervantes (2010) determinó un valor similar (47.6 cmoles  $\text{kg}^{-1}$ ). El porcentaje de saturación de bases fue de 19.78 ( $\pm 4.71\%$ ). Estos dos últimos valores denotan una alta capacidad para intercambiar cationes, por la presencia de complejos de intercambio (materia orgánica y arcillas de tipo 2:1) con una alta capacidad para adsorción.

El porcentaje de saturación de bases señala que solo 20% de los sitios de intercambio está representado por  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , y los sitios restantes se encuentran ocupados por otros cationes tales como,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}^+$ , etc. Además, el sitio evaluado en este estudio indica un menor porcentaje (19.78) lo que significa baja fertilidad y en correspondencia una menor concentración de  $\text{H}^+$  adsorbidos (Buckman & Brady, 1991), si se compara con el registrado por Ángeles-Cervantes (2010), quién obtuvo un valor de 41.30%.

El pH no resulta ser un factor limitante para el crecimiento de *A. religiosa*, dado que el valor registrado en este estudio, no restringe la disponibilidad de nutrimentos. No obstante, la ocurrencia de un incendio superficial fija el nitrógeno y el fósforo como lo hacen notar las concentraciones bajas de estos dos elementos. Por otra parte, en el caso de los cationes, se presentan menores pérdidas en el suelo después de un incendio superficial, ya que las temperaturas alcanzadas son bajas como para provocar su volatilización. En tanto, el valor de



CIC, denota la presencia de cambiadores con una alta capacidad de adsorción de cationes (materia orgánica y arcillas 2:1). Finalmente el PSB exhibe que el complejo de intercambio está representado en 80% por cationes como  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}^{+}$  etc., lo que probablemente limite el desarrollo óptimo de la vegetación (Buckman y Brady, 1991).

Con base en los resultados obtenidos del diagnóstico de las propiedades hídricas y químicas, se recomienda aplicar una sustancia que actúe sobre los compuestos hidrofóbicos; incrementa el  $\text{Ca}^{2+}$  (responsable de la senescencia foliar),  $\text{K}^{+}$  (regulación del agua en la planta) (Marschner, 1995) y el pH del suelo. Por lo anterior, la aplicación de hidróxidos de K y Ca debe investigarse experimentalmente en estos suelos.



Cuadro 6. Diagnóstico de las propiedades hídricas de un suelo del Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F.

Infiltración		Kfs	Potencial de flujo mátrico	Densidad aparente	Humedad relativa	Porosidad
(mm h <sup>-1</sup> )						
superficial	2.5 cm		(cm <sup>2</sup> seg)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
2240 (± 454)	350 (±258)	426 ± 356	-0.08 ±0.06	0.74 ± 0.02	30 ± 0.8	37 ± 7

Cuadro 7. Diagnóstico de las propiedades químicas de un suelo del Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F. Se indica la clasificación de algunas propiedades de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.

pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	pH KCl 1: 2.5	pH NaF 1:50	MO	Nitrógeno	Fósforo	Ca	Cationes			CIC	PSB
							Mg	K	Na		
			(%)		mg kg <sup>-1</sup>	cmoles kg <sup>-1</sup>					(%)
5.84 ± 0.32	5.61 ± 0.07	10.69 ± 0.33	17.25 ± 12.46	0.14% ± 0.02	3.15 ±1.16	8.04 ± 4.89	1.64 ± 0.83	0.23 ± 0.08	0.07 ± 0.04	47.65 ± 21.63	19.78 ± 4.71
Moderadamente ácido			Muy alto	Bajo	Bajo	Media	Media	Baja		Muy Alta	



### 5.3 Requerimientos de alcalinizante y efecto de hidróxidos sobre el pH del suelo

En la Figura 4 se observa que el suelo presentó un pH inicial moderadamente ácido (5.4-5.8) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000. La adición de 14 ml de KOH y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aumentaron el valor de pH 6.7 y 6.3 respectivamente. La adición de 5 ml de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  [0.04 N] elevó el pH hasta 6. En tanto, con  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [0.04 N] no se incrementó el pH. El tratamiento que registró un aumento mayor en el pH fue con KOH [0.04 N].

De acuerdo con Romero-Carmona (1986) y con el Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Desierto de los Leones (CONANP, 2006), la geología de esta zona corresponde a rocas andesitas principalmente. Uno de los componentes de la andesita es la anortita, la cual está dominada por calcio. El análisis químico del suelo (Cuadro 7) muestra que el calcio es el catión dominante en el complejo de intercambio, considerando que el material parental presenta un grado de alteración.

El aumento del pH con el uso del KOH, se atribuye a que el K es un elemento con una alta capacidad hidrolítica, lo que provoca la formación de bases fuertes. Por ello, el incremento es mayor comparado con los tratamientos restantes. Además, el  $\text{OH}^-$  presente en la disolución básica reacciona con los aceites orgánicos, hidrolizando los ésteres en un proceso conocido como saponificación dando lugar a la producción de agua (Mc-Murry, 2008).

Para el caso de la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  el incremento del pH es debido a que el  $\text{Ca}^{2+}$  desplaza a los  $\text{H}^+$  que se encuentran en el complejo de intercambio. Este ión reacciona con el  $\text{OH}^-$ , dando lugar a la formación de una molécula de agua. Finalmente, los iones  $\text{Ca}^{2+}$  ocupan el lugar del  $\text{H}^+$ , reduciendo la acidez potencial del suelo (Velasco, 1983). Asimismo, se observó una menor elevación en el pH con la adición de este hidróxido, en comparación con el registrado en la adición de KOH, debido a que el  $\text{Ca}^{2+}$ , es un catión menos básico que el  $\text{K}^+$  (por pertenecer a la familia 2A ó metales alcalinotérreos).

La adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [0.04 N] no incrementa el pH, debido a que el tamaño del ión  $\text{Al}^{3+}$  no es suficiente para desplazar al  $\text{Ca}^{2+}$ . Por otra parte, el  $\text{Al}^{3+}$ , no es soluble a pH mayores a 5 por que lo que su reactividad es mínima. Con base en lo anterior, se propone que para la corrección de la acidez se utilice la adición de KOH dada su alta capacidad alcalinizante, lo anterior posiblemente incrementará las propiedades hídricas. Sin embargo, es necesario evaluar los efectos *in situ* tanto en las propiedades del suelo como en el crecimiento vegetal.

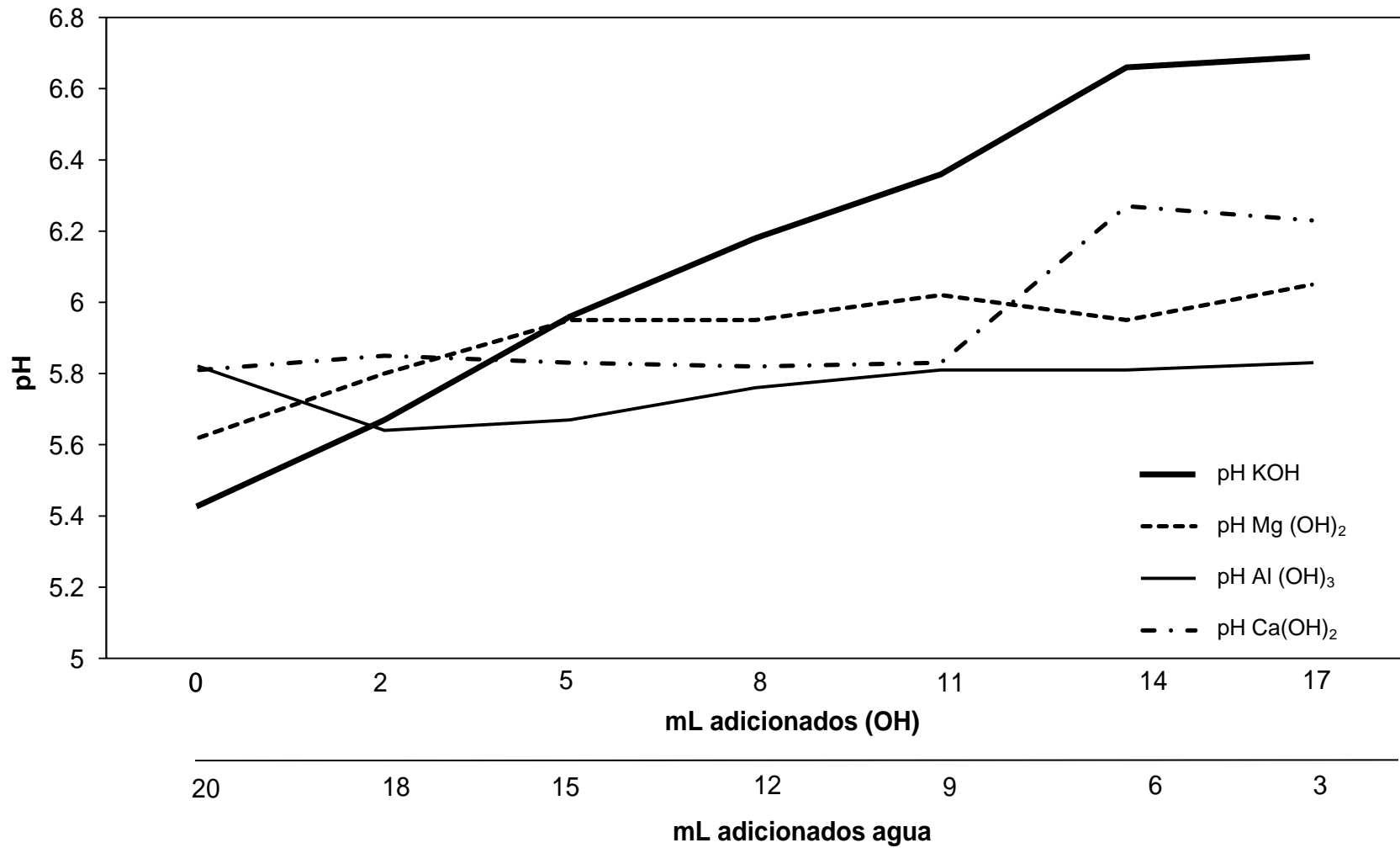


Figura 4. Efecto de la adición de KOH, Mg (OH)<sub>2</sub>, Al (OH)<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub> [0.04 N] sobre el pH de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones D.F.





#### 5.4 Efecto de la adición de hidróxidos en el suelo sobre las propiedades hídricas

**Infiltración superficial.** La infiltración superficial inicial fue de 2240 ( $\pm$  454) y con la adición de KOH [25 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] se registraron valores de 1333 ( $\pm$  820) y 3200 ( $\pm$  2306)  $\text{mm h}^{-1}$  respectivamente, como se muestra en el Cuadro 8 y Figura 5a. La adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] tiende a incrementar la infiltración superficial, pero no de manera significativa. Para el caso de KOH, su adición disminuye el valor de esta propiedad, pero no significativamente.

**Infiltración a los 2.5 cm.** El valor inicial de infiltración a los 2.5 cm de profundidad fue de 350 ( $\pm$  258) y con la adición de KOH [25 ppm] y de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] fueron de 227 ( $\pm$  46) y de 410 ( $\pm$  302)  $\text{mm h}^{-1}$  respectivamente, como se observa en el Cuadro 8 y Figura 5b. Tampoco mostraron diferencias significativas; además, se observó el mismo comportamiento que en la infiltración superficial.

**Conductividad hidráulica Saturada (Kfs).** La conductividad hidráulica mostró valores iniciales de 426 ( $\pm$  46); 149 ( $\pm$  123)  $\text{mm h}^{-1}$  para la adición del tratamiento de KOH [25 ppm] y en  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] de 410 ( $\pm$  302)  $\text{mm h}^{-1}$ . La adición de KOH disminuyó la Kfs y en el caso de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  se registró un aumento; sin embargo, para ambos tratamientos no se determinaron diferencias significativas (Cuadro 8 y Figura 5c).

**Potencial de flujo mátrico.** La adición de hidróxidos incrementó el valor de potencial de flujo mátrico como se muestra en la figura 5d y cuadro 8; pero no fueron significativos. El valor de potencial de flujo mátrico inicial fue de -0.08 ( $\pm$  0.06  $\text{cm}^{-2}\text{seg}^{-1}$ ) y con la adición de KOH [25 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] los valores aumentaron (-0.06  $\pm$  0.04 $\text{cm}^{-2}$  y -0.07  $\pm$  0.10  $\text{cm}^{-2}\text{seg}^{-1}$  respectivamente).

**Densidad aparente.** La adición de hidróxidos ocasiona una tendencia a disminuir la densidad aparente; sin embargo, no se observaron diferencias significativas. El valor de densidad aparente inicial fue de 0.74  $\pm$  (0.02  $\text{g/cm}^3$ ); en tanto, la adición de KOH y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] provocó disminuciones en estos valores (0.52  $\pm$  0.11  $\text{g/cm}^3$  y 0.54  $\pm$  0.23  $\text{g/cm}^3$ ) respectivamente (Cuadro 8 y Figura 5e). No se determinaron diferencias significativas.



**Contenido de humedad del suelo.** Con la adición de KOH y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] se hizo evidente el aumento en el contenido de agua (Cuadro 8 y Figura 5f). Los valores respectivos fueron de  $45 (\pm 3\%)$  y  $39 (\pm 6\%)$  y sólo se registraron diferencias significativas para el primer valor ( $p=0.03$ ) con respecto a la muestra sin adición de hidróxidos la cual registró un porcentaje de  $30 (\pm 1)$ .

La adición de hidróxidos aumentó de manera no significativa el porcentaje de porosidad (Cuadro 8 y Figura 5g); sin embargo, se observa una tendencia al aumento para los tratamientos de KOH y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] ( $37.62 \pm 8.70$  y de  $39.84 \pm 7.27$  respectivamente) en comparación con el valor de diagnóstico ( $36.78 \pm 6.73\%$ ).

La infiltración superficial, la infiltración a los 2.5 cm de profundidad y la conductividad hidráulica, así como la porosidad, no se ven alteradas con la adición de KOH 25 ppm. Sin embargo, el contenido de humedad del suelo fue la única propiedad hídrica del suelo que se incremento significativamente con la adición de KOH. Lo anterior se atribuye a que el KOH, a dicha concentración, posiblemente fue suficiente para eliminar la capa hidrófoba y permitir el ingreso de agua a los agregados del suelo. Los hidróxidos reaccionan y destruyen los enlaces de los diferentes ácidos orgánicos. Al respecto, DeBano (1998) menciona que ácidos húmicos de origen microbiano, hidratos de carbono, fenoles, quinonas, ésteres, son causantes de la hidrofobicidad. Además, se requiere investigar si a mayor concentración de hidróxidos o una combinación de estos, pueden modificar e incrementar las restantes propiedades hídricas de manera significativa, ya que existió la tendencia al incremento en la Kfs, potencial de flujo mátrico, densidad aparente y porosidad.

La adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] no tuvo efectos significativos sobre las propiedades hídricas del suelo, sin embargo en la porosidad, densidad aparente, potencial del flujo mátrico, y retención de humedad se mostró una tendencia al incremento. Posiblemente, el efecto de floculación del aluminio (Sienko & Plane, 1990); así como la acidez que genera (Huang *et al.*, 2002), limitaron su efecto en las propiedades hídricas.

La aplicación de KOH [25 ppm] modificó significativamente el contenido de humedad del suelo y se observó un aumento de la porosidad para el caso de la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm]). La tendencia al aumento de los valores de las propiedades hídricas, indica que se deben de realizar más investigaciones, como mayores dosis y/o combinaciones de hidróxidos.

Cuadro 8. Efecto de la adición de KOH y Al(OH)<sub>3</sub> [ 25 ppm] sobre las propiedades hídricas de un suelo en el Parque Nacional Desierto de los Leones D.F.

Propiedad hídrica	Infiltración		Kfs	Potencial de flujo mátrico	Densidad aparente	Contenido de humedad	Porosidad
	mm h <sup>-1</sup>						
	0-5 cm	5-10 cm					
Sin tratamiento	2240 <sup>a</sup> (± 454)	350 <sup>a</sup> (± 258)	426 <sup>a</sup> (± 356)	-0.08 <sup>a</sup> (±0.06)	0.74 <sup>a</sup> (± 0.02)	30 <sup>a</sup> (± 1)	37 <sup>a</sup> (± 7)
KOH 25 ppm	1333 <sup>a</sup> (± 820)	227 <sup>a</sup> (±46)	149 <sup>a</sup> (± 123)	-0.06 <sup>a</sup> (± 0.04)	0.52 <sup>a</sup> (± 0.11)	45 <sup>b</sup> (± 3)	38 <sup>a</sup> (± 9)
Al(OH) <sub>3</sub> 25 ppm	3200 <sup>a</sup> (± 2306)	273 <sup>a</sup> (±172)	410 <sup>a</sup> (± 302)	-0.07 <sup>a</sup> (± 0.1)	0.55 <sup>a</sup> (± 0.23)	39 <sup>a</sup> (± 6)	40 <sup>a</sup> (± 7)

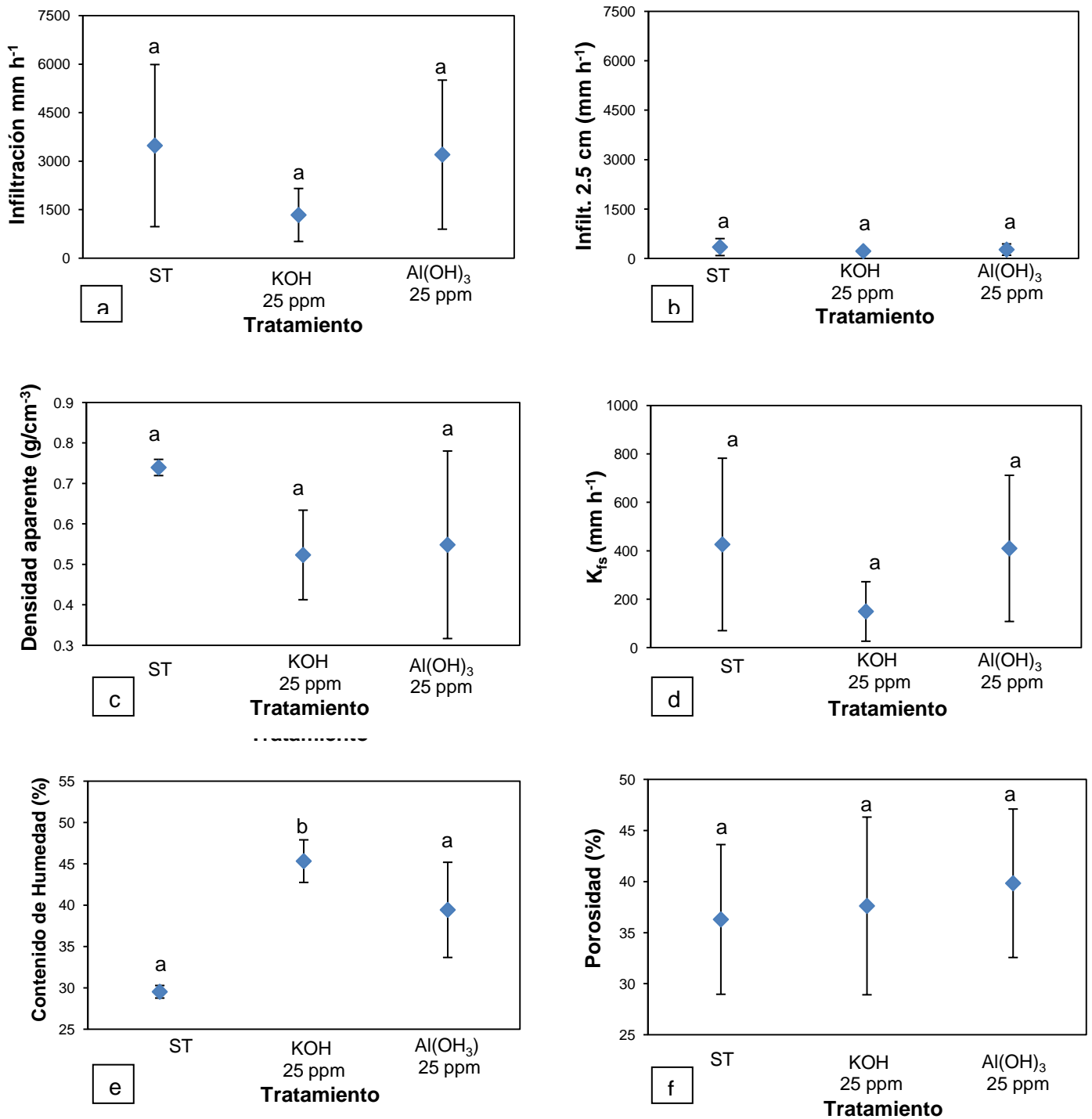


Figura 5. Efecto de la adición de KOH y Al(OH)<sub>3</sub> [25 ppm] sobre las propiedades hídricas de un suelo en el Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F. ST= Sin tratamiento. Las líneas verticales indican la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias significativas.



## Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas

**pH medido en agua.** El pH de la zona fue de 5.84. La adición de KOH [30 ppm] lo incrementó significativamente a 6.38 ( $\pm 0.17$ ;  $p=0.005$ ); en tanto, que el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm] lo redujo significativamente a 5.50 ( $\pm 0.05$ ;  $p=0.015$ ). Los tratamientos restantes registraron 5.74 ( $\pm 0.39$ ), 6.02 ( $\pm 0.23$ ) y 5.91 ( $\pm 0.14$ ) para KOH [25 y 35 ppm] y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm] respectivamente (Cuadro 9 y Figura 6a), y no se registraron diferencias significativas.

Los valores para todos los tratamientos se califican de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000 como moderadamente ácidos (Figura 6a).

**pH medido en KCl.** El  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  inicial fue de 5.61. La adición de KOH [30 ppm] lo incrementó significativamente a 6.89 ( $\pm 0.06$ ;  $p=0.006$ ), y la aplicación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25, 30 y 35 ppm] lo disminuyó de manera significativa a 5.41 ( $\pm 0.01$ ;  $p=0.028$ ); 5.28 ( $\pm 0.07$ ;  $p=0.006$ ) y 5.21 ( $\pm 0.07$ ;  $p=0.003$ ) respectivamente. Los tratamientos restantes: KOH [25 y 35 ppm] y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm], registraron valores de 5.71 ( $\pm 0.19$ ), 5.57 ( $\pm 0.007$ ) y 5.53 ( $\pm 0.15$ ) respectivamente (Cuadro 9 y Figura 6b), y no registraron diferencias con respecto a la muestra sin tratamiento.

**Nitrógeno total.** La concentración inicial fue de 0.14%, la cual aumentó significativamente con la adición de KOH [25 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25, 30 y 35 ppm] a 0.42 ( $\pm 0.18$ ;  $p=0.04$ ); 0.54 ( $\pm 0.07$ ;  $p=0.000015$ ); 0.57 ( $\pm 0.06$ ;  $p=0.02$ ) y 0.52 ( $\pm 0.21$ ;  $p=0.04$ ) respectivamente. Este incremento cambia la categoría de baja a media de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000 (Figura 6d); en tanto, los tratamientos restantes de KOH [30 y 35 ppm] y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm], conservaron la categoría baja; además, no mostraron diferencias significativas ( $0.18 \pm 0.02$ ,  $0.13 \pm 0.07$  y  $0.23 \pm 0.03$  respectivamente), como se muestra en el Cuadro 9.

**Fósforo.** El sitio sin tratamiento registró una concentración de 3.15 ppm y únicamente el tratamiento  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm], la incrementó significativamente a 5.46 ( $\pm 1.04$ ;  $p=0.002$ ). La adición de KOH [30 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm], ocasionó incrementos no significativos de P, con valores respectivos de 4.93 ( $\pm 3.15$ ); 5.46 ( $\pm 1.04$ ) y 4.04 ( $\pm 1$ ) (Cuadro 9). En tanto, los tratamientos restantes generaron una disminución significativa, con los tratamientos de KOH,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm] ( $p=0.009$ , 0.03 respectivamente).



En todos los casos las concentraciones de P se ubican como bajas de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000 (Figura 6d).

**Calcio.** La concentración inicial fue de  $8.04 \text{ cmoles kg}^{-1}$ , con la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm], disminuyó significativamente a  $0.81 (\pm 0.15 \text{ cmoles kg}^{-1}; p= 0.008)$ . Además, con  $\text{KOH}$  [25 y 35ppm] y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm], se disminuye la categoría de media a baja de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000. No obstante, estadísticamente esta disminución no es significativa. Para los tratamientos restantes no se registraron cambios significativos (Cuadro 9), ni cambios en la categoría media, según la norma citada.

**Magnesio.** La concentración inicial de magnesio fue de  $1.64 \text{ cmoles kg}^{-1}$ . La aplicación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm] la disminuyeron significativamente a  $0.05 (\pm 0.03 \text{ cmoles kg}^{-1}; p=0.003)$  y  $0.08 (\pm 0.05 \text{ cmoles kg}^{-1}; p=0.003)$ . Los tratamientos de  $\text{KOH}$  [25, 30 y 35 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [30 ppm] también disminuyen pero no significativamente. Sólo el tratamiento  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] mostró una tendencia a aumentar ( $2.20 \pm 0.32 \text{ cmoles kg}^{-1}$ ); pero no se determinaron diferencias significativas (Cuadro 9).

La adición de los tratamientos cambian la categoría de media a baja y muy baja, según la norma respectiva, a excepción del tratamiento con  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] (Figura 6f).

**Potasio.** La concentración inicial fue de  $0.23 \text{ cmoles kg}^{-1}$ . La aplicación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] la incrementó significativamente a  $0.48 (\pm 0.17 \text{ cmoles kg}^{-1}; p=0.0008)$ ; e incluso, cambia de categoría de baja a media según la NOM-021-RECNAT, 2000; caso contrario, ocurrió con la aplicación de  $\text{KOH}$  [25 ppm], que disminuyó la concentración de este elemento significativamente a  $0.08 (\pm 0.03 \text{ cmoles kg}^{-1} \text{ y } p= 0.003)$ . Los tratamientos restantes no mostraron cambios significativos.

**Sodio.** El valor de la muestra sin tratamiento fue de  $0.07 \text{ cmoles kg}^{-1}$ . La aplicación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm], la aumentaron significativamente a  $0.12 (\pm 0.02 \text{ cmoles kg}^{-1}; \pm 0.03 \text{ cmoles kg}^{-1} \text{ y } p= 0.02 \text{ en ambos casos})$ . Las concentraciones de los tratamientos restantes (Cuadro 9 y Figura 6h), no mostraron cambios significativos.



**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** El valor de CIC sin la aplicación de hidróxidos fue de 47.65 ( $\pm$  21.53), la adición de hidróxidos no afectó significativamente (Cuadro 9).

**Porcentaje de saturación de bases (PSB).** El valor inicial de PSB fue de 19.78% y con la adición de KOH y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] se redujo significativamente a 7.37 ( $\pm$  0.95;  $p=$  0.0005) y 10.35 ( $\pm$  1.22;  $p=$  0.002) respectivamente. En los tratamientos restantes, no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 9 y Figura 6j).

**Hidróxidos de K.** La adición de KOH ocasionó cambios en las propiedades químicas. La adición de KOH [25 ppm] generó una disminución significativa de  $\text{K}^+$ , lo que puede atribuirse a la disociación en dos productos del KOH:  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$ . El  $\text{K}^+$  se fijó en forma no canjeable en los huecos que forman los átomos de oxígeno de dos láminas tetraédricas contiguas; es decir, ocurrió un proceso de fijación química (Jackson, 1982; Munson, 1982 y Aguirre-Gómez, 2001). Tisdale (1991) menciona que este elemento también puede fijarse en arcillas de tipo 2:1 o en la materia orgánica.

La aplicación de KOH [30 ppm] incrementó significativamente el  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  y el  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ . Lo anterior, puede explicarse con la reacción de  $\text{H}^+$  con un grupo  $\text{OH}^-$ , para formar una molécula de agua y adicionalmente el  $\text{K}^+$  ocupa el sitio que ocupaba anteriormente el  $\text{H}^+$ , con esto la acidez potencial se abate, y la acidez real sufre una disminución equivalente (Velasco, 1983). Asimismo, el máximo incremento en el pH con este tipo de hidróxido, es atribuido a la naturaleza alcalina de K. Este incremento en el pH disminuyó la solubilidad de Al, su función de formar complejos, y por lo tanto liberación e incremento de fósforo.

La adición de KOH (25 y 35 ppm) ocasionó una disminución significativa de P, pero no modificó su categoría (baja), según la NOM. De acuerdo con Pritchett (1991) y Porta (2003), el factor limitante para la disponibilidad del P es el pH, y existe una relación de que al disminuir el pH, también disminuye la disponibilidad del P; sin embargo, en este trabajo no se detectó dicha relación.

Otro efecto adicional de la adición de KOH [25 ppm], es el incremento significativo del % de N, lo que se atribuye a que en esta concentración existe un efecto sobre las capas hidrófobas, hidrolizándolas, y permitiendo nuevamente la proliferación de bacterias

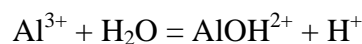


responsables de los procesos de nitrificación. Al respecto, Santander-González (2004) en bosques de *Abies religiosa*, encontró sustancias hidrofóbicas como fenoles y quinonas, en suelos afectados por incendio superficial. En tanto Rice (1974), señaló que los compuestos hidrofóbicos como los fenoles y quinonas, afectan a las bacterias responsables de los procesos de nitrificación.

**Hidróxidos de Ca.** La adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  incrementó significativamente la concentración de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , y disminuye el  $\text{Mg}^{2+}$ . El aumento en la cantidad de  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo, se debe al desplazamiento de estos por el  $\text{Ca}^{2+}$  (Tisdale, 1991). La disminución de Mg se atribuye a que posiblemente la adición de hidróxido de Ca ocasione un proceso de expansión y contracción de arcillas. En los suelos del PNDDL se detectó la presencia de esmectitas. Al respecto, Tisdale (1991) menciona que en suelos ácidos el Mg es atrapado, en las arcillas tipo 2:1, durante los procesos de expansión-contracción de este mineral.

**Hidróxidos de Aluminio.** La aplicación de  $\text{Al(OH)}_3$  [25 ppm] incrementó la concentración de  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ . La formación de complejos órgano-minerales por parte del aluminio, contribuye a incrementar la porosidad y por lo tanto una mayor cantidad de agua en los espacios intersticiales, lo que aumenta la disponibilidad de los nutrimentos; sin embargo, la disminución significativa de  $\text{Ca}^{2+}$ , permite suponer que este proceso es más complejo y debe de estudiarse con mayor profundidad y sobre una muestra de suelo uniforme (Gutiérrez-Castorena, *com. pers.*).

La adición de  $\text{Al(OH)}_3$  [30 ppm], generó una disminución significativa en el valor de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , lo que es atribuido a la naturaleza del  $\text{Al}^{3+}$ : en agua, el  $\text{Al}^{3+}$  se somete a una serie de reacciones de hidrólisis. La reacción que contribuye de manera importante a la generación de protones en la solución del suelo es:



(Bloom, 2000)

La aplicación de  $\text{Al(OH)}_3$  [35 ppm], disminuyó significativamente el valor de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  y  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  debido a la polimerización del  $\text{Al}^{3+}$  (reacción descrita anteriormente). En este caso se registró un  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  de 5.21, valor donde el aluminio es más soluble y por tanto intercambiable





(Soil Survey Staff, 1999; Huang *et al.*, 2002); además, se incrementa la acidez real y potencial, lo que ocasionó disminución significativa de la concentración de P, en esta concentración.

Por tanto, entre los cambios más significativos en las propiedades químicas del suelo después de la adición de hidróxidos se encuentran:

La aplicación de KOH [25 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25, 30 y 35 ppm] incrementó significativamente la concentración de nitrógeno en el suelo.

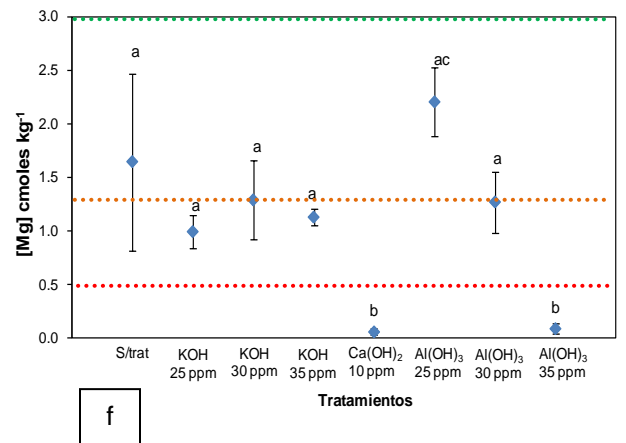
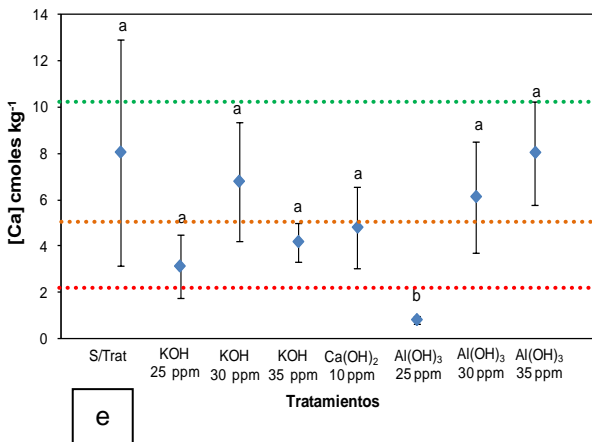
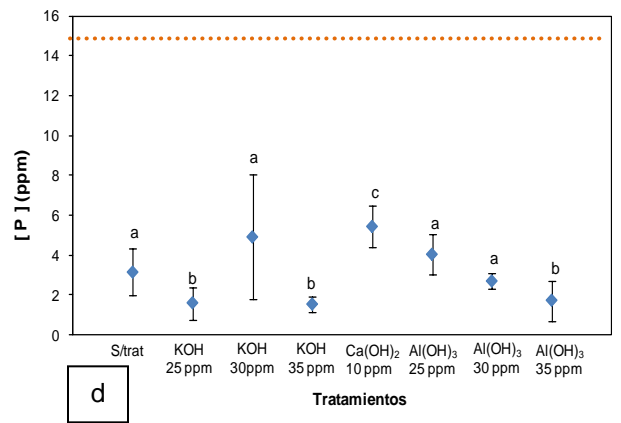
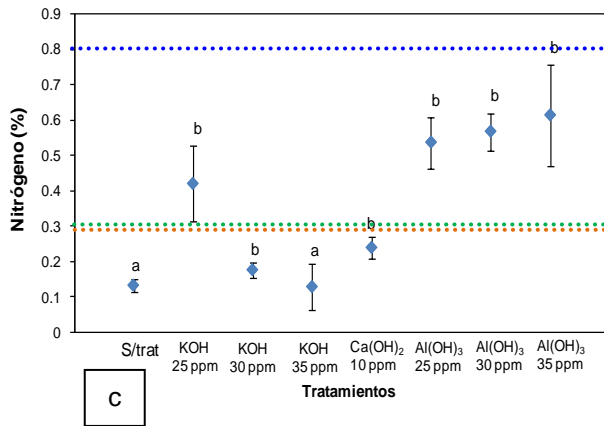
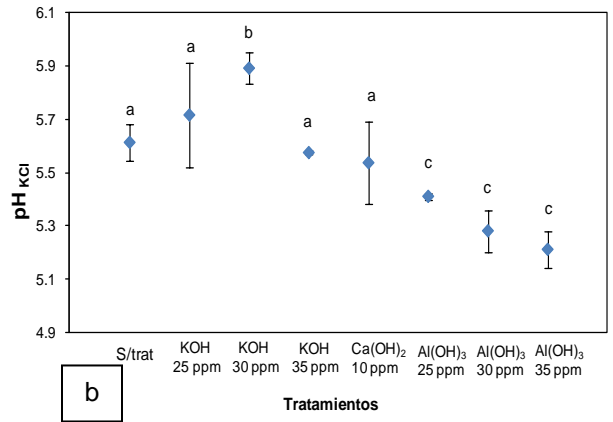
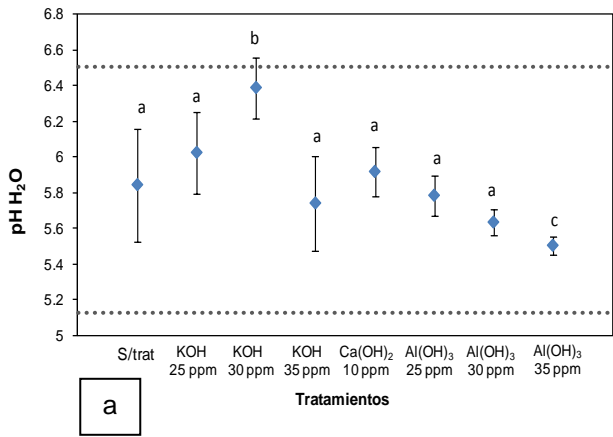
La adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25, 30 y 35 ppm] disminuyó paulatinamente el  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  y  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  debido a la polimerización del aluminio. Asimismo, la concentración de fósforo se vió disminuida con la adición de estos tratamientos, debido al decremento en el pH.

Es necesario realizar experimentos de adición de hidróxidos, sobre una muestra de suelo, para poder tener mayor certeza sus efectos sobre las propiedades químicas, principalmente sobre el N.



Cuadro 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas de un suelo en el Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F. Los números en paréntesis indican la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con una  $p < 0.05$ .

	pH H <sub>2</sub> O 1:2	pH KCl 1:2.5	Nitrógeno ----- (%)	Fósforo ----- mg kg <sup>-1</sup>	Cationes				CIC	PSB ----- (%)
					Ca	Mg	K	Na		
					cmoles kg <sup>-1</sup>					
Sin tratamiento	5.84 <sup>a</sup> (± 0.32)	5.61 <sup>a</sup> (±0.07)	0.14 <sup>a</sup> (± 0.02)	3.15 <sup>a</sup> (± 1.16)	8.04 <sup>a</sup> (± 4.88)	1.64 <sup>a</sup> (± 0.83)	0.23 <sup>a</sup> (± 0.08)	0.07 <sup>a</sup> (± 0.04)	47.65 <sup>a</sup> (± 21.63)	19.78 <sup>a</sup> (± 4.71)
KOH 25 ppm	6.02 <sup>a</sup> (± 0.23)	5.71 <sup>a</sup> (± 0.19)	0.42 <sup>ab</sup> (± 0.18)	1.59 <sup>b</sup> (± 0.80)	3.12 <sup>a</sup> (± 1.35)	0.99 <sup>a</sup> (± 0.53)	0.08 <sup>b</sup> (± 0.03)	0.05 <sup>a</sup> (± 0.03)	58 <sup>a</sup> (± 13.25)	7.37 <sup>b</sup> (± 0.95)
KOH 30 ppm	6.38 <sup>b</sup> (± 0.17)	5.89 <sup>b</sup> (± 0.06)	0.18 <sup>a</sup> (± 0.02)	4.93 <sup>a</sup> (± 3.15)	6.78 <sup>a</sup> (± 2.56)	1.29 <sup>a</sup> (± 0.37)	0.31 <sup>a</sup> (± 0.07)	0.07 <sup>a</sup> (± 0.03)	41.95 <sup>a</sup> (± 9.39)	19.83 <sup>a</sup> (± 8.27)
KOH 35 ppm	5.74 <sup>a</sup> (± 0.39)	5.57 <sup>a</sup> (± .007)	0.13 <sup>a</sup> (± 0.07)	1.53 <sup>b</sup> (± 0.39)8	4.18 <sup>a</sup> (± 0.85)	1.13 <sup>a</sup> (± 0.08)	0.18 <sup>a</sup> (± 0.04)	0.09 <sup>a</sup> (± 0.06)	29.07 <sup>a</sup> (± 11.74)	24.40 <sup>a</sup> (±10.16)
Ca(OH) <sub>2</sub> 10 ppm	5.91 <sup>a</sup> (± 0.14)	5.53 <sup>a</sup> (± 0.15)	0.23 <sup>a</sup> (± 0.03)	5.46 <sup>c</sup> (± 1.04)	4.80 <sup>a</sup> (± 1.78)	0.05 <sup>b</sup> (± 0.03)	0.32 <sup>ac</sup> (± 0.13)	0.12 <sup>b</sup> (± 0.02)	19.48 <sup>a</sup> (± 5.21)	26.92 <sup>a</sup> (± 16.49)
Al(OH) <sub>3</sub> 25 ppm	5.78 <sup>a</sup> (± 0.11)	5.41 <sup>c</sup> (± 0.01)	0.54 <sup>b</sup> (± 0.07)	4.04 <sup>a</sup> (± 1)	0.81 <sup>b</sup> (± 0.15)	2.20 <sup>ac</sup> (±0.32)	0.48 <sup>d</sup> (± 0.17)	0.12 <sup>b</sup> (± 0.03)	42.92 <sup>a</sup> (± 11.24)	10.35 <sup>c</sup> (± 1.22)
Al(OH) <sub>3</sub> 30 ppm	5.63 <sup>a</sup> (± 0.07)	5.28 <sup>c</sup> (± 0.07)	0.57 <sup>b</sup> (± 0.06)	2.69 <sup>a</sup> (± 0.39)	6.12 <sup>a</sup> (± 2.42)	1.27 <sup>a</sup> (± 0.29)	0.25 <sup>a</sup> (± 0.09)	0.09 <sup>a</sup> (± 0.02)	36.83 <sup>a</sup> (± 7.23)	20.47 <sup>a</sup> (± 5.58)
Al(OH) <sub>3</sub> 35 ppm	5.50 <sup>c</sup> (± 0.05)	5.21 <sup>c</sup> (± 0.07)	0.52 <sup>b</sup> (± 0.21)	1.72 <sup>b</sup> (± 1.00)	8.02 <sup>a</sup> (± 2.24)	0.08 <sup>b</sup> (± 0.05)	0.20 <sup>a</sup> (± 0.03)	0.10 <sup>a</sup> (± 0.02)	42.40 <sup>a</sup> (± 10.87)	19.07 <sup>a</sup> (± 6.19)



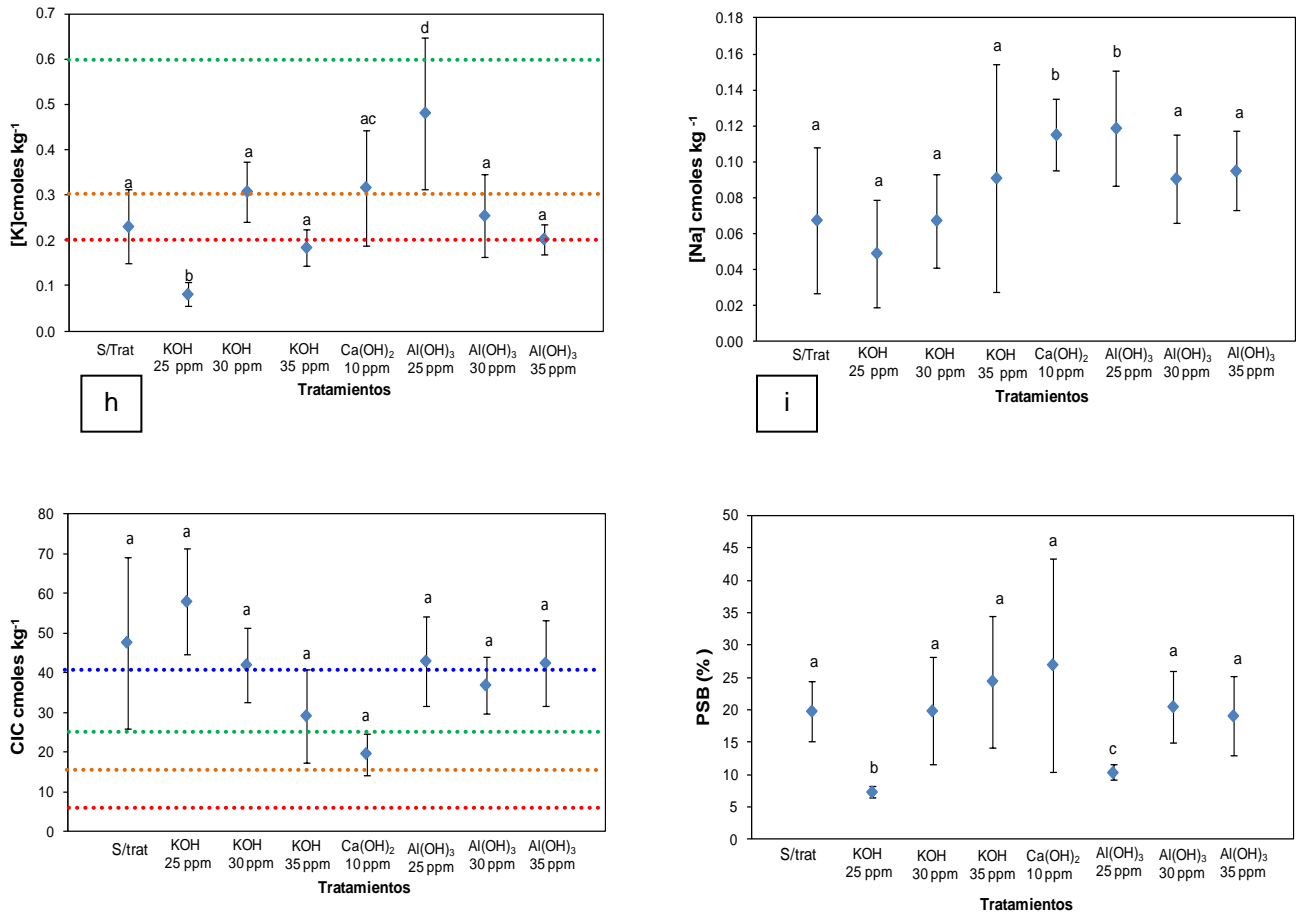


Figura 9. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades químicas de un suelo en el Parque Nacional Desierto de los Leones. Las líneas verticales muestran la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencia significativa con una  $p < 0.05$ . En a) las dos líneas punteadas indican un intervalo de pH moderadamente ácido; líneas punteadas rojas, anaranjadas, verdes y azul indican concentraciones muy bajas, bajas, medias, altas, respectivamente y de acuerdo a la NOM-021-RECNAT, 2000.



### **Efecto de la adición de hidróxidos en la mineralogía del suelo del PNDDL**

En el sitio de muestreo, la composición mineralógica dominante son feldspatos que corresponden a minerales primarios, de los cuales la anortita es la más abundante en este suelo. En menor medida se determinaron albita, magnesita, cuarzo, óxidos de fierro, calcita y en la fracción arcillosa esmectitas (Figura 7, 8 y 9 a).

Después de la adición de KOH [35 ppm], no se observaron reflexiones de minerales secundarios, cuya composición contenga  $K^+$  (Figura 7 a y b). Esta misma tendencia se observó en el DRX en muestras de suelo con la adición de  $Al(OH)_3$  [35 ppm], ya que los minerales que se esperaban registrar relacionados con el  $Al^{3+}$  (tales como gibsita, bayerita, bohemita, etc.) no se determinaron en la muestra analizada (Figura 8 a y b).

Para el caso de la adición de Ca, se presentó un ligero aumento del mineral calcita ya que los picos fueron más evidentes en este tratamiento (Figura 9 a y b).

Solamente los minerales secundarios que se registraron (y que son inherentes a la adición de hidróxidos) fueron óxidos de Fe y esmectitas. Además, la variación en intensidad de los minerales primarios, indica que a pesar de estar en una misma zona, las muestras son diferentes.

Se determinaron diferencias en las concentraciones de anortita (An) entre las muestras, debida a la variabilidad natural entre las mismas. No se registró formación de minerales secundarios relacionados con la adición de KOH [35 ppm], por lo que esta concentración es baja y no forma minerales relacionados con  $K^+$ ; por ejemplo, la illita (Thompson, 2002).

En tanto, la adición de  $Al(OH)_3$  [35 ppm] tampoco formó minerales relacionados con el  $Al^{3+}$ . Cuando las especies solubles del  $Al(OH)_3$  son adicionadas y las cadenas crecen lo suficiente, estas eventualmente precipitan como una fase sólida, que es referida a hidróxidos de aluminio pobremente cristalizados (Huang *et al.*, 2002). Este proceso no ocurrió, ya que las cantidades agregadas al suelo no son las suficientes para formar estas cadenas, y provocar su precipitación y la consecuente formación de minerales; por tanto, es probable que el  $Al^{3+}$ , se enlazara en los sitios de intercambio de la materia orgánica, la cual representa un porcentaje alto de la matriz del suelo (17.25%) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, 2000.

Además, las arcillas reportadas en el análisis de DRX son de tipo esmectitas (relación 2:1), las cuales poseen una CIC alta (80 a 150 cmoles  $kg^{-1}$ ), otorgando al suelo una alta capacidad para retener cationes (Porta *et al.*, 2003).



Por otra parte, la adición de hidróxido de  $\text{Al}^{3+}$  no formó minerales, ya que los valores de  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  disminuyeron consecutivamente con el aumento en la concentración de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Lo anterior indica que los iones  $\text{Al}^{3+}$ , se unieron al complejo de intercambio. En tanto, la presencia de dolomita puede atribuirse a su adición en tiempos anteriores, para corregir la acidez del suelo.

Los valores obtenidos de capacidad de intercambio catiónico (CIC) se complementan con la información encontrada en DRX, en donde se denota la existencia de esmectitas, las cuales tienen una fuerte capacidad para adsorber iones de carga positivos que pueden ser intercambiados. Además, el porcentaje de saturación de bases (19.87%) indica que los sitios de intercambio no están completamente saturados.

La adición de hidróxidos no genera cambios a nivel mineralógico con la adición de  $\text{KOH}$  [35 ppm],  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [20 ppm] y  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm], debido a que los pH ácidos tienden a disociar compuestos alcalinos como los utilizados en este estudio. En este caso  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ , son los cationes resultantes que unen a las arcillas (Espino-Mesa y Hernández-Moreno, 1994) o bien a la materia orgánica. En caso contrario, al agregar estos mismos compuestos alcalinos en un medio básico, estos precipitan y por tanto se logran detectar en DRX, lo que no sucedió en este estudio. Las arcillas predominantes encontradas son de tipo 2:1.

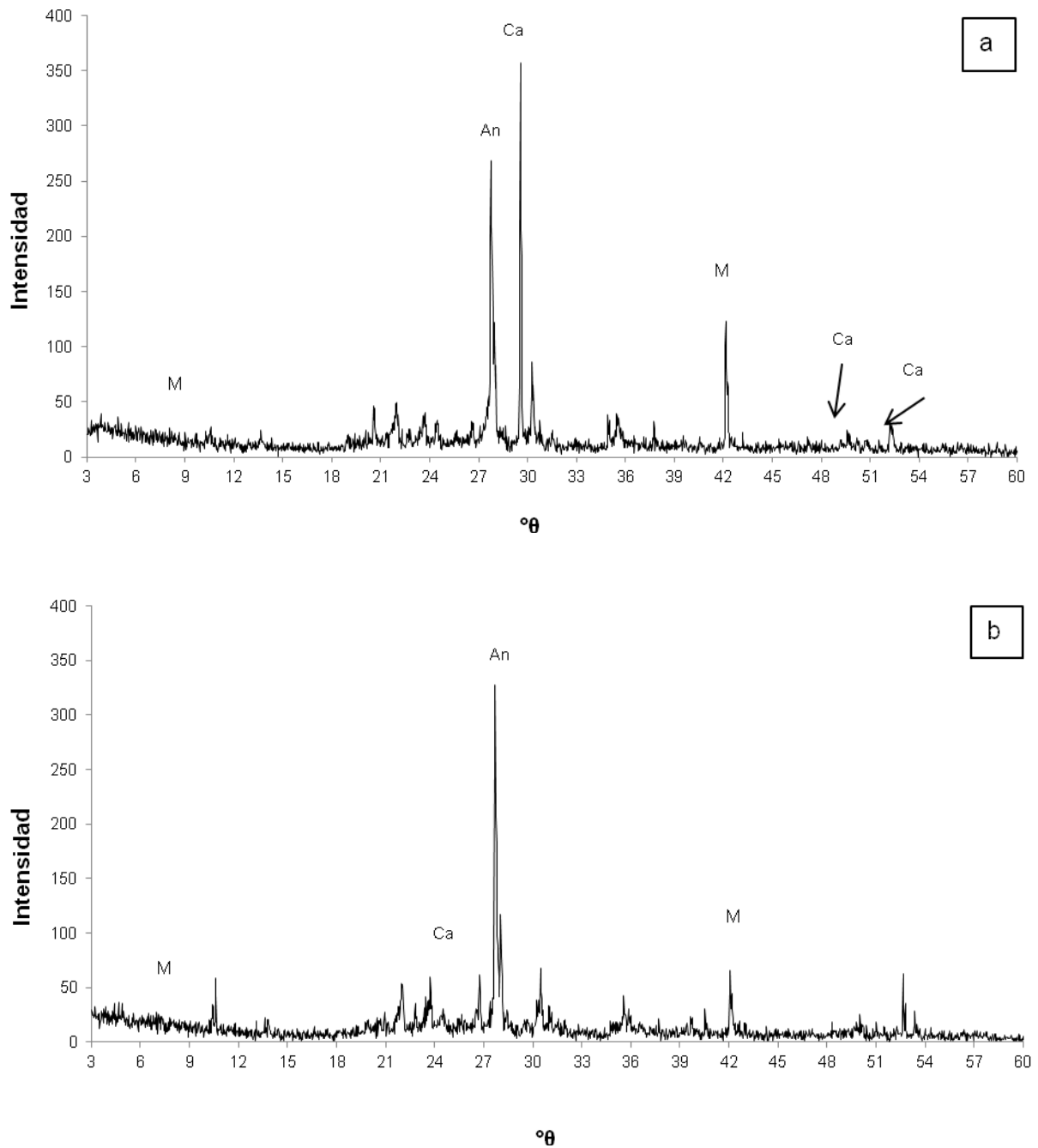


Figura 7. Efecto de la adición de KOH [35 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones. a) Muestra sin tratamiento y b) adición de KOH [35 ppm]. Los minerales dominantes son feldspatos, característicos de Andosoles. (An= Anortita; Ca=Calcita; M= micas).

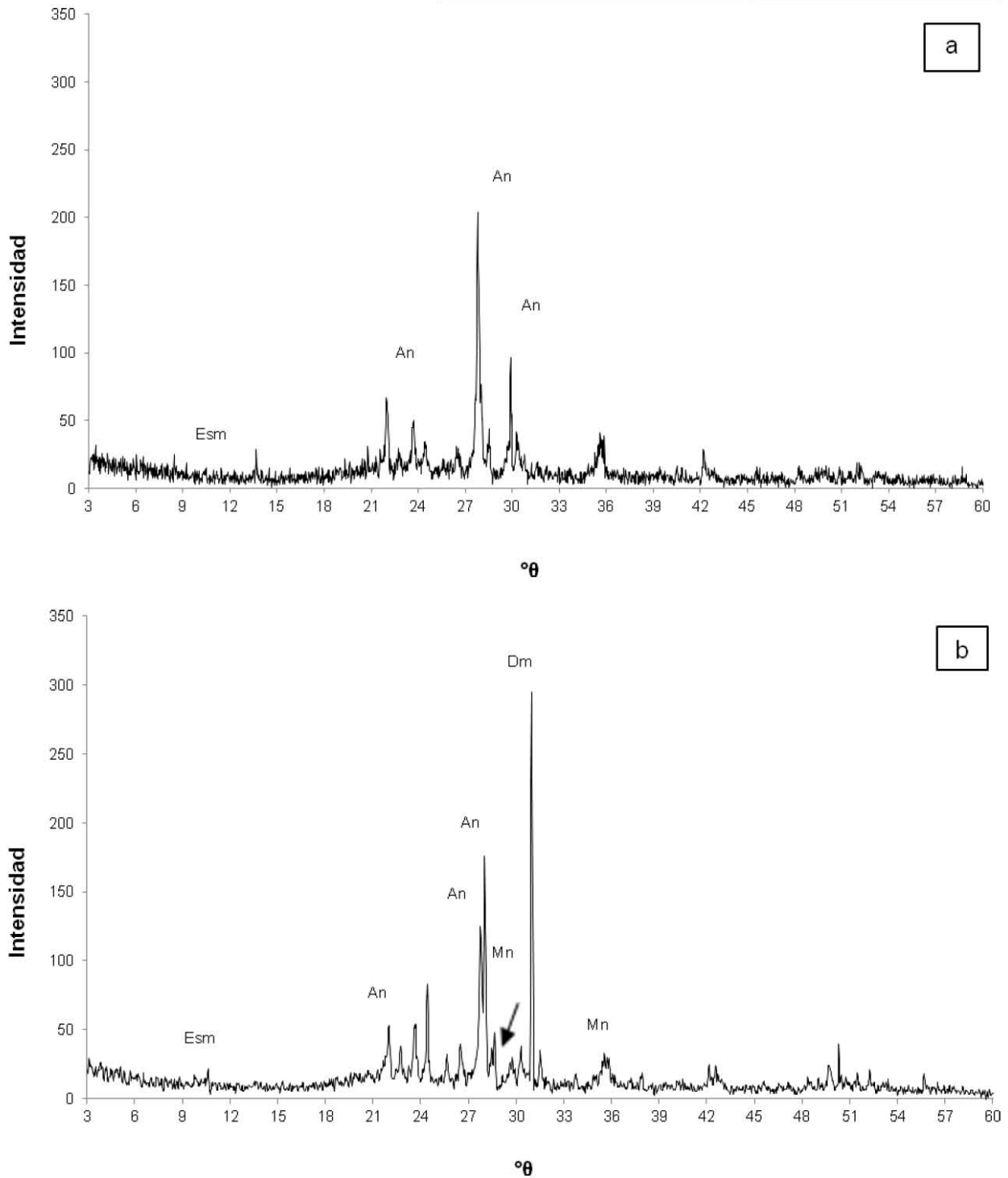


Figura 8. Efecto de la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones a) muestra sin tratamiento y b) adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [35 ppm]. Nuevamente se presentan feldespatos (An=anortita; Mn=magnesita; Dm=dolomita y además arcillas 2:1 como las esmectitas –Esm–).



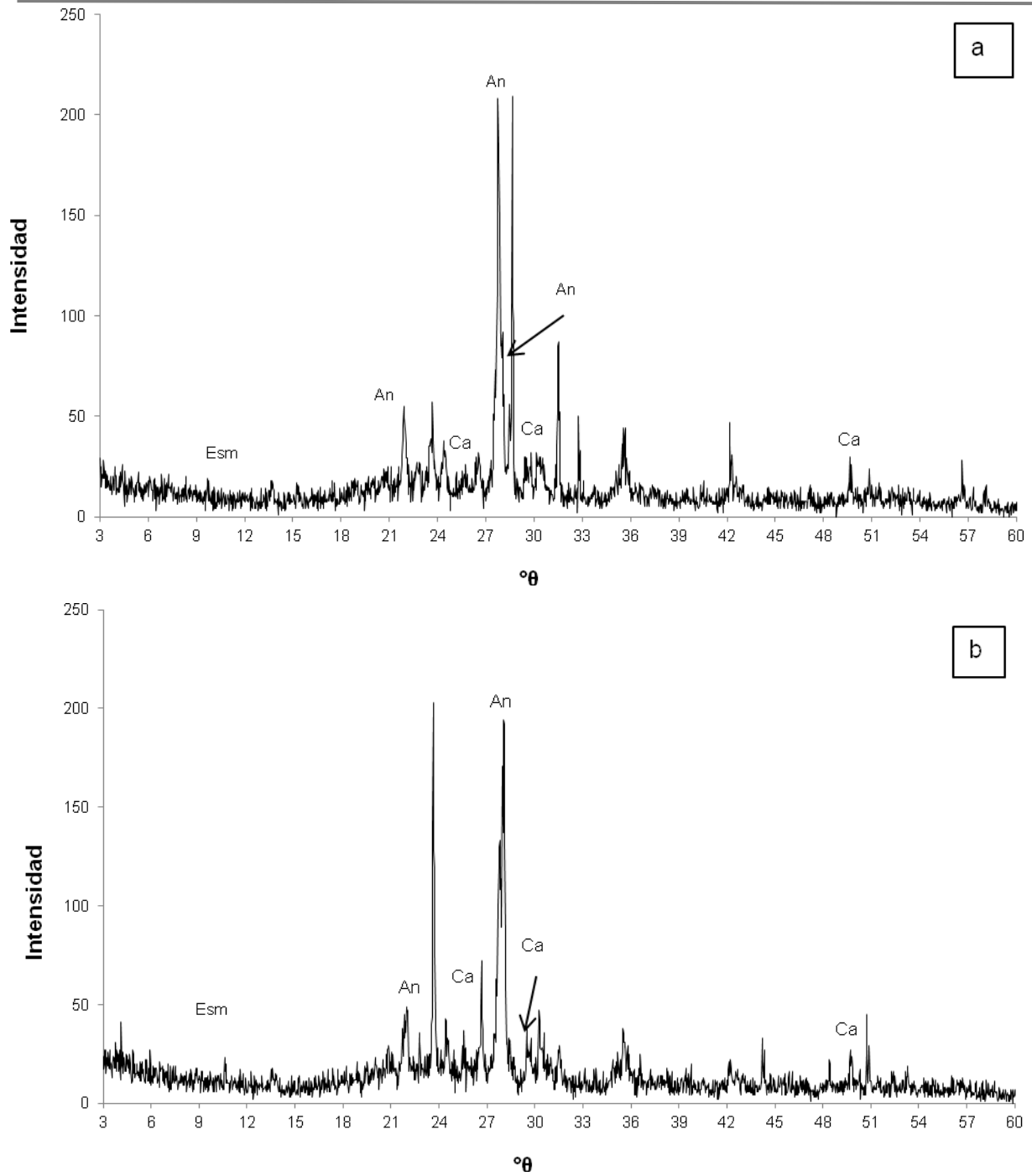


Figura 9. Efecto de la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm] sobre la mineralogía de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones. a) Muestra sin tratamiento y b) adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm]. Se nota la presencia de anortita (An); esmectitas (Esm) y calcita (Ca).



## Efecto de la adición de hidróxidos sobre la micromorfología del suelo

El suelo sin tratamiento mostró agregados del tipo de bloques subangulares. El grado de agregación es de moderado a fuertemente desarrollado, con un patrón de distribución enáulico. También mostró poros fisura y poros cavidad generalmente. Se observaron también restos carbonizados (Figura 10a y 11a-b).

Con la aplicación de KOH [25 ppm], el tipo y grado de agregación se siguen conservando al igual que el patrón de distribución; los poros tipo cavidad empiezan a ser menos frecuentes y comienzan a formarse poros de empaquetamiento compuesto (Figura 10b y 11 c-d).

La adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm], conserva el tipo, grado de agregación y el patrón de distribución. Se hacen más evidentes los poros de empaquetamiento compuesto y tienden a disminuir los poros tipos cavidad (Figura 10c y 11 e-f).

Se presentan agregados de tipo subangular, separados por pequeños poros fisuras. Las cavidades y los canales pequeños con frecuencia se presentan dentro de los agregados (Bullock *et al.*, 2004). Este tipo de estructura, es debida a perturbaciones causada por la actividad de raíces y fauna del suelo (Kimble *et al.*, 2002).

Para Andosoles, generalmente se han reportado estructuras de tipo granular (Bech-Borras *et al.*, 1977; Kimble *et al.*, 2002; y Ángeles-Cervantes, 2010). Sin embargo, para Andosoles del Valle de Bravo, México, Prado *et al.* (2007), determinaron agregados en bloques subangulares en la parte superficial del suelo.

En la zona de estudio, se presenta un patrón de distribución enáulico en donde se observa un esqueleto de partículas gruesas con agregados de material fino en los espacios intersticiales y los agregados no llenan completamente los espacios intersticiales. Al respecto, Colombo *et al.* (2007) identificaron en Andosoles de Italia, una estructura granular con un patrón de distribución de agregados, que corresponde al tipo enáulico. En el caso de Grecia, se han observado materiales indiferenciados con agregados intersticiales, patrones de distribución relacionada de tipo mónica y enáulica, también se determinaron piroclastos cubiertos por fracciones más finas (Stoops & Gérard, 2007).

Asimismo, la agregación del suelo se encuentra directamente relacionada con la materia orgánica en el suelo (Gerard, 1987); además, la presencia de ácidos húmicos más



polimerizados (grasas, ceras, ligninas, proteínas y resinas) repercuten en un mayor efecto estabilizante (Porta *et al.*, 2003).

La microestructura del suelo del suelo que contiene poros tipos fisura, explica a valores de infiltración y Kfs intermedios a los reportados por otros autores. En tanto los poros tipo cavidad son huecos cerrados sin interconexión entre ellos, estos pueden originarse tras la deformación de otros tipos de huecos por acción de la fauna, por procesos de expansión-retracción, o por compactación. El resultado es el aislamiento del hueco original que pierde la intercomunicación (Porta *et al.*, 2003).

Las fisuras son huecos planares, comunicantes y corresponden a grietas entre agregados y pueden ser el resultado de una retracción al secarse (Porta *et al.*, 2003). La ocurrencia de un incendio superficial generó compactación en el suelo y procesos de expansión-retracción, lo que puede explicar la presencia de los poros anteriormente descritos.

El aumento en la porosidad para ambos tratamientos, se debe al efecto aglutinante o cementante de los cationes  $K^+$  y  $Al^{3+}$ . En el primer caso el mecanismo de cementación ocurre cuando el material con exceso de cargas negativas es neutralizado en su mayoría por  $K^+$ , estos encajan estrechamente en los huecos que forman los átomos de oxígeno de dos láminas tetraédricas contiguas (Munson, 1985).

De la misma manera, Baver (1948) menciona que el aluminio refuerza el papel estructurante del hierro en suelos ácidos, en los que puede presentarse en formas soluble e intercambiable. Se puede afirmar entonces que, el  $Al^{3+}$  también desempeña el papel de agregante en el suelo, como lo hace el  $Ca^{2+}$  (Porta *et al.*, 2003).

Estos dos cationes unen los agregados, ocasionando una apertura en la porosidad y se generan poros de empaquetamiento compuesto. Estos se encuentran fuertemente interconectados, por lo que son funcionales frente al movimiento del agua y del aire (Porta *et al.*, 2003). Además, bajo las condiciones ácidas presentadas en este suelo, la formación de complejos humus-metal comienza a ser el proceso dominante (Arnals, 2008).



Cuadro 10. Efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades micromorfológicas de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones.

Tratamiento	Tipos de poros	Agregación	Grado de agregación	Patrón de distribución relacionado	Observaciones adicionales
S/tratamiento	Cavidad y fisuras	Bloques subangulares	Moderada a fuertemente desarrollado	Enáulica	Presencia de restos carbonizados. Poros cavidad bien definidos.
KOH 25 ppm	Cavidades de mayor tamaño, fisuras y poros de empaquetamiento compuesto	Bloques subangulares	Moderada a fuertemente desarrollado	Enáulica	Presencia de restos carbonizados. Poros cavidad menos definidos que en la muestra sin tratamiento.
Al(OH) <sub>3</sub> 25 ppm	Cavidad de mayor tamaño y fisuras. Poros de empaquetamiento compuesto	Bloques subangulares	Tiende a fuertemente desarrollado	Enáulica	Presencia de restos carbonizados. Tienden a disminuir poros cavidad y se forman poros de empaquetamiento compuesto.

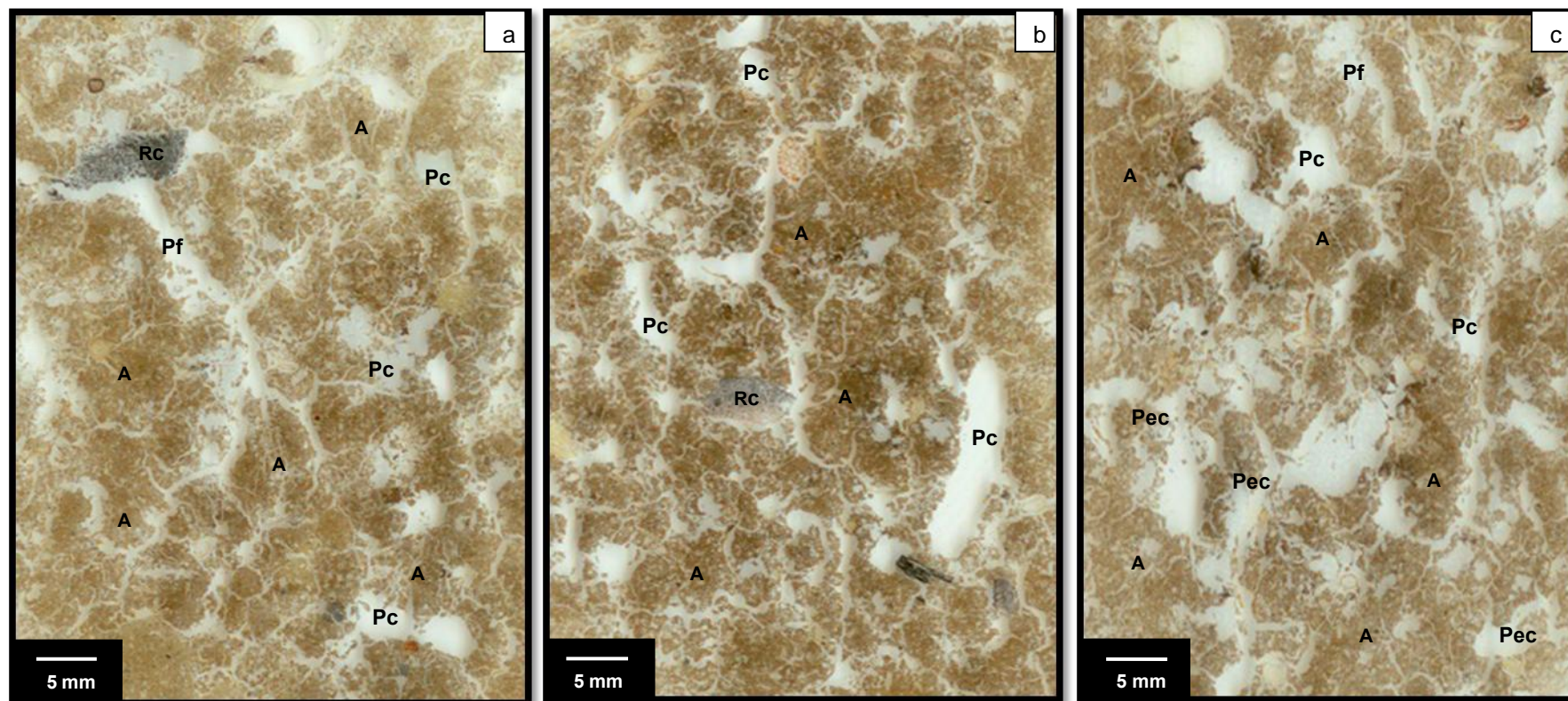


Figura 10. Secciones delgadas de suelos de un Andosol del Parque Nacional Desierto de los Leones. **(a)** Muestra sin tratamiento. Porosidad total 36%. Se observan agregados (A) de tipo bloques subangulares; **(b)** Efecto de la adición de KOH [25 ppm]. Porosidad total 38%. Se conserva la misma estructura de agregados. **(c)** Efecto de la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm]. Porosidad total 40%. A: agregados; Pc: Poros tipo cavidad; Pec: Poros de empaquetamiento complejo; Pf: poros tipo fisura y Rc: Restos carbonizados.

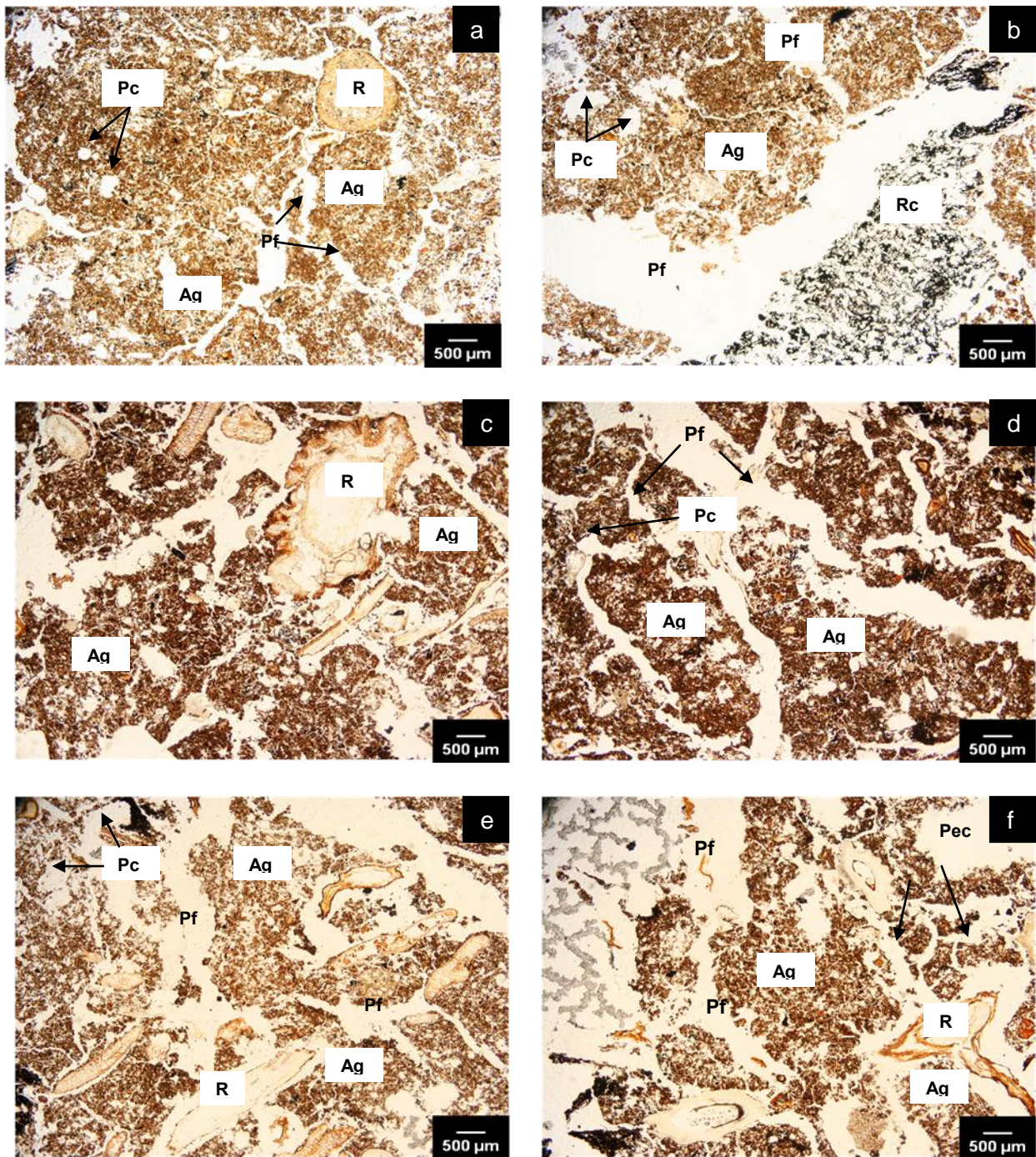


Figura 11. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la microestructura del suelo. En a) y b) se presentan muestras sin tratamiento. En c) y d) la adición de KOH [25 ppm]. e) y f) la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm]. En todas las microfotografías se muestra una estructura enáulica; agregados (Ag) de tipo subangular con grado de agregación de moderado a fuerte. Se muestran poros de tipo fisura (Pf); poros cavidad (Pc) y poros de empaquetamiento compuesto (Pec) (en algunos casos). Además se encontraron restos carbonizados (Rc), evidencia de incendios forestales.



### Efecto de la adición de hidróxidos sobre la biomasa de yemas apicales

En los individuos de *Abies religiosa* sin tratamiento, se determinó una biomasa seca de 0.12 ( $\pm$  0.06 g), y con el tratamiento de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm] se mostró un incremento significativo a 0.30 g ( $\pm$  0.15;  $p= 0.037$ ); en tanto, los individuos con tratamiento de  $\text{KOH}$  [25 ppm] y  $\text{KOH}$  [30 ppm] y  $\text{KOH}$  [35 ppm] registraron una biomasa seca de 0.2 ( $\pm$  0.06 g); 0.14 ( $\pm$  0.05 g); 0.17 ( $\pm$  0.09 g) respectivamente, con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [10 ppm] se registró una biomasa seca de 0.19 ( $\pm$  0.13 g); y para  $\text{Al}(\text{OH})_3$  a [35 ppm] de 0.17 ( $\pm$  0.09 g). Los valores anteriores no son significativos (Figura 12).

El aumento significativo en la biomasa de yemas apicales, con la adición de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [25 ppm], se atribuye al incremento en la porosidad total (40%) valor que, se acerca al mínimo requerido para *A. religiosa* (45%), (Ángeles-Cervantes, 2010). Esta especie es susceptible a estrés hídrico, por lo que, al incrementarse la porosidad del suelo se incrementan el espacio para el crecimiento de raíces y el contenido de humedad en el suelo. Además, en este tratamiento, se incrementó la concentración de N,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , lo que en conjunto triplicó la biomasa.

La adición de  $\text{KOH}$  [25 ppm] provocó un incremento no significativo en la biomasa de yemas apicales de *A. religiosa*, lo que se atribuye a que este tratamiento registró el mayor incremento significativo del contenido de humedad y en la concentración de nitrógeno. De acuerdo a Buckman y Brady (1999) el bajo contenido de humedad limita la disponibilidad de agua y nutrimentos.

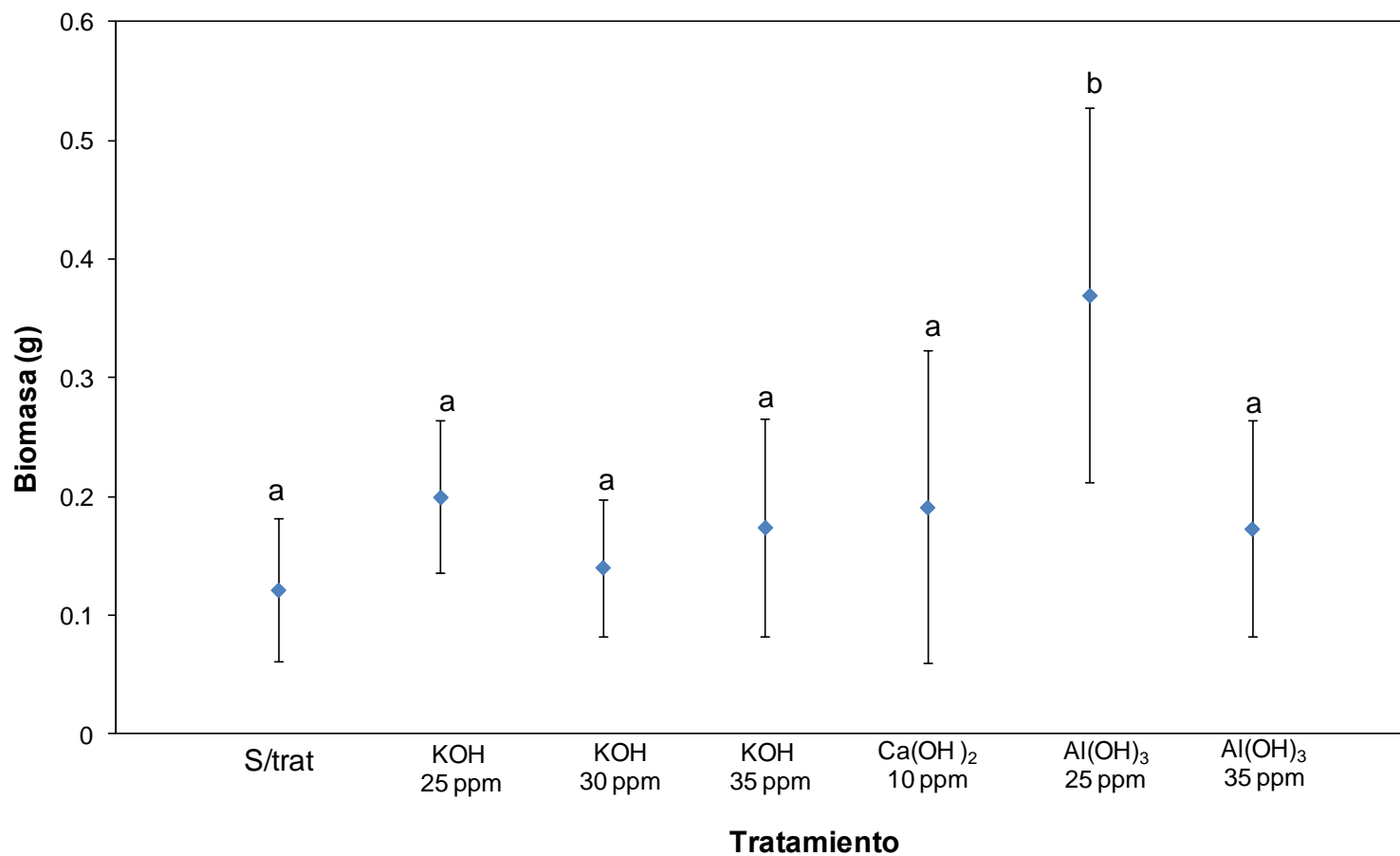


Figura 12. Efecto de la adición de hidróxidos sobre la biomasa de yemas apicales de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F. Las líneas verticales indican la desviación estándar y letras diferentes indican diferencia significativa con una  $p < 0.05$ .





## **Discusión general**

La presencia de vestigios carbonizados, en las secciones delgadas, así como la presencia de y del arbolado muerto y vivo en pie, en la zona de estudio, son evidencias de que ocurrieron incendios superficiales. Los incendios superficiales generan deshidratación de minerales, compactación del suelo, disminución de la porosidad y de las propiedades hídricas del suelo como el contenido de humedad del suelo (Ángeles-Cervantes, 2010), así como formación de sustancias hidrófobas (Santander-González, 2004).

El diagnóstico de las propiedades químicas, evidenció una baja fertilidad de los suelos. Con excepción del  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , todos los nutrimentos están en niveles bajos y el suelo presenta un pH catalogado como moderadamente ácido según la NOM-021 RECNAT, 2000. Los minerales abundantes en la zona son feldespatos, principalmente anortita, lo que explica los altos niveles de Ca y Mg.

El análisis de las propiedades hídricas, muestra que la tasa de infiltración, la conductividad hidráulica, presenta valores intermedios registrados para estos bosques (Castro-Alonso, 2009; Ángeles-Cervantes 2010). El porcentaje de espacio poroso y el contenido de humedad están ubicados en los niveles bajos, similares a los que se registran después de un incendio superficial (Ángeles-Cervantes, 2010); además, este tipo de incendios generan mortalidad masiva de arbolado (Conard y Gallina, 1997).

Por lo anterior, la función de los hidróxidos debe contribuir a la formación de agregados e incrementar el espacio poroso, disminuir las sustancias hidrófobas y adicionar un nutrimento faltante. Los análisis efectuados mostraron que el KOH y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pueden realizar estas funciones, y el menos recomendable es el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  debido a que causa toxicidad, sin embargo, su adición resultó ser la más favorable en campo y por tanto, la más recomendable; ya que incrementa significativamente la concentración de N, K y Mg; además, incrementa el espacio poroso, la retención de humedad, disminuye la densidad aparente y en su conjunto contribuyen a incrementar tres veces más la producción de biomasa.

El uso de hidróxidos debe seguirse estudiando, sobre muestras homogéneas, para fortalecer el hallazgo de que su aplicación incrementa la disponibilidad de nutrimentos y hacer aplicables estos resultados.



### **Conclusiones generales**

1. El diagnóstico ecohidrológico de la zona indica que fue afectada por incendios de tipo superficial, lo que ocasionó una reducción de la infiltración, conductividad hidráulica saturada, porosidad, densidad aparente y el contenido de humedad. La presencia de arbolado adulto muerto, indica que el incendio fue de tipo superficial, lo que generó una capa hidrofóbica la cual se encuentra a 2.5 cm de profundidad.
2. El pH de la zona se cataloga como moderadamente ácido, y con una baja fertilidad de los suelos, por la ocurrencia de un incendio superficial, el cual provoca una fijación de los nutrientes, haciéndolos menos disponibles para las plantas.
3. La aplicación de KOH [25ppm] incrementó significativamente el contenido de humedad del suelo; y la adición de Al(OH) [25 ppm] incrementa la concentración de N total, K y disminuye la concentración de  $Ca^{+2}$ .
4. La adición de hidróxidos no tuvo efecto sobre la mineralogía del suelo.
5. La adición de hidróxidos de K y Al a 25 ppm, incremento de manera no significativa, la porosidad y se formaron poros de empaquetamiento compuesto.
6. El pH del suelo mostró un mayor incremento con la adición de KOH [0.04N] (5.43-6.66).
7. La adición de Al (OH)<sub>3</sub> [25 ppm ] triplicó la producción de biomasa de yemas apicales en *A. religiosa*.
8. La adición de KOH y Al(OH)<sub>3</sub> [25ppm] restauró las propiedades hídricas del suelo y aumentó la concentración de algunos nutrientes en esta zona, lo que se vio reflejado en el aumento del crecimiento vegetal; por lo cual, la aplicación de hidróxidos representa una opción viable para mejorar las propiedades hídricas del suelo y elevar el porcentaje de sobrevivencia de individuos plantados en las reforestaciones.



## Sugerencias

- Realizar espectrofotometría de absorción atómica, para confirmar la presencia de las sustancias hidrófobas del suelo generada después de un incendio superficial, e identificar los compuestos presentes en esta.
- Evaluar el efecto de los hidróxidos sobre el porcentaje de macro, meso y microporosidad, para determinar el efecto sobre el porcentaje de retención de humedad, la cantidad de agua disponible para las plantas y espacio para crecimiento de raíces, y para determinar su relación con el flujo de agua hacia recarga de acuíferos.
- Realizar barrido de la fracción arcillosa en difracción de rayos X, para registrar el total de arcillas hidratadas en la muestra de suelo, para fundamentar la magnitud de cambio en la retención de humedad.
- Se recomienda evaluar los efectos de  $\text{Ca(OH)}_2$ , así como combinaciones de tipos de hidróxido  $\text{KOH} + \text{Ca(OH)}_2$ , sobre las propiedades hídricas, micromorfológicas y el crecimiento vegetal.
- Realizar el análisis químico en plantas, para evaluar el efecto en la translocación de elementos en la planta.
- Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos sobre la biomasa microbiana del suelo y su relación con el incremento de N.



## Literatura citada

- Aguirre-Gómez A. 2001. Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Ed. UNAM, Cuautitlán, México. pp. 289.
- Ángeles-Cervantes E. 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Texcoco.
- Arnals O. 2008. Andosols. Encyclopedia of soil science. Ed by Chesworth W. Ed. Springer. University of Guelph, Canada. pp 845.
- Alvarado-Rosales D. 1989. Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. Tesis de maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados.
- Alvarado A. y Forsythe W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* **29(1)**:85-94.
- Arbelo C.D., Rodríguez-Rodríguez A., Guerra J.A. y Mora J.L. 2002. Calidad del suelo y sucesión vegetal en Andosoles forestales de las Islas Canarias. *Edafología* **9 (1)**:31-38.
- Arshad M.A., Lowery B. y Grossman B. 1996. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: Doran JW, Jones AJ, editors. Methods for assessing soil quality. Madison, WI. pp. 123-41.
- Barral M.T., Arias M. y Guérif J. 1998. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil y Tillage Research* **46**:261-272.
- Bech-Borras J., Fedoroff N. y Sole A. 1977. Etude des andosols d'Olot (Gerona, Espagne). 3me partie: Micromorphologie. *Cahiers ORSTOM*, Serie: Pedologie **15**:381-390.
- Bernal-Salazar I.S. 2004. El papel de las variables ambientales y los contaminantes atmosféricos en la actividad cambial. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados. Campus Montecillo, Texcoco.
- Bloom, P. 2000. Soil pH and pH buffering. Hand Book of Soil Science. Eds. E. Sumner, University of Georgia. pp. 2313
- Bravo M., Fregoso L. y Medina L. 2006. Parámetros de erosionabilidad del modelo WEPP para andosoles con uso pecuario en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. *Técnica Pecuaria en México* **44 (1)**:129-141.
- Breuer y Schwertmann. 1999. Changes to hardsetting properties of soil by addition of metal hidroxides. *European Journal of Soil Science* **50**: 657-664.



- Buckman H. & Brady Nyle. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Ed. Limusa, México. pp 590.
- Bullock P., Jongerius A., Tursina T., Fedoroff N. y Stoops G. 2004. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C. y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México. pp. 154
- Buytaert W., Wyseure G., De Bièvre B. y Deckers J. 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* **19**:3985-3997.
- Calderón de Rzedowski G. y Rzedowski J. 2001. Flora fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología-CONABIO. 2a ed. México. pp 1406.
- Campos-Cascaredo A., Oleschko K., Cruz-Huerta L., Etchevers J. e Hidalgo C. 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *TERRA Latinoamericana* **19 (2)**:105-116.
- Carter C.M., Van der Sloot H.A. y Cooling D. 2009. pH-dependent extraction of soil and soil amendments to understand the factors controlling element mobility. *European Journal of Soil Science* **60**:622–637.
- 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. pp.
- Castro-Barrales C., Bauer L.I., Trinidad-Santos A. y Carrillo-González R. 2007. Cadmio, plomo, níquel y zinc en suelos del parque Desierto de los Leones. *Terra Latinoamericana*. **25(2)**:95-103.
- Conard S. y Galina I. 1997. Wildfire in russian boreal forests. Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environmental Pollution*, **98 (3)**:305-313.
- DeBano, L.F., Near, D.G. y Efolliot, P.F. 1998. Fire's Effects on ecosystems. John Wiley and Sons, Inc. EUA. pp. 333
- Diez-Hernández J.M. 2008. Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales. *Revista de Ingeniería e Investigación*. **28 (2)**:97-107.



- Domínguez-Bernal B. 2011. Levantamiento nutricional en *Abies religiosa* a lo largo de un ciclo anual en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM.
- Espino-Mesa y Hernández-Moreno. 1994. Potassium selectivity in Andic soils in relation to induced acidity, sulphate status and layer silicates. *Geoderma* **6**:191-201.
- Forsythe W. y Díaz-Romeu R. 1969. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* **19(1)**:128-131.
- Fontes J.C.; Gonçalves M.C. y Pereira L.S. 2004. Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena* **56**:145–154.
- Gabriels D., Lobo D. y Pulido M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos* **14**:7-22.
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a la República Mexicana. México.
- García-Hernández, 2003. Indicadores de la calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et. Cham. en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- García N., Krasilnikov P., Valera M. y Torres E. 2007. Suelos. En Luna, I.; Morrone J.J. y Espinosa D. (Eds). Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. UNAM, México, D.F. pp. 514.
- Gerard, C.J., 1987. Laboratory experiments on the effects of antecedent moisture and residue application on aggregation of different soils. *Soil and Tillage Research* **9**: 21-32.
- Gómez-Tagle A. 2008. Variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y la conductividad hidráulica superficial en la cuenca de Cuitzeo. Tesis doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-INIRENA. pp. 176.
- Gudmundsson T., Björnsson H. y Thorvaldsson G. 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. y Scruggs P. 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* **55**:5-24.
- Harsh J., Chorever J. y Nizeyimana E. 2002. Allofane and Imogolite. En: Dixon J. y Schulze D. Eds. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. pp. 291-320. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.



- Huang P., Wang M., Kampf N. y Schulze D. 2002. Aluminum Hydroxides. . En: Dixon J. y Schulze D. Eds. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. pp. 261-289. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Ikkonen E., Ángeles-Cervantes E. y García-Calderón N. 2004. Producción de CO<sub>2</sub> en Andosoles afectados por incendios forestales en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. *TERRA Latinoamericana* **22(4)**: 425-431.
- Ingaramo O., Paz A. y Dugo M. 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. Universidad Nacional del Nordeste.
- Ishiguro M. y Nakajima T. 2000. Hydraulic conductivity of an Allophanic Andisol Leached with dilute acid solutions. *Soil Science Society of America Journal* **64**:813-818.
- Jackson M.L. 1976. Análisis químico de suelos. Omega. 3ª ed. Barcelona, España. pp. 662.
- Lipiec J., Wójciga A. y Horn R. 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil y Tillage Research* **103**:170–177.
- López-Lopez A.B. 2010. Variación del pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- López R., Ortiz-Solorio C., Quiñones H. y Etchevers-Barra. 1988. Relación del pH en NaF con algunas propiedades químicas útiles en la caracterización de los Andosoles de la Sierra Nevada. *Agrociencias* **73**:144-158.
- Kay, B. y Anger, D. 2000. Soil structure. Hand Book of Soil Science. Eds. E. Sumner, University of Georgia. pp. 2313
- Kay B. D. y VandenBygaart A. J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* **66(2)**:107-118.
- Kimble J.M., Ping C.L., Sumner E.M. y Wilding P.L.2002. Andisols. Hand Book of Soil Science. Eds. Sumner E., University of Georgia. pp. 2313
- Kleber M., Mikutta C. y Jahn R. 2004. Andosols in Germany pedogenesis and properties. *Catena* **56**: 67–83.
- Mc-Murry J. 2008. Química orgánica. Ed. Cengage Learning. 7ª ed. México. pp 1224.



- Maderey R. L. 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Textos Universitarios 1, México.
- Manzanilla, H. 1974. Investigaciones Epidométricas y Silvícolas en Bosques Mexicanos de *Abies religiosa*. Dirección General de Información y Relaciones Públicas de la SAG. México, D.F.
- Mayen, L. 1987. Evaluación de los Efectos de Tres Tipos de Agua en el Tiempo y Porciento de Germinación de Semillas de Oyamel (*Abies religiosa*). Tesis profesional (Ing. Agrícola). FES - Cuautitlán. UNAM. México.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of the higher plants. Ed. Academic Press Limited. pp 889.
- Meza-Pérez y Geissert-Kientz. 2006. Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados *TERRA Latinoamericana* **24** (2):163-170.
- Moreno-Chávez L.R., López-López M.A., Estañol-Botello E. y Velázquez Martínez A. 2002. Diagnóstico de necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en vivero mediante el Dris. *Madera y Bosques* **8**(1):49-58.
- Munson, R. D. 1985. Potassium in Agriculture. American Society of Agronomy, Inc.
- Nakagawa T. e Ishiguro M. 1994. Hydraulic conductivity of an Allophanic Andisol as affected by solution pH. *Journal Environmental Quality* **23**:208-210.
- Nanzyo M. 2002. Unique properties of volcanic ash soils. *Global Environmental Research* **6** (2):99–112.
- Ndayiragije S. y Delvaux B. 2003. Coexistence of allophane, gibbsite, kaolinite and hydroxy-Al-interlayered 2:1 clay minerals in a perudic Andosol. *Geoderma* **117**:203–214.
- NOM-021-RECNAT, 2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaría del medio ambiente y recursos naturales, D.F., Mexico pp. 85
- Oleschko K. y Chapa, J. 1989. Structural Dynamics of a Mollic Andosol of Mexico Under Tillage. *Soil y Tillage Research*, **15**: 25-40.
- Palma M., Cram S., Boco G. y Velázquez A. Caracterización abiótica de la región de montaña del sur de la Cuenca de México. 1999. Biodiversidad de la Región de Montaña del sur de la Cuenca de México. Velázquez A. y Romero F. (Eds.) UAM y Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. pp. 351





- Panini T., Torri D., Pellegrini S., Pagliai M. y Salvador M.P. 1997. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. *Catena* **31**:199-218.
- Porta, J., Lopez, M., and Roquero, C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Editions Mundi-Prensa 2a ed. 807 pp
- Porta, J., Lopez, M., and Roquero, C., 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Editions Mundi-Prensa, 3ª ed 931 pp
- Pritchett W. 1986. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa, México. pp. 634.
- Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.L. y Collinet J. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuatorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* **45**:199-218.
- Prado B., Duwing C., Hidalgo C., Gómez D., Yee H., Prat C., Esteves M. y Etchevers J.D. 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma* **139**:300-313.
- Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Desierto de los Leones, México. 2006. CONANP-SEMARNAT. México. pp. 174.
- Reynolds W. D. y Elrick D. E. 1985. *In situ* measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph parameter. *Soil Science* **14(4)**:292-302.
- Reynolds W.D. y Elrick D.E. 1987. A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. *Soil Science* **144**:282-299.
- Rice E. 1974. Allelopathy. Academic Press. pp. 353
- Rodríguez A., Arbelo C., Guerra J. y Mora. J. 2002. Erosión hídrica en andosoles de las islas canarias. *Edafología* **9(1)**:23-30.
- Romero-Carmona J. 1986. Estudio de reconocimiento de los suelos forestales del Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. pp. 78.
- Saavedra-Romero L. 2001. Desordenes nutrimentales en rodales de *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham., del Desierto de los Leones, D.F. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. pp. 94



- Santander-González M. 2004. Caracterización de materia orgánica por espectroscopía de infrarrojo (FT-IR) y su relación con nitrógeno y fósforo en suelos post-incendio de un bosque de oyamel. Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza UNAM, México.
- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., y Broderson W.D. (editors), 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Schoenholtz S., Van-Miegroet H. y Burger J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* **138**:335-356.
- Shoji S., Nanzyo M. y Dahlgren R. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilization. El Sevier Science Publisher. pp 164-165.
- Sienko M. y Plane R. 1990. Química. Principios y Aplicaciones. McGraw-Hill. México D.F. pp. 782.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, USDA-NRCS Agric. Handb. 436. 2nd ed. U.S. Govt. Print. Office, Washington, DC
- Song K.C. e Ishiguro M. 1992. Effects of solution pH on ion transport in Allophanic Andisol. *Soil Science Plant Nutrition* **38 (3)**:477-484.
- Stoops, G. & Gerard, M. 2007. Micromorphology. In. Soils of Volcanic Regions of Europe (eds O. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, E. Garcia-Rodeja, H. Oskarsson & G. Stoops), pp. 129–140. Springer Verlag, Heidelberg (see also illustrative material in Annex 1 – Stoops, Fitzpatrick & Gerard – on the CD available with this book).
- Stoops G. 2007. Micromorphology in soils derived from volcanic ash in Europe. A review and synthesis. *European Journal of Soil Science* **58**:356-377.
- Thompson M. y Ukrainczyk L. 2002. Micas. En J.B. Dixon and S.B. Weed (eds.). *Minerals in soil environment*. 2nd ed. Soil Science Society America .1. pp. 431-466. pp 866
- Tisdale S.1991. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Ed.Limusa. México. pp.760
- Torres J. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional México. SEMARNAT-FAO, Roma.



- Vance-Borland K., Roux D., Nel J. y Pressey B. 2008. From the Mountains to the Sea: Where Is Freshwater Conservation in the SCB Agenda?. *Conservation Biology* **22** (3):505–507.
- Van Ranst E., Utami S., Verdoodt A. y Qafoku N. 2008. Mineralogy of a perudic Andosol in central Java, Indonesia. *Geoderma* 144, 379-389.
- Van-Reeuwijk L.P. 1999. Procedimientos para Análisis de Suelos (Para clasificación y correlación). Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C.; C.A. Tavares Y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México.
- Van-Reeuwijk L.P. 2002. Procedures for Soil Analysis. 6th edition. Technical Paper/International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Van der Salm C., Reinds G.J., y de Vries W. 2007. Water balancer in intensively monitored forest ecosystems in Europe. *Enviromental Pollution* **148**:201-212.
- Velasco M. 1983. Uso y manejo del suelo. Limusa. México, D. F. pp. 81-184.
- Wada K. 2002. Allophane and imogolite. En J.B. Dixon and S.B. Weed (eds.). Minerals in soil environment. 2nd ed. Soil Science Society America. pp. 1051-1087.
- Wright, H.A. and Bayley 1982. Fire Ecology. United States and Southern Canada. Ed. A. Wiley-Interscience Publication. USA. pp. 513.
- Zehetner F. y Miller W. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena* **65**:201-213
- Ziegler A., Junjiro, N., Negishi R., Sidle C., Noguchi S., Rahim Nik A. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena* **67**:89-104.