



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**ECOHIDROLOGÍA DE LOS TIPOS DE
VEGETACIÓN DEL PARQUE NACIONAL
PICO DE ORIZABA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:

ANAYELI MORA SANTIAGO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN R. ANGELES CERVANTES

ASESORA EXTERNA:

DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

México, D. F.

Marzo de 2015





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Donde te buscaré

*Señor, si no estás aquí,
¿Dónde te buscare estando ausente?
Si estas por doquier,
¿Cómo nos descubro tu presencia?
Cierto es que habitas
en una claridad inaccesible.
Pero ¿Dónde se halla esa inaccesible claridad?
¿Quién me conducirá hasta allí para verte en ella?
Y luego, ¿Con qué señales, bajo qué rasgos te buscaré?
Nunca jamás te vi, Señor, Dios mío;
no conozco tu rostro...
Enséñame a buscarte
Y muéstrate a quien te busca,
Porque no puedo ir en tu busca,
A menos que Tú me enseñes,
Y no puedo encontrarte
Si tú no te manifiestas.
Deseándote te buscaré, te desearé buscando
Amándote te hallaré y encontrándote te amaré.*

San Anselmo.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi luz y mi fuerza en todo momento.

Con cariño a mis Padres María Guadalupe Santiago Martínez y José Mora Montoya por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicional. Ustedes que tienen algo de Dios por la inmensidad de su amor, y mucho de ángel porque han sido mi guarda en todo momento, gracias por sus incansables cuidados. Porque si hay alguien que está detrás de todo este trabajo, son ustedes, que han sido y serán el pilar de mi vida.

A mis hermanas Beti y Vero, canijas aunque me hacen enojar, las 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 sé que llegaran a donde quieran.

A Sergio García Garduño, Raúl Islas Olvera, José Jorge Flores Contreras, Enrique Cedillo Liconá, Ivonne Alonso Salmerón y Julia Liconá soto; gracias por su amistad, apoyo y compañía en las diferentes etapas de mi vida algunos están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que han brindado y por todas sus bendiciones.

Agradecimientos

Al Médico Cirujano y partero Enrique Cedillo Licona por su apoyo moral y paciencia gracias “Pluma blanca”.

A mi gran amiga Sonia Ivonne Alonso Salmerón por brindarme tu amistad incondicional, por darme tu apoyo y ser mi consejera; gracias por todos los gratos momentos juntas. Te quiero amiwi!!!

A Doña Julia por su apoyo y consejos.

A la casa del Pueblo Efrén, Silver, Frías, Cesar, por motivarme siempre a alcanzar mis sueños por lo gratos momentos.

A mis amigos y compañeros de generación por muchos buenos momentos que pasé durante la carrera. En especial a mis amigos Brenda, Nancy, Páez, Melissa, Roció, Mayra, Nadia, Abigail y Carlos Molina.

A Abigail Díaz Armendáriz por su apoyo incondicional y por sus consejos.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, por su colaboración en el trabajo de campo y/o por los momentos tan agradables que se han compartido. Sandra Edith, Diana Jiménez, Tania González, Yanin, Peri, Aídee, Valeria, Adriana Vallejo, Juan Poblano, Elizabeth González, Marisol Martínez, Mayra, Nadia y Diana Moreno.

A mis amigos Sergio Garduño García, Raúl Islas Olvera, Jorge Flores Contreras, Edgar Uriel, Enrique Cedillo Licona, Ivon Alonso Salmerón, Brenda Romero, Juan Carlos Páez Reyes, Roció Frías Sevilla, Melissa García, Abigail Armendáriz, porque a pesar del tiempo y la distancia hay amistades que perduran por siempre.

A Luis Felipe porque la alegría que ha brindado a mi vida, gracias por todos los agradables momentos.

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

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 Laurita, Pedro por su cortesía durante mi estancia en el laboratorio, y al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán, por su tiempo y atención brindada hacia mí.

Al Dr. Efraín R. Ángeles Cervantes, por su paciencia, sus consejos y apoyo y sobre todo por darme la oportunidad de realizar mi tesis profesional y por transmitirme sus experiencias profesionales y conocimiento.

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

A los profesores: M. en C. Manuel F. Rico Bernal, Biol. Maricela Arteaga Mejía, Biol. Leticia por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo y sus observaciones con el fin de mejorarlo.

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

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
RESUMEN	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Ecohidrología y las propiedades hídricas del suelo	3
2.1.1 Tasa de Infiltración.....	4
2.1.2 Conductividad Hidráulica (K_{fs}).....	4
2.1.3 Potencial de flujo mátrico.....	5
2.1.4 Retención de humedad.....	5
2.1.5 Porosidad del suelo.....	5
2.1.6 Densidad aparente (D_a).....	6
2.1.7 Relación entre la D_a y la K_{fs}	6
2.1.8 Índice de repelencia e hidrofobicidad del suelo.....	6
2.1.9 Efectos de la repelencia sobre las propiedades hídricas.....	7
2.2 Micromorfología del suelo.....	7
2.3 Andosoles.....	8
2.3.1 Acidez del suelo.....	9
2.4 Servicios ambientales.....	10
2.4.1 Servicio ambiental hidrológico.....	10
2.5 Zacatonales o Praderas de alta montaña o Paramos (PAM).....	11
2.5.1 Distribución.....	11
2.5.2 Ubicación en el proceso de sucesión.....	12
2.6 Controversias científicas sobre la distribución del <i>Pinus hartwegii</i>	12
2.7 Controversias científicas en los Zacatonales o PAM y la recarga de acuíferos.....	12
2.8 Importancia hidrológica de las PAM	15

3. PROBLEMÁTICA	16
4. OBJETIVOS	17
4.1 Generales.....	17
4.2 Particulares.....	17
5. ZONA DE ESTUDIO.....	18
6. MÉTODO	
6.1 Evaluación de las propiedades hídricas	24
6.2 Determinación de acidez total y requerimientos del alcalinizante	26
6.3. Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos.	27
6.4 Evaluación de las propiedades químicas	28
6.4 Tratamiento estadístico de datos	29
7. RESULTADOS	
7.1 Evaluación de las propiedades hídricas	30
7.2 Propiedades químicas	36
7.3 Evaluación del efecto de adición de hidróxido	49
7.4 Supervivencia del <i>Pinus hartwegii</i>.....	57
8. DISCUSIÓN	
8.1 Bosque de <i>Abies religiosa</i>	58
8.2 Bosque de <i>Pinus</i>	65
8.3 Zacatonales o Pradera de alta montaña	68
8.4 Tratamientos	73
9. DISCUSIÓN GENERAL.....	74
10. CONCLUSIONES	76
11. RECOMENDACIONES	77
12. LITERATURA CITADA	78
13. ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Intervalo de K_{fs} de acuerdo con Schoeneberger <i>et al.</i> (2002)	5
Cuadro 2. Clasificación del WDPT (Water drop penetration time)	7
Cuadro 3. Intervalos de acidez por tipo de Andosol según Shoji <i>et al.</i> (1993)	9
Cuadro 4. Clasificación de la acidez del suelo (NOM-021-RECNAT-2000)	9
Cuadro 5. Especies de mamíferos registradas en el PNPO	22
Cuadro 6. Procedimiento para determinar requerimientos de alcalinizante, Velasco (1983)...	26
Cuadro7. Propiedades hídras (\pm media desviación estándar) de los diferentes tipos de vegetación del PNPO (Parque Nacional Pico de Orizaba)	34
Cuadro8. Propiedades químicas (\pm media desviación estándar) de los diferentes tipos de vegetación del PNPO	39
Cuadro 9. Análisis químico de Al y Fe de los diferentes tipos de vegetación del PNPO.....	40
Cuadro 10. Microestructura y clasificación morfológica de los poros en los diferentes tipos de vegetación del PNPO	44
Cuadro 11. Clasificación de los componentes básicos orgánicos y pedorrasgos de excrementos en los diferentes tipos de vegetación del PNPO	45
Cuadro 12. Micromorfología en los diferentes tipos de vegetación del PNPO	46
Cuadro13. Propiedades hídras (media \pm desviación estándar) sin tratamiento y con tratamiento (KOH y $Ca(OH)_2$) en el PNPO	52
Cuadro14. Microestructura y clasificación morfológica de los poros antes y después del tratamiento en el PNPO	55
Cuadro 15. Clasificación de los componentes básicos orgánicos y pedorrasgos de excrementos antes y después del tratamiento en el PNPO	56
Cuadro 16. Clasificación micromorfológica antes y después del tratamiento en el PNPO	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica del índice verde normalizado (IVN) e indicador satelital de producción primaria en plantaciones forestales y pastizales	14
Figura 2. Producción primaria neta anual para dos sitios de pastizal y sus respectivos rodales adyacentes de álamos (<i>Populus deltoides</i>) y eucaliptos (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>)	14
Figura 3. Selección del sitio de muestreo en el PNPO	18
Figura 4. Tipos de vegetación del PNPO; a) B. <i>Abies religiosa</i> ; b) B. <i>Pinus hartwegii</i> ; c) B. de <i>Pinus montezumae</i> ; d) Zacatonal o Pradera de alta montaña	21
Figura 5. Propiedades hídricas en los diferentes tipos de vegetación del PNPO	35
Figura 6. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 de los suelos del PNPO	41
Figura 7. Analisis químico de Aluminio y Hierro por el método del Oxalato ácido y Ditionito citrato bicarbonato en suelos del PNPO	43
Figura 8. Variación de la conductividad hidráulica, en los diferentes tipos de vegetación del PNPO.....	47
Figura 9. Conductividad hidráulica en bosques de Oyamel, Pino y Praderas de alta montaña en ANP de México y a nivel internacional	48
Figura 10. Secciones delgadas de muestras de suelo inalteradas, de los diferentes tipos de vegetación del PNPO	49
Figura 11. Efecto de la adición de hidróxidos (ppm), sobre la tasa de infiltración en suelos de pastizal en el PNPO (ST=sin tratamiento; K=Potasio; Ca=Calcio; Al=Aluminio)	50
Figura 12. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades hídricas	53
Figura 13. Secciones delgadas de muestras inalteradas	54
Figura 14. Procesos de saponificación en esteres	74
Figura15. Microfotografías de BARC1 (Bosque de <i>Abies religiosa</i> cañada 1) en el PNPO	88

Figura 16. Microfotografías de BARC2 (Bosque de <i>Abies religiosa</i>) cañada 2 en el PNPO	89
Figura 17. Microfotografías de BARS (Bosque de <i>Abies religiosa</i>) ladera sur en el PNPO	90
Figura 18. Microfotografías de BPHN (Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>) ladera norte en el PNPO	91
Figura 19. Microfotografías de BPHSreg (Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>) ladera sur en regeneración de 12 años en el PNPO.....	92
Figura 20. Microfotografías de BPHOreg (Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>) ladera oeste en regeneración de 12 años en el PNPO.....	93
Figura 21. Microfotografías de BPHD (Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>) ladera norte desmontado en el PNPO	94
Figura 22. Microfotografías de BPM (Bosque de <i>Pinus montezumae</i>) en el PNPO.....	95
Figura 23. Microfotografías de PAMS (Zacatonal o Pradera de alta montaña Sur) en el PNPO.....	96
Figura 24. Microfotografías de PAMN (Zacatonal o Pradera de alta montaña Norte) en el PNPO.....	97
Figura 25. Microfotografías de BPHD Bosque de (<i>Pinus hartwegii</i>) ladera norte desmontado con la adición de KOH 25ppm + Ca (OH) ₂ 15ppm en el PNPO.....	98
Figura 26. Microfotografías de PAMN (Zacatonal o Pradera de alta montaña Norte) con la adición de KOH 25ppm + Ca (OH) ₂ 15ppm en el PNPO.....	99

RESUMEN

El Parque Nacional Pico de Orizaba (PNPO) es la montaña más alta de México y funciona como captador de las precipitaciones durante los ciclones y nortes del Golfo de México por lo que sus escurrimientos forman la segunda cuenca más importante del país, la del Papaloapan y a veces los escurrimientos provocan inundaciones en los estados de Veracruz, Puebla y Oaxaca. Algunos autores como Hofstede y Scott *et al.* (1997) Estupiñan-Bravo (2002), Bregje *et al.* (2003), Celleri *et al.* (2004) y Jobbagy *et al.* (2006), señalan que los zacatonales captan y recargan más agua que los bosques de pino, los cuales evapotranspiran más agua y reducen la recarga de acuíferos, lo que contradice el papel de los bosques como captadores de agua y en la recarga de acuíferos, asimismo se ha encontrado que los zacatonales generan sustancias hidrófobas e incrementan la acidez y la disponibilidad del Al^{3+} que causa toxicidad en las plantas y forma suspensiones acuosas que limitan el movimiento del agua y por lo tanto afecta la recarga de acuíferos. Ante esta controversia este trabajo tiene como objetivos: 1) Estimar las propiedades hídricas en los diferentes tipos de vegetación del PNPO; 2) Determinar qué tipo de vegetación es la que permite una mayor recarga de acuíferos y cuál es la que genera los escurrimientos superficiales; 3) Determinar la concentración del Al^{3+} presente en el suelo de cada tipo de vegetación y 4) Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos (K^{+1} , Ca^{+2} y Al^{+3}) en el pH, las propiedades hídricas, y la supervivencia de *Pinus hartwegii*. En cada tipo de vegetación se obtuvieron de tres a cuatro registros de conductividad hidráulica e infiltración, se determinó el nivel de hidrofobicidad por el método WDPT. Se colectaron muestras de suelo para conocer su estado nutrimental, su pH real y potencial, densidad aparente y porcentaje de humedad, así como muestras de suelo inalterado para su análisis micromorfológico. Se evaluó el efecto de la adición de hidróxidos sobre las propiedades hídricas y la supervivencia del *Pinus hartwegii*. Los resultados mostraron que los bosques de *Abies religiosa* son moderadamente ácidos, presentan mayor porosidad y menor hidrofobicidad, y valores altos de infiltración, conductividad hidráulica y retención de humedad. Mientras que los suelos de bosques de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* mostraron la clase fuerte y moderadamente ácida, menor porosidad, y hidrofobicidad de fuerte a severamente repelente, lo que ocasionó que presentaran las menores tasas de infiltración superficial, Kfs y porcentajes de humedad. Los zacatonales registraron la clase moderadamente y fuertemente ácida, asimismo las propiedades hídricas mostraron ser altamente variables. El zacatonal ubicado en la porción sur registró nula hidrofobicidad y presentó los valores más altos de infiltración y Kfs, pero los ubicados en la ladera norte mostraron ser fuertemente hidrófobos y con mayor microporosidad y por lo tanto obtuvieron los menores valores de infiltración y Kfs. La concentración del Al^{3+} en los bosques y zacatonales no presentó toxicidad. El tratamiento con KOH a 25 ppm, disminuyó el nivel de hidrofobicidad y modificó la microestructura del suelo, incrementando las propiedades hídricas y por lo tanto la supervivencia del *Pinus hartwegii*. Este trabajo demuestra que los zacatonales del lado sur, los bosques de *Abies religiosa* y de *Pinus montezumae* son importantes en el servicio ambiental hidrológico, en tanto los zacatonales del lado norte y los bosques de *Pinus hartwegii* generaron una mayor cantidad de escurrimientos superficiales y que el uso de hidróxido es una alternativa viable para tener un mayor éxito en las reforestaciones.

Palabras clave: *Coníferas, hidrofobicidad, hidróxidos, pastizales, propiedades hídricas.*

1. INTRODUCCIÓN

Las montañas son origen de las cuencas hidrográficas que abastecen de agua dulce a más de la mitad de la gente del mundo; son fuentes importantes de madera, forraje y productos forestales no maderables, proporcionan alimentación a la gente de montaña, y mantienen la vida silvestre (Price-Martin, 2013).

En México, la montaña más alta es el Pico de Orizaba, con una elevación de 5640 msnm. Hidrológicamente actúa como una barrera que capta la humedad de los huracanes y vientos húmedos del Golfo de México, y sus escurrimientos forman la segunda cuenca más importante del país, la del Papaloapan (Pereyra *et al.*, 2005). Sin embargo, se desconocen las propiedades hídricas del suelo y la función de los tipos de vegetación sobre la recarga de acuíferos.

El Parque Nacional Pico de Orizaba (PN PO) presenta Andosoles, los cuales se encuentran entre los más productivos del mundo, porque presenta propiedades físicas y químicas adecuadas para el desarrollo de las plantas. Además, se caracterizan por presentar minerales pobremente cristalizados con una alta área superficial, espacio poroso alto y con carga variable, los cuales pueden modificarse cuando son expuestos directamente al sol o por incendios forestales. Cuando estos suelos se deshidratan disminuyen irreversiblemente las propiedades hídricas incidiendo en el crecimiento y mortandad de la vegetación (Ángeles-Cervantes, 2010) y reducen la función hidrológica de los bosques.

Los bosques de pino, oyamel y los zacatonales son los tipos de vegetación dominantes en el PNPO de acuerdo con la clasificación de Rzedowski (1978). Los zacatonales son zonas de recarga de acuíferos; sin embargo, también se ha encontrado que ocasionan acidez del suelo (Hofstede, 1997) e incrementan la cantidad de Al^{3+} y causa toxicidad en las plantas. Además, forman complejos órgano-minerales y limitan el movimiento del agua al propiciar la formación de suspensiones acuosas. Van der Kamp *et al.* (2009) mencionaron que los zacatonales generan sustancias hidrófobas.

Con base en lo anterior surgen las siguientes interrogantes:

- 1) ¿Qué valores presentan las propiedades hídras (conductividad hidráulica, infiltración, potencial de flujo mátrico, densidad aparente, retención de humedad) del suelo, en los distintos tipos de vegetación del PNPO?
- 2) ¿Qué cantidad de Al existe en estos suelos?
- 3) ¿Qué tipo de vegetación permite una mayor recarga de acuíferos y cuál es la que genera los escurrimientos superficiales?

La respuesta a estas interrogantes permitirá definir el papel ecohidrológico de la vegetación y a su vez conocer cuáles son las que generan mayor escurrimiento con el fin de proponer estrategias para restaurar el servicio ambiental hidrológico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ecohidrología y las propiedades hídras del suelo.

La comprensión del ciclo hidrológico en los diferentes ecosistemas hace necesario obtener información más detallada de cómo el flujo del agua se relaciona con las comunidades animales y vegetales (Janauer, 2000) y Eamus *et al.* (2007). Zalewski *et al.* (2002) y Wolanski *et al.* (2006), señalan que la ecohidrología es el estudio de las interrelaciones funcionales entre la hidrología y la biota, y se toman en cuenta los procesos, físicos, químicos y biológicos. En tanto para Tagliani *et al.* (2003) y Pickaver *et al.* (2004), la ecohidrología tiene un enfoque holístico y consideran a toda la cuenca del río como la unidad de planificación fundamental.

Por lo anterior, se puede decir que la ecohidrología es la relación del flujo del agua, entre los componentes vegetal, animal, suelo y el aire en cuencas hidrológicas. Por ejemplo, el agua de las lluvias ocasiona hidratación de plantas y animales del suelo: alimenta a los mantos acuíferos y otra parte escurre formando ríos, que influyen en las partes bajas de las cuencas en forma de manantiales, lagos entre otros (Jiménez-Cruz, 2011). El flujo de agua a través del suelo es el más importante para la recarga de acuíferos, por lo se deben estudiarse sus propiedades hídras y también cuantificar este flujo a través del balance hídrico.

El balance hídrico es la cuantificación de la precipitación, evaporación y transpiración (ET), la salida de las aguas superficiales o escorrentía (ES) y las aguas subterráneas (ST). Los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en una cuenca determinada, y la interrelación entre ellos, dan como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área (Buruca *et al.*, 2009).

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca (o cualquier masa de agua), indica los valores relativos de entrada y salida, flujo y variación del volumen de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (lluvia o nieve) realmente recibida en la superficie del suelo (P), y las aguas superficiales y subsuperficiales recibidas dentro de la cuenca (Q). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación y transpiración (ET) y la

salida de las aguas superficiales, o sea la escorrentía(ES), y las aguas subterráneas (ST) (FAO, 2000).

$$P + Q = ET + ES + ST$$

Los componentes de la ecuación del balance hídrico se pueden expresar como una altura media de agua sobre la cuenca (mm), como un volumen (m³), o en forma de caudal (m³/s). Se debe mencionar que en el balance hidrológico es importante conocer las propiedades hídricas del suelo.

Propiedades hídricas del suelo

Son las que determinan la capacidad del suelo para transmitir, conducir y almacenar agua. Además son las responsables del flujo hídrico pluvial hacia los mantos acuíferos. Las propiedades hídricas son: a) tasa de infiltración; b) conductividad hidráulica saturada (K_{fs}); c) potencial de flujo mátrico; d) tamaño y distribución de poros; e) la densidad aparente; y f) retención de humedad (Lipiec *et al.*, 2009), las cuales según Ziegler *et al.* (2006), son sensibles a los disturbios que afectan el suelo superficial.

2.1.1 Tasa de Infiltración. Es el proceso donde el agua se encuentra en la superficie pasa hacia el interior de un medio poroso (Maderey y Jiménez, 2005). Además, es el volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo. Esta variable es clave para las características físicas del suelo, al intervenir en la recarga de mantos acuíferos, en la pérdida de suelo por erosión y en la partición de la escorrentía (Ilstedt *et al.*, 2007).

2.1.2 Conductividad hidráulica Saturada (K_{fs}). Es una medida de la habilidad de un medio poroso para conducir agua, y es un parámetro esencial para solucionar problemas agrícolas, hidrológicos y ambientales relacionados con el movimiento del agua a través de suelo y estratos subsuperficiales. Otros autores la definen como la capacidad de un suelo para conducir agua y determinar la velocidad de su movimiento a través de un suelo bajo condiciones saturadas de campo

(Schoeneberger *et al.*, 2002). De acuerdo al valor de K_{fs} , se puede asignar las siguientes categorías.

Cuadro 1. Intervalo de K_{fs} de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2002)

Clasificación de la K_{fs}	Criterio estimado en $mm \cdot hr^{-1}$
Muy baja	Menor a 0.036
Baja	0.036 a 0.36
Moderadamente baja	0.36 a 3.6
Moderadamente alta	3.6 a 36
Alta	36 a 360
Muy Alta	Mayor a 360

2.1.3 Potencial de flujo mátrico (Φ_m). Es la medida de la capacidad de un suelo para almacenar agua, por fuerza de capilaridad, a través de una sección longitudinal en unidad de tiempo (Reynolds y Elrick, 1985; Castro-Alonso, 2009).

2.1.4 Retención de Humedad. Es el desplazamiento del agua a lo largo de los poros capilares y depende de la cohesión de las moléculas del líquido y de su adhesión a las paredes del capilar; un líquido que humedece a un sólido tiene mayor adhesión que cohesión. Por lo tanto, la capilaridad es un fenómeno importante para el estudio de la retención de humedad del suelo; esta última, depende de la tensión superficial del agua, de las características del suelo y del ángulo de contacto entre el agua y las partículas del suelo (Leal *et al.*, 2002).

2.1.5 Porosidad del suelo. Es una de las propiedades del suelo con mayor importancia, ya que varios procesos tales como el movimiento del agua, la capacidad de retención del agua y su disponibilidad para las plantas, dependen de su tamaño, distribución, continuidad y porcentaje de poros dentro del perfil. La porosidad total es la fracción del volumen del suelo ocupada por los componentes líquido y gaseoso. Existen dos clases principales de poros según sus dimensiones: poros grandes no capilares y poros pequeños capilares. Los primeros no retienen el agua por capilaridad, los segundos sí efectúan retención. Cuando un suelo está saturado de agua, el conjunto de sus vacíos (porosidad total) está lleno de agua, y escurre por gravedad de los espacios más grandes y entonces se llenan de aire (fracción

gaseosa). Cuando el suelo cesa de escurrir, el conjunto de espacios llenos de aire constituyen la macroporosidad (no capilar). Los espacios más pequeños o capilares retienen aún el agua y su volumen representa la microporosidad o porosidad capilar (López, 2000).

2.1.6 Densidad aparente (D_a). Es una propiedad que se utiliza principalmente para calcular la porosidad total del suelo y en estudios de relación suelo-agua (Forsythe *et al.*, 1969). Está incluido 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. Los 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. Cuando esta propiedad incrementa también, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir; con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos (Ingaramo *et al.*, 2003).

2.1.7 Relación entre la D_a y la K_{fs} . Presentan una relación inversa; es decir a valores más bajos de D_a se presentan los valores más altos en conductividad hidráulica. Un aumento en la densidad aparente trae como consecuencia una disminución en el volumen total de poros y se relaciona en gran medida con suelos compactados, lo cual genera que suelos con estas características presenten una baja conductividad hidráulica por la falta de un espacio poroso de mayor tamaño donde se permita la movilidad del agua (González-Vargas, 2011).

2.1.8 Índice de repelencia e hidrofobicidad del suelo. Es el resultado de una sustancia cerosa derivada del material de una planta quemada durante un incendio. La sustancia cerosa penetra en el suelo como un gas y se solidifica después de enfriarse, formando un recubrimiento ceroso alrededor de las partículas del suelo. Los suelos con esta característica reducen su capacidad de infiltración de agua (USDA, 2000).

Shakesby *et al.* (2000) señalan que la hidrofobicidad en los suelos generalmente tiende a incrementarse durante las estaciones secas y a decrecer o a desaparecer completamente, después de fuertes precipitaciones o durante periodos extensos con altos contenidos de agua en el suelo.

Rodríguez-Gelòs(2008) menciona que la hidrofobicidad se induce cuando la temperatura se encuentra en un rango de 175-250° y desaparece alrededor de los 279-300°.

King (1981) definió que un suelo arenoso y seco al aire es hidrofóbico, cuando una gota de agua colocada en su superficie tarda más de 10 segundos en infiltrar. Duque-Zapata *et al.* (2004) mencionan que el nivel de hidrofobicidad o de persistencia a la repelencia al agua se determina aplicando en campo el método WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación del WDPT de acuerdo con Dekker *et al.* (1990).

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

2.1.9 Efectos de la repelencia sobre las propiedades hídricas. Según Doerr *et al.* (2000) y Jaramillo (2006), la hidrofobicidad reduce la infiltración y la disponibilidad de agua para las plantas; incrementa la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión; además, deteriora su estructura y generar grandes pérdidas en la producción agropecuaria y forestal, por lo cual es importante determinarla para programar actividades hidrológicas, agrícolas pecuarias o forestales.

2.2 Micromorfología del suelo

Es el estudio del suelo, a escala microscópica, por medio de preparados de muestras de suelo no alteradas, denominadas secciones delgadas del suelo o secciones finas. El lado descriptivo de la micromorfología es indispensable por varias razones: (a) 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; (b) para establecer las bases en la reconstrucción de los procesos que han ocurrido o se están desarrollando en los suelos; (c) para proporcionar bases sólidas en la clasificación de los suelos ya sea como propósitos generales o específicos; (d) para comparar las propiedades de diferentes suelos dentro de un orden, un suborden o un gran grupo o aún niveles inferiores del sistema de clasificación tales como las series de los suelos; y (e) 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).

El estudio de la micromorfología del suelo, principalmente sobre la forma y distribución de los agregados y los poros, se basa en el análisis de secciones delgadas preparadas a partir de muestras no alteradas del suelo y es un método que se utiliza actualmente para evaluar los efectos de los diversos factores ecológicos (fauna, lluvia, cultivos, sequías) sobre las propiedades hídricas del suelo (Ángeles-Cervantes 2010).

2.3 Andosoles

Los Andosoles son suelos altamente productivos, se asocian con materiales volcánicos y a partir de procesos de intemperismo generan minerales con estructura cristalina de bajo orden (Taxonomía de Suelos, 2010).

Son suelos minerales que tienen un horizonte vítrico o un horizonte ándico (Prado *et al.*, 2007). Las propiedades andicas resultan del intemperismo moderado de depósitos de materiales principalmente piroclásticos y pueden encontrarse tanto en la superficie como subperificalmente. García *et al.* (2007) reconocen dos tipos de propiedades ándicas: una, en la cual el alófono y minerales similares son predominantes (el tipo sil-ándico); y otra, en la cual prevalece el aluminio complejado

por ácidos orgánicos (el tipo (alu- ándico). Las propiedades sil- ándica tienen una reacción de acida a neutra; mientras que las propiedades alu-ándica varían de extremadamente acida a acida (WRB, 2006).

2.3.1 Acidez del suelo. El potencial de hidrógeno (pH) se mide en una solución del suelo y agua con lo que se mide la acidez activa. En los suelos también existe una reserva de acidez intercambiable (o potencial), que en suma proporciona la acidez total de un suelo. La mayor parte de los suelos forestales tienen una reserva sustancial de acidez potencial que 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 nutrientes (Pritchett, 1986).

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 3.

Cuadro 3. Intervalos de acidez por tipo de Andosol según Shoji *et al.* (1993).

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

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

Cuadro 4. Clasificación de la acidez del suelo.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	Menor a 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	Mayor a 8.5

En general, es importante determinar las propiedades hídricas y químicas del suelo porque también influyen en el servicio ambiental hidrológico y en la productividad de los bosques.

2.4 Servicios Ambientales

Son los beneficios que la sociedad humana recibe de los diferentes ecosistemas forestales, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable. A nivel local, regional o global, estos servicios dan vida, generando beneficios y bienestar para las personas y las comunidades (CONAFOR, 2012).

Los servicios ambientales son condiciones y procesos naturales “incluyendo las especies y los genes” que la sociedad puede utilizar y que ofrecen las áreas naturales por su simple existencia. Dentro de este conjunto de servicios se puede señalar la existencia de biodiversidad, el mantenimiento de germoplasma con uso potencial para el beneficio humano, el mantenimiento de los valores estéticos y filosóficos, la estabilidad climática, la contribución a ciclos básicos (agua, carbono y otros nutrientes) y la conservación de suelos entre otros.

2.4.1 Servicio ambiental hidrológico. Es aquel que resulta del ciclo hidrológico, producto de la capacidad del ecosistema para captar agua y así mantener la oferta hídrica disponible para el beneficio de la sociedad. Por lo tanto, la disponibilidad de

agua depende de la capacidad de los ecosistemas de realizar procesos biogeoquímicos vinculados a la regulación hidrológica así mismo. La disponibilidad de este limitado recurso está en función de la magnitud del consumo humano y del impacto de las actividades de manejo en el ecosistema. Esta función de los ecosistemas se ha visto gravemente afectada por los procesos de deterioro que presentan los ecosistemas provocando que el abastecimiento y acceso de agua a nivel local y mundial se vea drásticamente disminuido (Revenge *et al.*, 2000).

Entre los servicios hidrológicos más importantes se encuentran:

- La regulación de la calidad y cantidad de agua.
- La minimización de ciclos e inundaciones y sequía.
- La generación, protección y mantenimiento de suelos y sus nutrientes.
- La regulación del clima a escalas locales y regionales.
- La estabilización del paisaje, con el fin de evitar deslaves y azolve de los ríos.

Uno de los tipos de vegetación que se consideran importantes en el servicio ambiental hidrológico son los zacatonales o praderas de alta montaña y los bosques.

2.5 Zacatonales o Praderas de alta montaña

Es el ecosistema más representativo de la colonización, adaptación y evolución de la flora en un ambiente tropical frío de origen relativamente reciente. Este tipo de vegetación se encuentra en las montañas más elevadas, justo debajo de la zona de las nieves perpetuas o glaciares, pero por encima del límite de la vegetación arbórea. El factor ecológico más importante para su distribución es la baja temperatura (entre 3 y 5° C, con heladas o nevadas casi todo el año). El límite superior de esta comunidad vegetal se sitúa alrededor de los 4300 msnm, aunque algunos elementos florísticos crecen más allá de los 4500 msnm. Se desarrolla bajo las siguientes características climáticas: precipitación promedio anual entre 600 y 800 mm, aunque un considerable porcentaje de la misma cae en forma de nieve, esta no permanece por largos periodos sobre el suelo. No hay permafrost, pero en las noches se congela con frecuencia la capa superficial (Rzedowski, 2006).

2.5.1 Distribución. En México se encuentra en la parte superior de vegetación en los PN Pico de Orizaba, la Sierra Negra, el PN Cofre de Perote, PN Nevado de Toluca, PN Cumbres del Ajusco, PN Iztapopo, y en el PN la Malinche (Castillo, 2003). Este tipo de vegetación, tiene representación a nivel mundial.

Actualmente, se encuentran entre la Cordillera de Mérida en Venezuela, hasta la depresión de Huancabamba en el norte del Perú y la franja oriental de los Andes en Bolivia, Argentina, Colombia y Ecuador. Existen praderas de este tipo en el este de África (Etiopía, Uganda, Kenia y Tanzania) y sobre algunas montañas en Oceanía (Nueva Guinea) (Congreso Mundial de Paramos, 2002).

2.5.2 Ubicación en el proceso de sucesión. Rzedowski (1978) considera que los zacatonales son comunidades relictuales secundarias, cuyo clímax corresponden probablemente al pinar y que en el pasado ocupaban extensiones mayores. El estudio de la relación vegetación-suelo-agua disponible, en las praderas de alta montaña es importante para poder explicar su distribución y abundancia de pinares, oyametales y zacatonales en las altas montañas, ya que existen controversias al respecto (Jiménez-Cruz, 2011).

2.6 Controversias científicas sobre la distribución del *Pinus hartwegii*. México es el país con mayor diversidad de pinos en el mundo. Sin embargo, esta diversidad se ha visto, sobre todo en los últimos años, seriamente amenazada.

El bosque de *Pinus hartwegii* es poco denso y monoespecífico en su estrato arbóreo; además, sus semillas han perdido notablemente su viabilidad y registran un porcentaje muy bajo (menor a 10%) de germinación.

- a) Una posible explicación es que debido a que las poblaciones de esta especie están aisladas, la acumulación de alelos recesivos letales o genes deletéreos recesivos inducen una alta tasa de cruzamientos consanguíneos, por lo que son el factor que causa la muerte selectiva de los embriones, la reducción del vigor y las tasas reproductivas.
- b) Por otra parte, también se ha mencionado que en estos bosques, el aumento de la temperatura en los últimos 100 años, los niveles mayores de dióxido de carbono en la atmósfera, las variaciones en las precipitaciones y la frecuencia de

eventos climáticos extremos están causando una reducción de 10.6% en el crecimiento relativo de la especie (Ricker *et al.*, 2007).

- c) También se ha encontrado que los zacatonales generan mayor acidez del suelo y sustancias hidrófobas, lo que causa la disminución de la humedad disponible para la vegetación y los pinares no pueden desarrollarse.

2.7 Controversias científicas sobre los Zacatonales o PAM y la recarga de acuíferos. Algunas investigaciones mencionan que los pastizales favorecen la disponibilidad, infiltración y recarga de acuíferos; mientras que las plantaciones de coníferas disminuyen la disponibilidad de agua, por lo que se está proponiendo destruir bosques porque son nocivos para la recarga de acuíferos. Estas investigaciones no han considerado el almacenamiento de agua por las plantas y por el suelo, ni tampoco han considerado las propiedades hídricas del suelo, las cuales requieren investigarse con mayor profundidad.

En Colombia, Estupiñán-Bravo (2002) realizó una investigación en pastizales de alta montaña (Páramos) de Gachaneca, y encontró que las plantaciones de pino ejercen un efecto negativo en estos ecosistemas. Mediciones efectuadas dentro del páramo y en plantaciones derivadas de este registraron disminuciones de MOS (Materia orgánica del suelo) (de 33.7 a 22%), fósforo 16.8 a 13.9 mg·Kg⁻¹; N de 0.013 a 0.09%, Da de 0.99. g·cm³ a 0.22 g·cm³ pero también se registraron incrementos en humedad de 7 a 22.2% respectivamente.

En Ecuador, en el Páramo El Ángel, Hofstede (1997) afirmó que el pino, durante su crecimiento, consume demasiada agua y disminuye el rendimiento hídrico, secando finalmente el suelo. Este autor obtuvo valores de MOS de 42% en páramo no alterado y 28% dentro de las plantaciones y N de 0.016 % en páramo y 0.0017 % en plantaciones.

Céleri *et al.* (2004) realizaron un monitoreo en dos microcuencas con diferente cobertura: pastizal y pino, en la ciudad de Cuenca, Ecuador. La conclusión fue que la respuesta en tiempo, a un determinado evento de lluvia, es similar en las dos microcuencas; es decir, los mismos procesos hidrológicos son los que están presentes o la regulación del agua en el suelo no cambio. Sin embargo, el caudal

especifico mínimo de la cuenca del pastizal es aproximadamente tres veces más alto con respecto a la cuenca con pinos, debido al mayor consumo de agua por evapotranspiración de parte de los pinos.

Cavelier y Santos (1999) indican que las plantaciones pueden tener efectos neutros o positivos en el suelo ya que obtuvieron los siguientes resultados; en muestras de suelos bajo plantaciones de pinos y pastizales registraron incrementos en pH 5.53 a 5.76, Ca^{2+} 5.73 a 10.8 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mg^{2+} 2.3 a 2.4 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, K^+ de 0.36 a 0.93 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, y Na^{2+} de 0.033 a 0.036 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

En cuanto a los efectos sobre la vegetación, Bregje *et al.* (2003) concluyeron que la forestación con *Pinus patula* tiene una influencia negativa fuerte sobre la diversidad y composición de la vegetación del páramo, donde se registraron 121 especies de plantas vasculares; mientras que en plantaciones con *Pinus patula* se encontraron 76 especies de plantas vasculares. Se sugiere que la cobertura de *Pinus patula* muestra un impacto significativo en los patrones de especies.

Con respecto a la hidrología, Jobbágy *et al.* (2006) realizaron mediciones de campo y satelitales muestran que la productividad primaria de las plantaciones forestales superó a la de los pastizales (Figura 1 y 2). Este aumento se dio por una mayor evapotranspiración y un menor rendimiento hidrológico que redujo a la mitad el caudal de cuencas forestadas en Uruguay, y de acuerdo con lo observado en 26 pastizales forestados de todo el mundo.

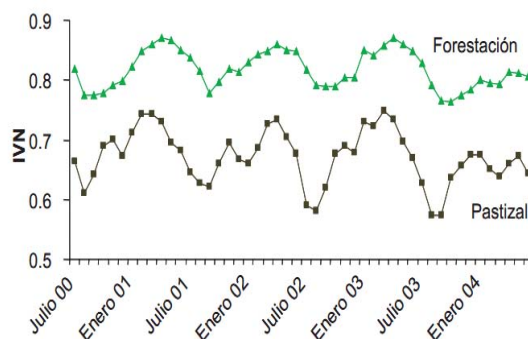


Figura 1. Dinámica del índice verde normalizado (IVN), Indicador satelital de producción primaria, en plantaciones forestales y pastizales. Se utilizaron datos mensuales derivados de la plataforma MODIS.TERRA con una resolución espacial de 250 x250m.

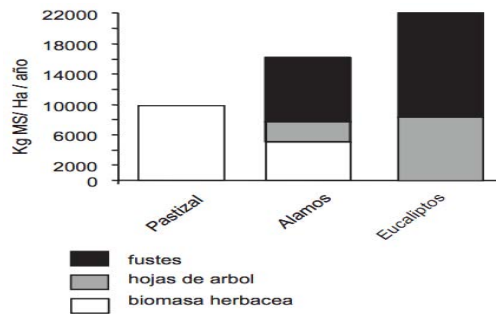


Figura 2. Producción primaria neta anual para dos sitios de pastizal y sus respectivos rodales adyacentes de álamos (*Populus deltoides*) y eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis*). Se indica dentro de cada barra la fracción que corresponde a biomasa herbácea (fustes, hojas de árbol y biomasa herbácea).

En Sudáfrica, Scott y Lesch (1997) realizaron una forestación en pastizales con pinos y eucaliptos y se mostró que los eucaliptos causaron reducciones máximas de 470 mm en los años séptimo y noveno de la rotación; en tanto, los pinos causaron reducciones máximas de 205 y 257 mm en los años XIX y XX de la rotación además, provocaron que la corriente se secase por completo en el año duodécimo de la siembra.

Un estudio realizado por Klaassen *et al.* (1996) mostró que la velocidad del viento tiende a aumentar alrededor de claros en el bosque, resultando en un incremento en la velocidad de evaporación. Estas condiciones podrían promover y acelerar la evaporación del agua interceptada en las partes de la parcela y registrarse donde hay una cubierta completa.

Con base en las investigaciones citadas se puede inferir que las plantaciones de pinos ejercen efectos negativos; sin embargo es importante señalar que la evapotranspiración es por el agua que acumulan los arboles durante varios años y no por el año inmediato, además no se han evaluado las propiedades hídricas del suelo (Infiltración, Potencial de flujo mátrico, Conductividad hidráulica) las cuales son de vital importancia para obtener mayores fundamentos sobre el papel de los pinares y pastizales en la hidrología de una zona.

Es necesario señalar que en México, los resultados de Castro-Alonso (2009) muestran que los bosques de *Abies-Quercus* son los que tienen mayor K_{fs} de 3276 $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, Infiltración de 16,920 a 23,760 $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y Φ_m de 1.13 $\text{cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$.

2.8 Importancia hidrológica de las praderas de alta montaña.

Las PAM tienen un gran potencial de almacenamiento y regulación hídrica por lo cual han sido considerados ecosistemas estratégicos (Congreso Mundial de Paramos, 2002).

Para Estupiñán-Bravo (2002) el páramo tiene un valor ecológico muy alto, especialmente por su función hidrológica; esta función es garantizada cuando el suelo es poroso, con buena cobertura vegetal y alto contenido de materia orgánica, de modo que puede retener grandes cantidades de agua

3. PROBLEMÁTICA

El Parque nacional Pico de Orizaba (PNPO) es la montaña más alta de México, y es la barrera que intercepta los huracanes y masas de aire húmedo del Golfo de México, por lo que tiene una gran importancia hidrológica: sin embargo, se desconocen las propiedades hídricas de los suelos en los que se desarrolla diferentes tipos de vegetación. Por las inundaciones que ocasiona en la cuenca del Papaloapan, se sugiere que esta zona presenta problemas en las propiedades hídricas del suelo, debido a la acidez e hidrofobicidad. Por otro lado la vegetación de *Pinus hartwegii* es considerada como una zona de recarga de acuíferos, por lo que hace necesario realizar investigaciones sobre las relaciones entre las propiedades hídricas del suelo y el tipo de vegetación, para que permitan proponer estrategias de recuperación de las propiedades hídricas y el crecimiento del bosque de *Pinus hartwegii*.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERALES

- a) Evaluar las propiedades hídricas de los suelos de los diferentes tipos de vegetación (B. *Abies religiosa*, B. *Pinus hartwegii*, B. *Pinus montezumae*, y Zacatonales) del PNPO con el fin de conocer cuál es el más apto para la recarga de acuíferos y cuál genera los escurrimientos.
- b) Evaluar el efecto de la adición de hidróxidos (KOH, Al (OH)₃, Ca (OH)₂) sobre el pH, las propiedades hídricas, la hidrofobicidad y la supervivencia de *Pinus hartwegii* para restaurar el servicio ambiental hidrológico.
- c) Determinar la concentración del Al extractable presente en el suelo de cada tipo de vegetación para conocer el efecto que tiene sobre las propiedades hídricas y la supervivencia del *Pinus hartwegii*.

4.2 PARTICULARES

- a) Determinar las propiedades hídricas (Kfs, Infiltración, Potencial de flujo mátrico, densidad aparente, porosidad total, retención de humedad) y químicas (pH y nutrimentos) en bosques de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y Pradera de alta montaña.
- b) Determinar la concentración óptima para mejorar las propiedades hídricas del suelo, el pH, la hidrofobicidad y el desarrollo de *Pinus hartwegii*.

5. ZONA DE ESTUDIO

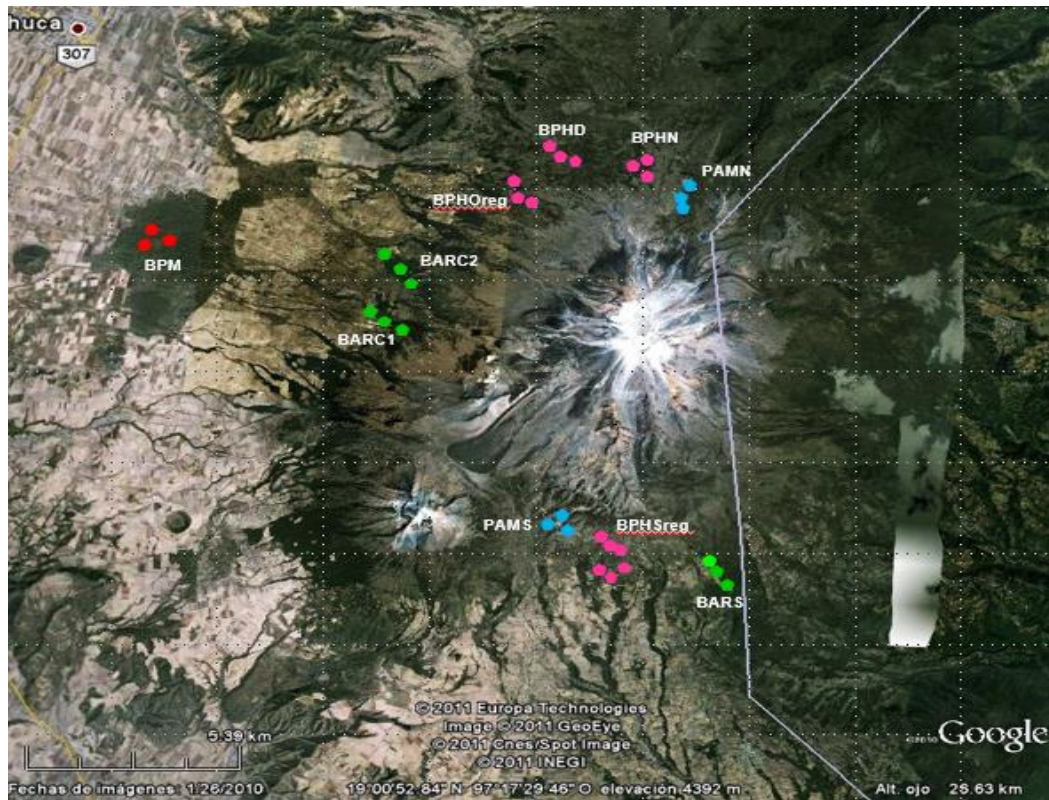


Fig. 3. Selección del sitio de muestreo del PNPO
Imagen Satelital, de Google Earth.com.

El PNPO se localiza en la parte más oriental del Eje Neovolcánico Transversal; Comprende parte de los municipios de Tlachichuca, Chalchicomula de Sesma y Atzitzintla, pertenecientes al estado de Puebla y Calchahuaco y la Perla pertenecientes al Estado de Veracruz.

Cuenta con una extensión de 19,750 hectáreas y tiene una altura de 5640 m snm. El decreto de PNPO, fue publicado en la ciudad de Orizaba, Veracruz en el Diario Oficial el 7 de Enero de 1937 declarado Parque Nacional, destinado a la conservación de la flora y fauna de la porción de los terrenos, tanto del Estado de Puebla como del Estado de Veracruz.

Clima. Templado semifrío, con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, menos de cuatro meses

con temperatura mayor a 10°C, subhúmedo, precipitación anual entre 200 y 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

Edafología. La zona presenta suelos Andosol lúmbrico ANu (Clasificación FAO-Unesco, 1989). El andosol es un suelo que presenta una proporción relativamente alta de hierro y aluminio en la fracción de tierra fina y una alta retención de fosfatos hasta una profundidad de 35 cm, como mínimo. El subtipo úmbrico tiene una consistencia untuosa y una textura franco limosa o muy fina y no se satura de agua en ninguna época del año; posee un horizonte A no muy duro cuando se seca, con grado de saturación menor de 50% y con relativamente alto nivel de contenido de carbono orgánico y un horizonte B de alteración, color claro y bajo contenido de materia orgánica.

Topografía. Forma parte de dos sistemas orográficos de la cordillera Neovolcánica, que alberga a otras elevaciones más altas de México, como el Popocatepetl, el Iztaccihuatl y la sierra Madre Oriental, que recorre a México de norte a sur desde el río Bravo hasta el centro del estado de Veracruz, generalmente siguiendo una dirección paralela al Golfo De México (CONABIO, 2011).

Hidrología. Se encuentra entre la vertiente oriental (del lado de Veracruz) y la occidental (del lado de Puebla). En la vertiente oriental se originan varios ríos de caudal, alimentados por los deshielos de los glaciares, las nieves, y las abundantes precipitaciones. Entre esos ríos están: el Jamapa, el Atoyac, el Cotaxtla, el Metlac, el Orizaba y el Blanco. Este último es el más caudaloso e importante de todos, nace en las cumbres de Acultzingo y recibe como afluentes al Orizaba y al Metlac y forma en su curso las cascadas de Rincón Grande, Barrio Nuevo y Tuxpan de la región de Orizaba. La Vertiente occidental cuenta solo con algunas corrientes de escaso caudal, casi todas de régimen estacional, ninguna llega al mar, sino que se pierden en las áridas extensiones de los llanos de libres y Oriental, del Estado de Puebla (también llamados Salado de Puebla). Estas cubren aproximadamente el triángulo formado por las ciudades de Huamantla (Tlaxcala), Ciudad Serdán (Puebla) y Perote

(Veracruz); estando delimitada por los volcanes Pico de Orizaba, Cofre de Perote y Malinche o Matlalcueye (Castañeda, 2008).

Vegetación. El parque Nacional Pico de Orizaba presenta 4 tipos de vegetación.

a) Bosque de *Abies religiosa*. En México se conocen por lo menos ocho especies de oyamel (*Abies*), que constituyen bosques generalmente monoespecíficos y también están en bosques mixtos. La especie mejor distribuida se encuentra en la región central, *A. religiosa* es endémica de México (Rzedowski, 1978; Challenger, 1998) y se encuentra registrada en la categoría de Amenazada (A) dentro de la Norma Oficial Mexicana 059 (SEMARNAT, 2001).

b) Bosque de *Pinus hartwegii*. Árbol de 5 a 25 m de altura posee un tronco de corteza dura y áspera de 75 cm de diámetro de color pardo oscuro tornándose a grisáceo; presenta de 4 a 5 hojas en cada fascículo (a veces 3 o 6), rígidas de 6 a 18 cm de largo, de color verde claro, su rango altitudinal va de los 3000 a los 4000 msnm. En México está presente en 17 estados (Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo, Distrito Federal, Morelos, Colima, Michoacán, Jalisco, Oaxaca, Chiapas, Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México, Coahuila, Nayarit y Guerrero (Rzedowski 1978 y Perry 1991). Además, se ha reportado en Guatemala.

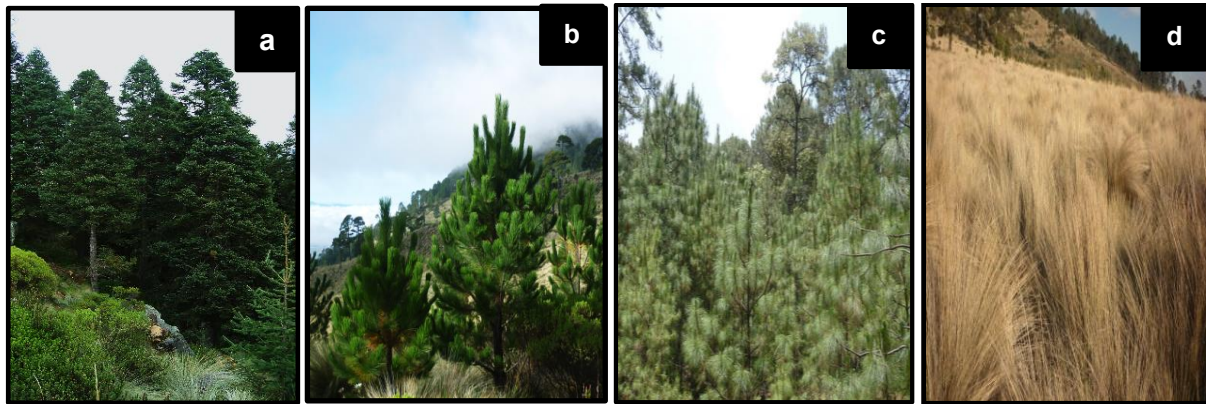
Los bosques de *Pinus hartwegii* poseen un gran valor desde el punto de vista ecológico y socioeconómico. Al respecto, Solís (1994) ha indicado que como las poblaciones de esta especie se desarrollan a las mayores elevaciones sobre el nivel del mar, cumplen funciones de protección a otros recursos y amortigua los efectos de contaminación ambiental, además de contribuir como regulador del ciclo hidrológico.

c) Bosque de *Pinus montezumae*. Árbol con una altura de entre 20 y 30 m, sus hojas forman grupos de cinco, de color verde oscuro. La corteza de este árbol es de una tonalidad café rojizo. Ramillas grisáceas a rojizas, en verticilos dobles, base de las brácteas caducas. Hojas de 8 a 15 cm, en fascículos algo espaciados. Vainas amarillentas, apergaminadas, escamosas de 10 a 15 mm. Yemas oblongas, pardas rojizas de 15 mm. Conillos subterminales, casi cilíndricos, de ápice redondo, en pedúnculos de 15 a 23 mm, con escamas anchas. Conos ligeros, subcilíndricos,

gradualmente atenuados y bastante encorvados, de 2 a 4 cm de largo, y 5 cm de ancho, y 1 cm cuando es abierta.

Es nativa del sudeste de México y oriente de América Central, Sierra Madre del Sur y del este del Eje Neovolcánico en los estados de Guerrero, Oaxaca, Puebla, Veracruz, Chiapas. Además se ha reportado en Guatemala, El Salvador y Honduras, y se encuentra en altitudes, de 2000 a 3500 msnm (CONABIO, 2012).

d) Zacatonal o Pradera de Alta montaña. Se localiza de 4000 m a 4200 m. El zacatonal alpino lo conforman *Agrostis tolucensis* con su característica forma amacollada; además hay abundancia de *Cirsium nivale*. (Martínez- Vázquez, 2001).



**Figura 4. Tipos de vegetación del PNPO a) B. *Abies religiosa*, b) B. *Pinus hartwegii*
d) B. *Pinus montezumae*, d) Zacatonal o Pradera de alta montaña.**

Fauna

- a) Mamíferos.** De acuerdo con los datos de la Colección Nacional de Mamíferos del Instituto de Biología de la UNAM y los estudios de Martínez-Vázquez (2000); Ruiz-Serrano (2014) en el PNPO se tiene un listado potencial de 6 órdenes, 10 familias, 16 géneros y 38 especies de mamíferos (Cuadro 5)
- b) Aves.** En los listados de CONABIO para la conservación de las aves (AICAS) y de Peterson y Chalif (1989) y Morales M. *et al.* (2007), las especies que pueden encontrarse dentro del PNPO incluirían a *Cathartes aura* (zopilote), *Accipiter striatus* (gavilán pechirrufo), *Accipiter cooperii* (gavilán pechirrufo), *Falco peregrinus* (halcón peregrino), *Dendrortyx macroura* (perdiz de los volcanes).

c) **Herpetofauna.** En total se han identificado 48 especies de Anfibios y Reptiles, de los cuales 27 son endémicas; 21 están protegidas y 10 se encuentran amenazadas; se distribuyen Tanas, Salamandras, Tlaconetes, Falso Escorpión, Lagartijas, Chintetes, Culebras y Víboras de Cascabel endémicas a México.

Cuadro 5. Especies de mamíferos registradas en el PNPO por Martínez-Vázquez et al., (2000; 2010) y Ruiz-Serrano (2014)

Nombre científico	Nombre común	Autoridad Taxonómica
<i>Bassariscus astutus</i>	Cacomixtle norteño	Lichtenstein, 1830 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Canis latrans cagottis</i>	Coyote	C. E. H. Smith, 1839
<i>Conepatus leuconotus</i>	Zorrillo narigón occidental	Lichtenstein, 1832
<i>Spilogale gracilis</i>	Zorrillo manchado	Merriam, 1890 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Mephitis macroura</i>	Zorrillo listado del sur	Lichtenstein, 1832 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Spilogale gracilis</i>	Zorrillo manchado	Merriam, 1890 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Cratogeomys merriami peraltus</i>	Tuza	Goldman, 1937
<i>Thomomys umbrinus</i>	Tuza mexicana	Richardson, 1829
<i>Didelphis virginiana californica</i>	Tlacuache común	Bennet, 1833
<i>Lepus callotis</i>	Liebre torda	Wagler, 1830 y Ruiz-Serrano, 2014.
<i>Lepus californicus</i>	Liebre de cola negra	Gray, 1837 y Ruiz-Serrano, 2014.
<i>Lynx rufus escuinapae</i>	Gato montés mexicano	J. A. Allen, 1903
<i>Cryptotis mexicana</i>	Musaraña de orejas cortas	Ruiz-Serrano, 2014
<i>Sorex monticolus</i>	Musaraña de montaña	Merriam, 1890
<i>Sorex saussurei</i>	Musaraña de Saussure	Merriam, 1892
<i>Sciurus oculatus oculatus</i>	Ardilla de Peters	Peters, 1863
<i>Glaucomys volans</i>	Ardilla voladora	Ruiz-Serrano, 2014
<i>Sylvilagus floridanus orizabae</i>	Conejo serrano	Merriam, 1893; J.A. Allen, 1890; Ruiz-Serrano, 2014
<i>Sylvilagus audubonii</i>	Conejo del desierto	Baird, 1858 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	Conejo Mexicano	Ruiz-Serrano, 2014
<i>Sylvilagus audubonii</i>	Conejo del desierto	Baird, 1858 y Ruiz-Serrano 2014.
<i>Peromyscus maniculatus</i>	Ratón norteamericano	Wagner, 1845
<i>Peromyscus melanotis</i>	Ratón de orejas negras	J.A. Allen y Chapman, 1897
<i>Peromyscus aztecus</i>	Ratón azteca	Saussure, 1860 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Peromyscus difficilis</i>	Ratón de roca	J. A. Allen, 1891 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Peromyscus gratus</i>	Ratón piñonero	Merriam, 1898 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Peromyscus melanophrys</i>	Ratón de las planicies	Coues, 1874 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Reithrodontomys chrysopsis</i>	Ratón cosechero de los volcanes	Merriam, 1900
<i>Reithrodontomys chrysopsis perotensis</i>	Ratón cosechero de los volcanes	Merriam, 1901
<i>Reithrodontomys megalotis</i>	Ratón cosechero común	Baird, 1858
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	Ratón cosechero leonado	J. A. Allen, 189) y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Reithrodontomys sumichrasti</i>	Ratón cosechero de Sumichrasti	Saussure, 1861
<i>Microtus mexicanus mexicanus</i>	Ratón de campo mexicano	Saussure, 1861
<i>Microtus mexicanus.</i>	Meteoro mexicano	Saussure, 1861 y Ruiz-Serrano, 2014
<i>Tlacuatzin canescens</i>	Ratón gris	Ruiz-Serrano, 2014
<i>Eptesicus fuscus miradorensis</i>	Murciélago moreno norteamericano	Beauvois, 1796
<i>Odocoileus virginianus</i>	Venado cola blanca	Ruiz-Serrano, 2014
<i>Procyon lotor</i>	Mapache	Linnaeus, 1758

Perfil socio-económico

El aspecto forestal es el sector de mayor importancia el uso es para el consumo de leña, elaboración de carbón y madera, también se extrae materiales como la arena, grava y arcilla. Los productos agrícolas más importantes son el maíz y la papa, la avena, cebada, durazno, manzana, pera, ciruela y aguacate.

La actividad ganadera se encuentra representada por especies criollas para la producción de leche y de carne por lo que se ha dirigido a una ganadería de tipo extensiva. El PNPO tiene zonas de gran valor escénico, para el turismo y recreación al aire libre, es el área más importante del país para practicar el montañismo, llegando a la región entre 6,000 y 8,000 personas al año.

6. MÉTODOS

6.1 Evaluación de las propiedades hídras. En cada sitio se obtuvieron de tres a cuatro registros de conductividad hidráulica (K_{fs}), infiltración y potencial mátrico (Φ_m) con el permeámetro Guelph 2800. Este equipo determina la cantidad de agua que el suelo puede absorber por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

Para la medición en campo se hizo una preparación del suelo; primero se retiró la hojarasca hasta dejarlo expuesto y se realizó una perforación de 10 cm de profundidad y 5 cm de diámetro con los aditamentos incluidos en el permeámetro, para representar un vaso de volumen conocido y constante. Seguido, se metió un cepillo con la finalidad de simular la estructura de los poros del suelo y finalmente se introdujo el permeámetro ya ensamblado.

Para la obtención del primer dato, el nivel de agua en el hoyo es de 5 cm y se midió la velocidad a la que disminuye el agua del reservorio hasta estabilizarse en un tiempo constante al menos en tres intervalos consecutivos. Para la segunda lectura, se niveló el agua a 10 cm y se repitió el proceso de medición.

Determinación de la Tasa de Infiltración. Se obtuvieron tres lecturas constantes o bien se promediaron los últimos tres datos y se dividieron entre el tiempo utilizado (cm/seg) los cuales representaron a R1 y R2.

Dónde: R1'= lectura constante a nivel de 5 cm (cm/s)

R2'= lectura constante a nivel de 10 cm (cm/s)

En mm/hr dónde: [Infiltración (cm/seg) (600)]

Determinación de la Conductividad hidráulica de saturación de campo (K_{fs})

$K_{fs} = [(a) \text{ (Constante del reservorio) (R2')} - (b) \text{ (Constante del reservorio) (R1')}]$

Dónde:

a = 0.0041

Constante del Reservorio 1 = 35.22

b = 0.0054

R1' = lectura constante a nivel de 5 cm.

R2' = lectura constante a nivel de 10 cm.

Potencial de flujo mátrico (Φ_m)

$$\Phi_m = [(c) (\text{Constante del reservorio}) (R1')] - [(d) (\text{Constante del reservorio}) (R2')]$$

Dónde:

Φ_m = potencial de flujo mátrico

$$c = 0.0572$$

$$d = 0.0237$$

Constante de reservorio = 35.22

R1' = lectura constante a nivel de 5 cm.

R2' = lectura constante a nivel de 10 cm.

Densidad aparente por el método del Cilindro. Se utilizaron cilindros de cobre de 3x5 cm según (Arshad *et al.*, 1996); estos se hundieron completamente y se extrajeron con el cilindro totalmente lleno de suelo, después se retiró cuidadosamente del suelo y se cubrió con cinta de ambos extremos para evitar alguna pérdida.

En laboratorio, se pesaron los tubos, este peso fue considerado como 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 el peso fue constante. Una vez determinado el peso constante y el volumen del tubo, se empleó la siguiente fórmula.

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

Porcentaje de humedad del suelo. El % de Humedad = (Peso suelo húmedo – Peso suelo seco) • (100/peso suelo húmedo).

Determinación de la Hidrofobicidad. El nivel de hidrofobicidad o de persistencia a la repelencia al agua se determinó con nueve repeticiones en cada tipo de vegetación, aplicando en campo el método WDPT. Para ello se colocó una gota de agua en la superficie del suelo y se registró el tiempo, en segundos, que tarda en penetrar completamente en el suelo. Posteriormente se clasificó este suelo con respecto a su nivel de hidrofobicidad, de acuerdo con lo propuesto por Dekker y Jungerius (1990).

6.2 Determinación de acidez total y requerimientos del alcalinizante. Se obtuvieron 30 muestras de suelo (10 sitios con 3 repeticiones), se les determinó pH en relación suelo-agua 1:2. Posteriormente, se seleccionaron las muestras que tuvieron los pH más ácidos y con estos se trabajaron.

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

En cada uno de los 7 matraces Erlenmeyer de 50 ml se colocaron 10 g de suelo y se añadieron a cada uno KOH (0.04 N) y agua destilada en las cantidades que se indica en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Procedimiento para determinar requerimientos de alcalinizante, Velasco (1983)

Recipiente número	Solución(0.04N) de Hidróxido en mililitros	Agua destilada Mililitros
1	0	20
2	2	18
3	5	15
4	8	12
5	11	9
6	14	6
7	17	3

El mismo procedimiento se realizó para $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y $\text{Al}(\text{OH})_3$, para obtener un total de 21 matraces Erlenmeyer. Inmediatamente se añadió 4 gotas de cloroformo a cada matraz para prevenir el desarrollo bacteriano. Los matraces tapados se dejaron reposar por un periodo de 4 días, agitando por lo menos una vez por día y finalmente se determinó el pH de las suspensiones.

Cálculos y/o curva de calibración. Una curva de equilibrio se construyó utilizando la ordenada para los diversos valores de pH obtenidos y la abscisa para los diversos

volúmenes de hidróxidos que se utilizaron. Con base en esta curva se procedió a calcular la cantidad de KOH, Ca (OH)₂ y Al (OH)₃, necesaria para elevar la reacción del suelo, una unidad a partir del pH original o hasta el pH deseado. Los resultados se indicaron en Kg·ha⁻¹; se debe utilizar la Da del lugar a la profundidad deseada (Velasco, 1983).

Los hidróxidos están presentes de forma natural en los andosoles. Los feldespatos (AlSi₃O₈), al reaccionar con silicatos en ambientes acuosos, forma hidroxialuminosilicatos, ya sea alófano (Al₄Si₃O₁₂·nH₂O), imogolita (Al₄Si₂O₁₀·5H₂O), y pueden dar origen a caolinita (Al₂Si₂O₅ (OH)₄) o haloisita (Al₂Si₂O₅ (OH)₄·nH₂O) y si pierden silicatos dan origen a la gibsita (Al (OH)₃) (Aguirre-Gómez, 2001). El hidróxido de potasio existe en forma del mineral denominado mica, principalmente como muscovita, el cual representa su mayor fuente para las plantas. También el hidróxido de calcio se encuentra presente en los Andosoles como productos derivados de calcita (Thompson y Ukrainczyk, 2002).

6.3 Evaluación del efecto de adición de hidróxidos

1) Efectos sobre las propiedades hídricas. El efecto de la adición de hidróxidos se evaluó sobre la conductividad hidráulica (K_{fs}), infiltración, y potencial de flujo mátrico en tres puntos de cada tratamiento, con el permeámetro Guelph 2800, descrito anteriormente.

2) Determinación de la porosidad total. En cada una de las zonas se obtuvieron tres muestras inalteradas con ayuda de cajas Kubiena. Las cajas se enterraron verticalmente y se extrajeron excavando de manera cuidadosa para evitar que se altere la muestra. Una vez obtenidas, se dejaron secar a temperatura ambiente y se llevaron al laboratorio de Génesis y Clasificación de suelos, del Colegio de Postgraduados para ser preparados. Las cajas totalmente secas se les agregó resina poliéster insaturada; por cada kilogramo de resina se agregaron 84 ml de monómero de estireno (relación 1:12) y 1.5 ml de catalizador (Peróxido de metil-etil-cetona). En seguida, las cajas con resina se introdujeron a una caja de vacío a una presión de 18

libras durante tres horas con el fin de que la resina penetre más rápido en el suelo contenido en las cajas. Terminado el tiempo se le 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 reposo total aproximadamente durante 15 días (depende del clima) para una impregnación total. Se realizaron cortes longitudinales (para evaluar el drenaje y porosidad del suelo) y se colocaron en portaobjetos. Las muestras se pulieron hasta alcanzar un grosor de 30 micras. Con un microscopio petrográfico, marca Olympus BX51 con compensador, se obtuvieron alrededor de 12-15 imágenes de cada sección delgada con el fin de analizar las imágenes y obtener así el porcentaje de porosidad total (con el software Image Pro Plus 6), distribución, tamaño y tipo de poros.

6.4 Evaluación de las propiedades químicas

En laboratorio, las muestras se secaron a temperatura ambiente, se tamizaron en una malla de 2 mm se determinó: nitrógeno total, fósforo disponible, materia orgánica, pH, cationes intercambiables, Al y Fe extractables, todo ello con base a la NOM-021-RECNAT-2000.

Potencial de hidrógeno (pH). El real se determinó con el potenciómetro digital en una relación suelo-agua 1:2. La determinación del pH potencial se realizó por medio de KCl (1M) relación 1:2 por medio del método electrométrico y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

Materia orgánica del suelo (MOS). Se determinó a través del contenido de carbono orgánico por el método de Walkley y Black.

Nitrógeno total (N). Se utilizó el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (SEMARNAT, 2002).

Cationes intercambiables. El K^+ y Na^+ se determinaron por flamometría mientras que el Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinó por el método de extracción spcon $ACONH_4$ 1 N a de pH 7 y su cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de absorción

atómica usando una flama de aire-acetileno, marca Varían AA-1475 (ISP, 1994 y SEMARNAT, 2002).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La muestra fue percolada con acetato de amonio $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ a pH 7; las bases se midieron en el percolado, posteriormente se destiló y se determinó el amoniaco solubilizado el cual contiene las bases totales (Van Reeuwijk.1999).

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 (Porta *et al.*, 1994)

$$V = \frac{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)}{\text{CIC}} \cdot 100$$

Fósforo disponible (P). Se determinó el fósforo extraíble por el método de Bray y Kurtz para suelos ácidos y neutros.

Aluminio (Al) y Fierro (Fe) extractable. Se determinó por la técnica de Mehra y Jackson para extraer aluminio o fierro libre, es decir el que no forma parte de las estructuras minerales silicatadas. La muestra fue calentada en una solución buffer compleja de citrato de sodio/bicarbonato al cual se le agrego ditionito de sodio sólido como agente reductor. También se determinó por el método de oxalato ácido de amonio para disolver los compuestos “activos” o de rango corto (=amorfos). Posteriormente fueron determinados por EAA (Espectrofotometría de absorción atómica) usando acetileno/óxido nitroso para el aluminio y aire/acetileno para Fe^{2+} respectivamente.

6.5 Tratamiento estadístico de datos

Los datos de la propiedades hídricas y químicas de cada tipo de vegetación, se compararon a través de una prueba de medias, con una prueba T student, al 0.05 de significancia, con el paquete STATA.

7. RESULTADOS

7.1 Evaluación de las propiedades hídricas

Conductividad hidráulica (K_{fs})

Los bosques de *Abies religiosa* registraron valores altos en el PNPO. La K_{fs} fue de 225.11 (± 103.81), 156.44 (± 152.48) y 141.69 (± 70.37) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, para BARS, BARC2 y BARC1 respectivamente y le siguió los B. de *Pinus montezumae* (BPM) con 137.40 (± 187.68) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$. Los valores más bajos se encontraron en los bosques de *Pinus hartwegii* (BPHSreg, BPHN, BPHD, BPHOreg.) con una media de 86.18 (± 98.15); 77.34 (± 64.55); 29.10 (± 2.51); 26.06 (± 24.09) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ respectivamente (Cuadro 7) (Figura 5).

En zacatonales hubo respuesta contrastante, el ubicado en la parte sur (PAMS) muestra los valores más altos en todo el PNPO; mientras que el ubicado en la porción norte (PAMN), presentó uno de los valores más bajos de 266.41 (± 352.74) y 39.44 (± 20.54) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ respectivamente.

La gran variación que presenta la K_{fs} en los diferentes tipos de vegetación ocasionó que no haya diferencias significativas donde el principal factor fue la hidrofobicidad (Figura 5).

Tasa de Infiltración. En el Cuadro 7 y Figura 5 se puede observar que los bosques de *Abies religiosa* mostraron valores altos, de infiltración superficial (0-7 cm de profundidad): 2448.00 (± 891.08); 2310.00 (± 1832.05); 1395.00 (± 473.39) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$; para BARS, BARC2 y BARC1 respectivamente. En cuanto a la tasa de infiltración, a una profundidad de 7-15 cm, se observó que presentaron valores intermedios; 1155.00 (± 641.33); 1040.00 (± 880.00); 675.00 (± 234.00) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, para BARC2, BARC1, BARS respectivamente.

En los bosques de *Pinus montezumae* (BPM) se obtuvieron valores intermedios en el PNPO y fueron de: 1519.20 (± 1172.18) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ en infiltración superficial y en infiltración de 7-15 cm, 820.80 (± 288.44) $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$.

Los bosques de *Pinus hartwegii* registraron respuestas contrastantes. En infiltración superficial, el BPHN mostró un valor intermedio para el PNPO (1800.00 ± 0.00); sin embargo, fue el más alto en los bosques de *Pinus hartwegii*. Los BPHSreg y BPHOreg obtuvieron valores intermedios, y en el BPHD los valores más bajos del PNPO (756.00 ± 678.76 ; 550.00 ± 377.49 ; $199.08 \pm 124.60 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, respectivamente).

En infiltración de 7-15 cm, los valores más altos en todo el PNPO se presentaron en el BPHN, y los intermedios en el BPHOreg y BPHSreg. Los más bajos en BPHD (1560.00 ± 777.68 ; 283.33 ± 202.07 ; 201.52 ± 99.11 ; $72.57 \pm 61.98 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, respectivamente).

En zacatonales, la infiltración superficial, nuevamente PAMS mostró los valores más altos en todo PNPO de $2515.77 (\pm 2409.25) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, mientras que en la PAMN se hallaron valores intermedios de $800.00 (\pm 346.41) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$. A mayor profundidad PAMS y PAMN obtuvieron valores intermedios en todo el PNPO (686.06 ± 481.65 ; y $400.00 \pm 346.41 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, respectivamente).

Potencial de flujo mátrico (Θ_m). En los bosques de *Abies religiosa* BARC1 presentó el valor más alto en todo el PNPO, mientras que BARC2 obtuvo valores intermedios; sin embargo, BARS indicó problemas de drenaje ya que obtuvo valores negativos (0.067 ± 0.011 ; 0.015 ± 0.009 ; -0.018 ± 0.009) (Cuadro 7 y Figura 5).

Los bosques de *Pinus hartwegii* el BPHN, BPHOreg, BPHD mostraron valores intermedios en el PNPO; sin embargo, el BPHN resultó el valor más alto en los bosques de *Pinus hartwegii* y BPHSreg obtuvo valores negativos (0.061 ± 0.036 ; 0.004 ± 0.004 ; 0.001 ± 0.0007 ; $-0.006 \pm 0.014 \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$, respectivamente).

Los bosques de *Pinus montezumae* registran valores intermedios en todo el PNPO $0.030 (\pm 0.005) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$.

En zacatonales PAMS es el mayor valor y PAMN el menor valor; sin embargo, ambas praderas presentan valores intermedios con respecto a todo el PNPO (0.014 ± 0.018 ; $0.005 \pm 0.0003) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$, respectivamente).

Porcentaje de Humedad. Los valores mayores en todo el PNPO se encontraron en los bosques de *Abies religiosa* BARC1 y BARC2, y sólo BARS mostró valores

intermedios ($30.06\% \pm 7.21$; $29.75\% \pm 2.83$; $24.34\% \pm 1.31$, respectivamente). Todos los bosques de *Pinus hartwegii* (BPHOreg, BPHD, BPHN, BPHSreg,) presentaron valores intermedios: $27.49\% (\pm 3.13)$; $26.19\% (\pm 13.90)$; $23.88\% (\pm 3.63)$; y $20.13\% (\pm 9.40)$, respectivamente. En tanto el valor más bajo en todo el PNPO resultó en los bosques de *Pinus montezumae*: $7.81\% (\pm 5.75)$.

En zacatonales PAMN es mayor que PAMS; sin embargo, son intermedios con respecto al PNPO ($16.19\% \pm 9.30$ y $11.34\% \pm 6.08$, respectivamente) (Cuadro 7 y Figura 5).

Densidad Aparente (D.A). Los valores bajos ocurren en los bosques de *Abies religiosa* en BARC1, BARC2 y BARS (0.77 ± 0.05 ; 0.74 ± 0.02 ; $0.74 \pm 0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$) respectivamente. Los valores intermedios se encontraron en los bosques de *Pinus hartwegii* BPHSreg, BPHD, BPHN y BPHOreg (1.07 ± 0.38 ; 0.89 ± 0.53 ; 0.81 ± 0.03 ; $0.81 \pm 0.14 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ respectivamente). Mientras que el valor más alto se obtuvo en los bosques de *Pinus montezumae* (BPM): $1.09 \text{ g}\cdot\text{cm}^3 (\pm 0.10)$.

En zacatonales PAMN resultó el valor más alto con respecto a PAMS; no obstante, ambos registraron valores intermedios en todo el PNPO (0.88 ± 0.70 ; $0.86 \pm 0.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente) (Cuadro 7).

Porosidad Total. En los bosques de *Abies religiosa* la mayor porosidad en todo el PNPO se obtuvo en BARC1 y BARC2, con valores de 41.00% y 34.00% ; mientras que BARS registró valores intermedios de 27.00% . En los Bosques de *Pinus hartwegii*, BPHN y BPHSreg, presentaron valores intermedios y en BPHD y BPHOreg los valores más bajos (32.52% ; 27.03% ; 24.78% ; 23.40% , respectivamente). El Bosque de *Pinus montezumae* (BPM) indicó valores intermedios de 31.87% .

En zacatonales PAMS mostró valores intermedios y PAMN, los valores bajos en el PNPO (32.94% y 24.03% , respectivamente) (Cuadro 7).

Hidrofobicidad

Los suelos de los bosques de *Abies religiosa*, BARC1 y BARC2 presentaron la clase ligeramente repelente a nivel superficial como a 1 y 3 cm de profundidad; mientras que a los 2 cm mostraron la clase fuertemente repelente. En tanto BARS obtuvo la

clase ligeramente repelente en la parte superficial, como a 1, 2 y 3 cm de profundidad.

En los suelos de los bosques de *Pinus hartwegii* mostró variación: El BPHN presentó la clase severamente repelente tanto a nivel superficial como a 1, 2 y 3 cm profundidad. El BPHOreg mostró la clase fuertemente repelente sólo a nivel superficial y la clase ligeramente repelente a 1, 2 y 3 cm de profundidad. En el BPHSreg no hubo repelencia al agua a ninguna profundidad. El BPHD, a nivel superficial obtuvo la clase fuertemente repelente; mientras que a mayor profundidad no hay repelencia al agua.

El bosque de *Pinus montezumae* (BPM), a nivel superficial, resultó en la clase severamente repelente, a 1 y 2 cm se observó la clase fuertemente repelente y a los 3 cm obtuvo la clase ligeramente repelente.

En zacatonales en PAMS no existe repelencia al agua a ninguna profundidad; sin embargo, PAMN mostró la clase fuertemente repelente a todas las profundidades (Cuadro 7).

Cuadro 7. Propiedades hídricas (\pm media desviación estándar) de los diferentes tipos de vegetación del PNPO

Sitio	Infiltración (profundidad)		K _{fs}	ϕ_m	Retención humedad	D.A	Porosidad Total	Hidrofobicidad			
	R2	R1						Profundidad (cm)			
	0- 7 cm	7-15 cm						0	1	2	3
----- mm·hr ⁻¹ -----		cm ² ·seg ⁻¹	%	g·cm ³	%	s					
BARC1	1395.00 ^a (± 473.39)	1040.00 ^a (± 880.00)	141.69 ^a (± 70.37)	0.067 ^a (± 0.011)	30.06 ^a (± 7.21)	0.77 ^a (± 0.05)	41.00 ^a	36	28	210	17
BARC2	2310.00 ^a (± 1832.05)	1155.00 ^a (± 641.33)	156.44 ^a (± 152.48)	0.015 ^c (± 0.009)	29.75 ^a (± 2.83)	0.74 ^a (± 0.02)	34.00 ^a	25	13	185	18
BARS	2448.00 ^a (± 891.08)	675.00 ^a (± 234.00)	225.11 ^a (± 103.81)	- 0.018 ^b (± 0.009)	24.34 ^a (± 1.31)	0.74 ^a (± 0.10)	27.00 ^a	26	19	18	14
BPHN	1800.00 ^a (± 0.00)	1560.00 ^a (± 777.68)	77.34 ^a (± 64.55)	0.061 ^a (± 0.036)	23.88 ^a (± 3.63)	0.81 ^a (± 0.03)	32.52 ^a	927	1240	1129	703
BPHO reg	550.00 ^b (± 377.49)	283.33 ^b (± 202.07)	26.06 ^a (± 24.09)	0.004 ^b (± 0.004)	27.49 ^a (± 3.13)	0.81 ^a (± 0.14)	24.78 ^a	341	18	29	20
BPHS reg	756.00 ^b (± 678.76)	201.52 ^b (± 99.11)	86.18 ^a (± 98.15)	-0.006 ^c (0.014)	20.13 ^a (± 9.40)	1.07 ^a (± 0.38)	27.03 ^a	1	1	1	1
BPHD	199.08 ^b (± 124.60)	72.57 ^b (± 61.98)	29.10 ^a (± 2.51)	0.001 ^b (± 0.0007)	26.19 ^a (± 13.90)	0.89 ^a (± 0.53)	23.40 ^a	524	3	4	4
BPM	1519.20 ^a (± 1172.18)	820.80 ^a (± 288.44)	137.40 ^a (± 187.68)	0.030 ^a (± 0.005)	7.81 ^a (± 5.75)	1.09 ^a (± 0.10)	31.87 ^a	738	94	66	55
PAMS	2515.77 ^a (± 2409.25)	686.06 ^a (± 481.65)	266.41 ^a (± 352.74)	0.014 ^a (± 0.018)	11.34 ^a (± 6.08)	0.86 ^a (± 0.35)	32.94 ^a	1	1	1	1
PAMN	800.00 ^a (± 346.41)	400.00 ^a (± 346.41)	39.44 ^a (± 20.54)	0.005 ^a (± 0.0003)	16.19 ^a (± 9.30)	0.88 ^a (± 0.70)	24.03 ^a	314	268	93	64

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel $P \leq 0.05$. K_{fs} = Conductividad Hidráulica; Φ_m = Potencial de flujo mátrico; DA = Densidad aparente. BARC1 = Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2 = Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS = Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM = Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS = Zacatonal Sur; PAMN = Zacatonal Norte.

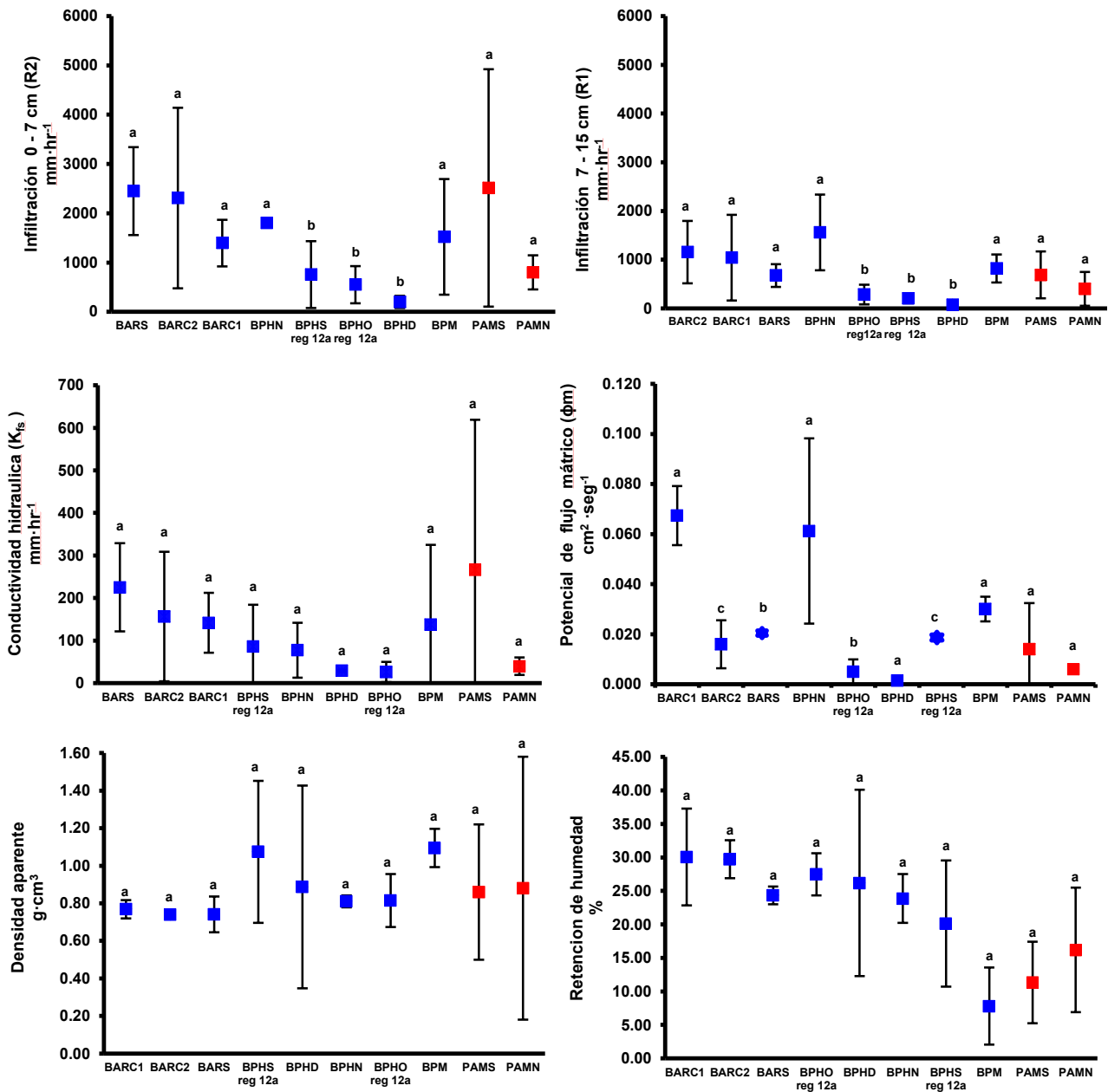


Figura 5. Propiedades hídricas en los diferentes tipos de vegetación del PNPO. BARC1= Bosque de *Abies religiosa* oeste cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* oeste cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHOreg= Bosque de *Pinus hartwegii* oeste en regeneración de 12 años; BPHSreg= Bosque de *Pinus hartwegii* sur en regeneración de 12 años; BPHD= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.

7.2 Propiedades químicas

PH real o activo. Los suelos de bosques de *Abies religiosa* y de *Pinus montezumae* (BPM) son moderadamente ácidos; mientras que los bosques de *Pinus hartwegii* son fuertemente ácidos (Cuadro 8 y Figura 6). Con respecto a los zacatonales, los suelos de PAMN son fuertemente ácidos, y PAMS son moderadamente ácidos.

PH potencial o intercambiable. El suelo de BARC1 resultó moderadamente ácido y los suelos de los sitios restantes son fuertemente ácidos (Cuadro 8 y Figura 6).

Materia Orgánica y Carbono del Suelo (MOS). Los bosques de *Abies religiosa*, BARC1 y BARC2, registraron clases altas y BARS clase baja. Con respecto a los bosques de *Pinus hartwegii*, el BPHD presentó clase muy alta; la clase media se ubicó en BPHSreg y la clase muy baja se encontró en BPHN y BPHOreg. En bosques de *Pinus montezumae* se obtuvieron clases altas (Cuadro 8 y Figura 6). En zacatonales PAMN presentó la clase baja y PAMS la clase muy baja.

Nitrógeno total(N). El bosque de *Pinus montezumae* (BPM) registró la clase media; y los bosques de *Abies religiosa* (BARC1, BARC2, BARS) y *Pinus hartwegii* (BPHN, BPHO reg, BPHS reg, BPHD), la clase baja. En los zacatonales PAMS y PAMN ocurre la clase baja (Cuadro 8 y Figura 6).

Fósforo Disponible (P). Los bosques de *Abies religiosa* BARC1 y BARC2 presentaron una clase alta y BARS la clase baja. En los bosques de *Pinus hartwegii* la clase media se halló en BPHD, y los restantes se ubicaron en la clase baja. Los bosques de *Pinus montezumae* resultaron en la clase alta (Cuadro 8 y Figura 6).

En zacatonales la clase alta se obtuvo en PAMN y la clase media en PAMS.

Cationes Intercambiables

Ca⁺². En los bosques de *Abies religiosa*, BARC1 mostró la clase alta, BARC2 y BARS, BPHDy BPM presentaron la clase baja y los BPHN, BPHOreg y BPHSreg se

ubicaron en la clase muy baja. En zacatonales el nivel medio se encontró en PAMN y el nivel bajo en PAMS (Cuadro 8 y Figura 6).

Mg²⁺. Los bosques de *Abies religiosa* BARC1 y BARS registraron la clase media solo BARC2 en la clase baja. En los bosques de *Pinus hartwegii* el BPHSreg presentó la clase media, BPHOreg, BPHD la clase baja, y BPHN la clase muy baja. En tanto, los bosques de *Pinus montezumae* (BPM) se hallaron en la clase baja.

Por otro lado los zacatonales (PAMS, PAMN) son la clase media (Cuadro 8 y Figura 6).

K⁺. En los bosques de *Abies religiosa* el nivel alto resultó en BARC1, el nivel bajo en BARS, y el nivel muy bajo en BARC2. Los bosques de *Pinus hartwegii*, BPHO reg y BPHD mostraron el nivel medio, BPHN y BPHSreg el nivel bajo. Los bosques de *Pinus montezumae* tienen un comportamiento intermedio (Cuadro 8 y Figura 6). En zacatonales PAMS y PAMN obtuvieron la clase muy baja.

Na⁺. Los suelos de los bosques de *Abies religiosa* (BARC1, BARC2, BARS) mostraron valores intermedios similares a los registrados en *Pinus hartwegii* (BPHN, BPHOreg BPHSreg, BPHD). Sin embargo, los valores más altos en el PNPO ocurren en los bosques de *Pinus montezumae*. En los zacatonales PAMN obtuvo un valor intermedio y PAMS, un valor más bajo en el PNPO (Cuadro 8 y Figura 6).

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). En los bosques de *Abies religiosa*, la clase alta se registró en BARC1 y BARC2 y la clase baja en BARS. En tanto que los bosques de *Pinus hartwegii* el BPHN, BPHOreg, BPHD resultaron en la clase alta y BPHSreg en la clase media. Los bosques de *Pinus montezumae* (BPM) obtuvieron la clase media. Para los zacatonales PAMN mostró la clase alta y PAMS la clase baja (Cuadro 8 y Figura 6).

Porcentaje de Saturación de Bases (PSB). Dentro de los bosques de *Abies religiosa*, BARC1 mostró un valor alto; mientras que BARC2 y BARS obtuvieron

valores intermedios. Los bosques de *Pinus hartwegii* el BPHSreg y BPHD presentaron valores intermedios y el BPHN y BPHOreg los valores más bajos en todo el PNPO. En tanto que, los bosques de *Pinus montezumae* resultaron en valores intermedios. Por otro lado en zacatonales, PAMS registró el valor mayor con respecto al PNPO y PAMN presentó valores intermedios (Cuadro 8 y Figura 6).

Aluminio extractable por ditionito (Al_D). Los bosques de *Abies religiosa* (BARC1, BARC2, BARS), *Pinus hartwegii* (BPHN, BPHO reg, BPHS reg, BPHD) y *Pinus montezumae* (BPM) obtuvieron valores intermedios (Cuadro 9 y Figura 7).

En los zacatonales, PAMN resultó en el valor más alto y PAMS en el más bajo en todo el PNPO.

Aluminio extractable por oxalato (Al_O). Los bosques de *Abies religiosa* (BARC1, BARC2, BARS) y *Pinus montezumae* (BPM) presentaron valores intermedios. Los bosques de *Pinus hartwegii* el BPHN y BPHD mostraron valores altos, y en BPHO reg y BPHSreg ocurrieron valores intermedios (Cuadro 9 y Figura 7).

En zacatonales PAMN obtuvo valores intermedios y PAMS resultó en el valor más bajo en todo el PNPO.

Fe extractable por ditionito (Fe_D). Los bosques de *Abies religiosa* BARC1 y BARS registraron valores intermedios, solo BARC2 indico valores bajos. En los bosques de *Pinus hartwegii*, BPHN y BPHOreg se obtuvieron valores altos, mientras que BPHSreg y BPHD presentaron valores intermedios. Los bosques de *Pinus montezumae* presentaron valores bajos. Para el caso de los zacatonales, PAMS y PAMN mostraron valores intermedios (Cuadro 9 y Figura 7).

Fe extractable por oxalato (Fe_O). El BARC1 y BARC2 ocurren valores intermedios y en BARS los valores más bajos en todo el PNPO. En tanto, los bosques de *Pinus* (BPHN, BPHOreg, BPHSreg, BPHD y BPM) obtuvieron valores intermedios. Los suelos de las praderas de alta montaña del lado norte (PAM) presentaron los valores más altos dentro del PNPO y PAMS valores intermedios (Cuadro 9 y Figura 7).

Cuadro 8. Propiedades químicas (\pm media desviación estándar) de los diferentes tipos de vegetación del PNPO

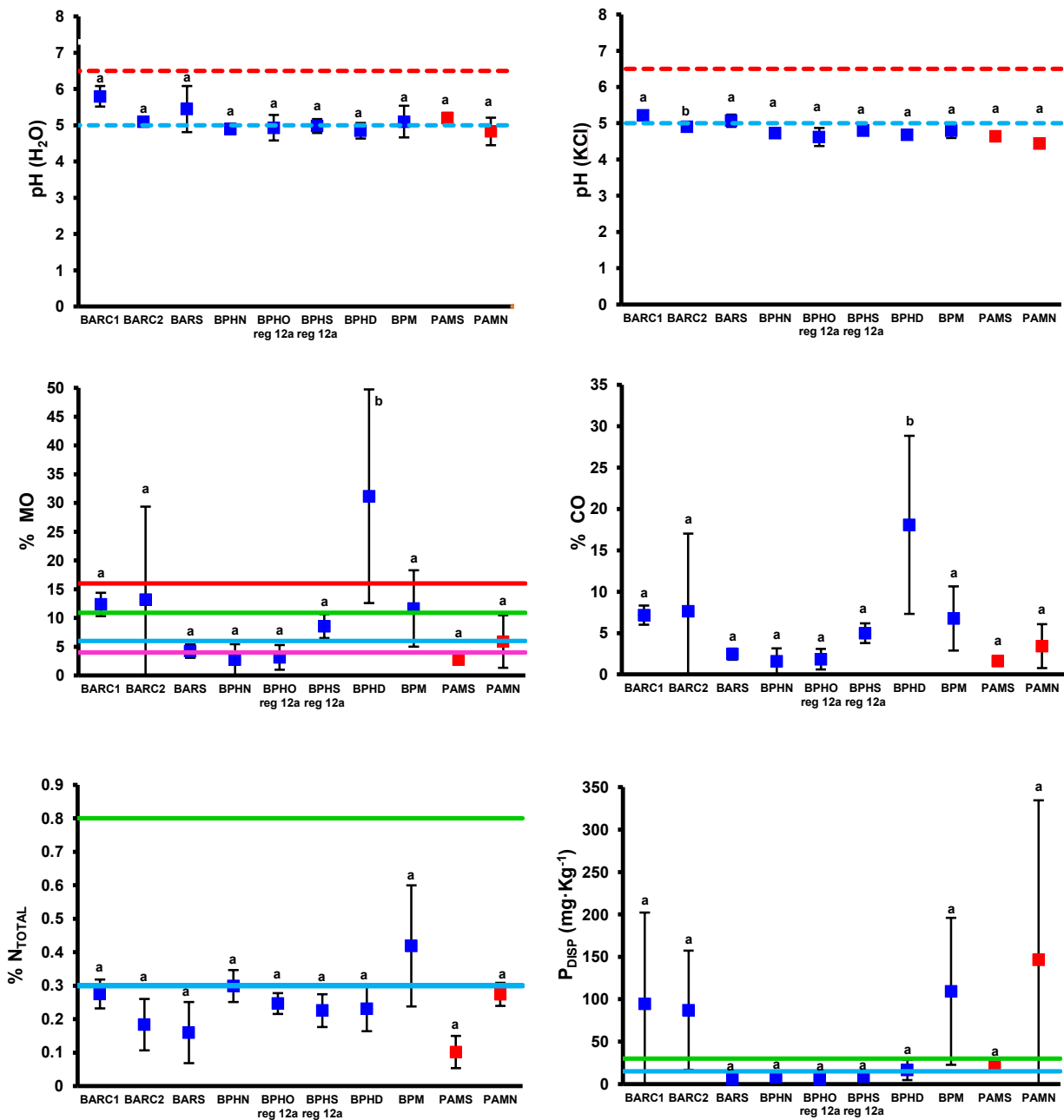
Sitio	pH H ₂ O	pH KCl	CO	MOS	N _{TOTAL}	P _{DISP}	CATIONES INTERCAMBIABLES					
							Ca	Mg	K	Na	CIC	PSB
			----- %-----			mg·Kg ⁻¹	----- cmol kg ⁻¹ . -----				%	
BARC1	5.80 ^a (± 0.28)	5.22 ^a (± 0.06)	7.16 ^a (± 1.17)	12.35 ^a (± 2.01)	0.27 ^a (± 0.04)	94.47 ^a (± 107.86)	13.98 ^a (± 11.95)	2.43 ^a (± 1.17)	0.62 ^a (± 0.40)	0.20 ^a (± 0.09)	30.45 ^a (± 14.40)	51.83 ^a (± 20.26)
BARC2	5.10 ^a (± 0.00)	4.90 ^b (± 0.10)	7.65 ^a (± 9.36)	13.19 ^a (± 16.14)	0.18 ^a (± 0.07)	87.13 ^a (± 70.32)	2.83 ^a (± 0.93)	0.61 ^a (± 0.19)	0.19 ^a (± 0.009)	0.13 ^a (± 0.09)	32.39 ^a (± 14.40)	13.68 ^a (± 9.25)
BARS	5.45 ^a (± 0.64)	5.07 ^a (± 0.17)	2.45 ^a (± 0.66)	4.23 ^a (± 1.15)	0.15 ^a (± 0.09)	5.78 ^a (± 3.19)	2.04 ^a (± 0.59)	1.46 ^a (± 0.08)	0.22 ^a (± 0.00)	0.13 ^a (± 0.03)	12.70 ^a (± 1.37)	30.30 ^a (± 2.26)
BPHN	4.90 ^a (± 0.14)	4.73 ^a (± 0.03)	1.59 ^a (± 1.56)	2.75 ^a (± 2.69)	0.29 ^a (± 0.04)	8.03 ^a (± 4.79)	0.79 ^a (± 0.37)	0.45 ^a (± 0.04)	0.23 ^a (± 0.00)	0.17 ^a (± 0.00)	28.42 ^a (± 18.38)	6.79 ^a (± 2.92)
BPHO reg	4.93 ^a (± 0.35)	4.62 ^a (± 0.25)	1.83 ^a (± 1.24)	3.16 ^a (± 2.14)	0.24 ^a (± 0.03)	5.40 ^a (± 2.35)	1.85 ^a (± 0.54)	0.61 ^a (± 0.09)	0.33 ^a (± 0.13)	0.22 ^a (± 0.03)	31.26 ^a (± 1.94)	9.80 ^a (± 2.93)
BPHS reg	4.98 ^a (± 0.19)	4.80 ^a (± 0.10)	4.97 ^a (± 1.19)	8.57 ^a (± 2.06)	0.22 ^a (± 0.04)	8.94 ^a (± 6.55)	1.15 ^a (± 0.66)	1.73 ^b (± 0.11)	0.26 ^a (± 0.08)	0.11 ^b (± 0.03)	17.28 ^b (± 10.91)	24.86 ^b (± 14.86)
BPHD	4.85 ^a (± 0.21)	4.68 ^a (± 0.11)	18.08 ^b (± 10.76)	31.17 ^b (± 18.56)	0.23 ^a (± 0.06)	16.50 ^a (± 11.97)	2.73 ^a (± 0.66)	0.55 ^a (± 0.25)	0.36 ^a (± 0.18)	0.18 ^a (± 0.04)	31.04 ^a (± 8.91)	13.23 ^a (± 5.86)
BPM	5.10 ^a (± 0.44)	4.80 ^a (± 0.21)	6.75 ^a (± 3.86)	11.64 ^a (± 6.66)	0.41 ^a (± 0.18)	109.35 ^a (± 86.53)	4.05 ^a (± 4.58)	1.40 ^a (± 1.47)	0.43 ^a (± 0.14)	0.66 ^a (± 0.70)	23.37 ^a (± 9.20)	25.16 ^a (± 12.12)
PAMS	5.20 ^a (± 0.14)	4.64 ^a (± 0.12)	1.60 ^a (± 0.26)	2.77 ^a (± 0.46)	0.10 ^a (± 0.04)	20.46 ^a (± 3.19)	2.92 ^a (± 1.15)	1.87 ^a (± 0.03)	0.09 ^a (± 0.05)	0.08 ^a (± 0.00)	7.56 ^a (± 4.52)	74.48 ^a (± 29.03)
PAMN	4.83 ^a (± 0.38)	4.44 ^a (± 0.09)	3.42 ^a (± 2.63)	5.90 ^a (± 4.54)	0.27 ^a (± 0.03)	146.60 ^a (± 187.84)	5.43 ^a (± 4.87)	1.52 ^a (± 1.22)	0.18 ^a (± 0.11)	0.17 ^a (± 0.04)	38.05 ^b (± 11.36)	17.01 ^a (± 12.03)

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel de $P \leq 0.05$. BARC1 = Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHOreg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHSreg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.

Cuadro 9. Análisis químico de Al³⁺ y Fe²⁺ extractable en los diferentes tipos de vegetación del PNPO.

SITIO	% Al		% Fe	
	DIT	OXA	DIT	OXA
BARC1	0.53 (±0.06) ^a	1.59 (±0.54) ^a	0.38 (±0.05) ^a	2.70 (±0.64) ^a
BARC2	0.56 (±0.17) ^a	1.40 (±0.45) ^a	0.28 (±0.05) ^b	2.90 (±0.71) ^a
BARS	0.54 (±0.05) ^a	1.63 (±0.53) ^a	0.39 (±0.03) ^a	2.33 (±0.20) ^a
BPHN	0.67 (±0.05) ^a	1.68 (±0.15) ^a	0.52 (±0.04) ^a	3.13 (±0.39) ^a
BPHO reg	0.63 (±0.17) ^a	1.28 (±0.17) ^b	0.52 (±0.13) ^a	2.74 (±0.04) ^a
BPHS reg	0.48 (±0.06) ^c	1.46 (±0.35) ^a	0.36 (±0.17) ^a	3.04 (±0.55) ^a
BPHD	0.68 (±0.04) ^a	1.71 (±0.54) ^a	0.46 (±0.07) ^a	2.89 (±0.37) ^a
BPM	0.50 (±0.07) ^b	1.35 (±0.28) ^a	0.25 (±0.04) ^a	3.88 (±0.60) ^a
PAMS	0.31 (±0.05) ^a	0.79 (±0.19) ^a	0.39 (±0.08) ^a	3.38 (±2.74) ^a
PAMN	0.72 (±0.11) ^a	1.18 (±0.30) ^a	0.39 (±0.08) ^a	4.10 (±0.72) ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel $P \leq 0.05$. OXA; Al y Fe extraídos con oxalato ácido; DIT=Al y Fe extraídos con ditionito citrato. BARC1 = Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.



Muy bajo ■ Bajo ■ Medio ■ Alto ■ Moderadamente ácido ■ Neutro ■

Figura 6. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 de los suelos del PNPO. BARC1 =Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS=Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.

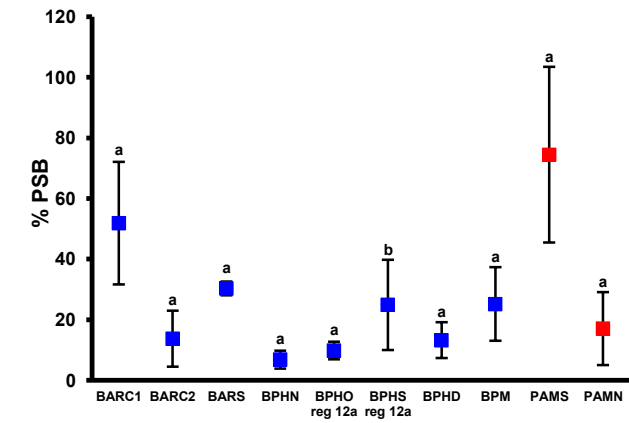
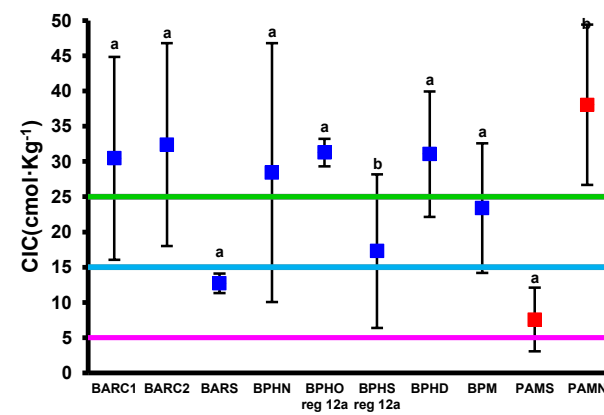
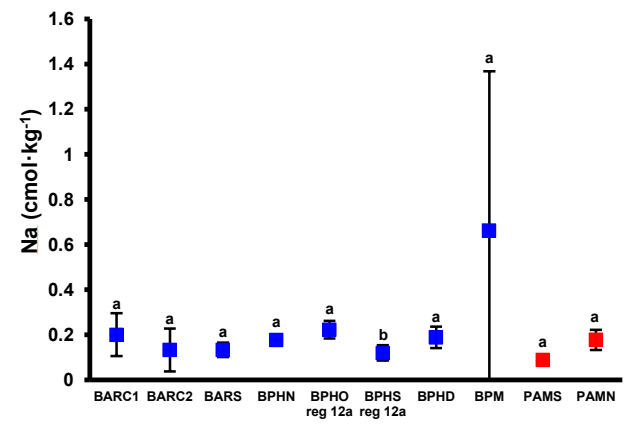
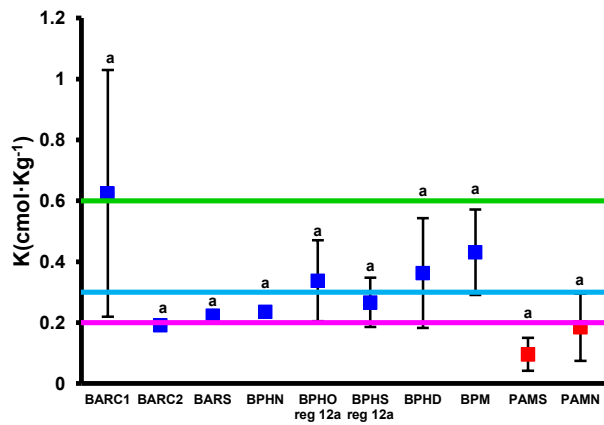
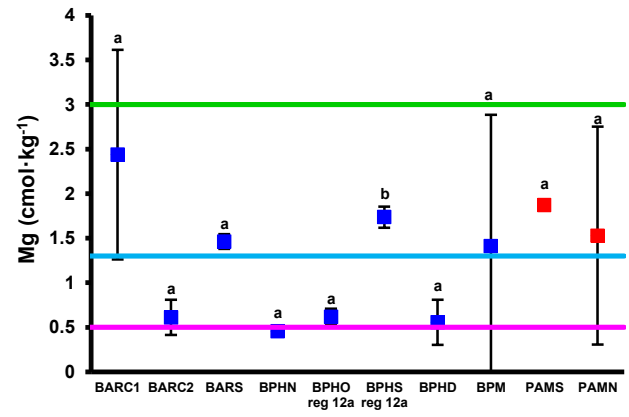
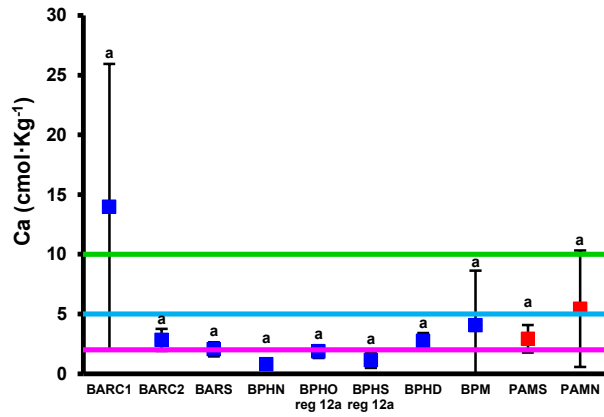


Figura 6. (Continuación)

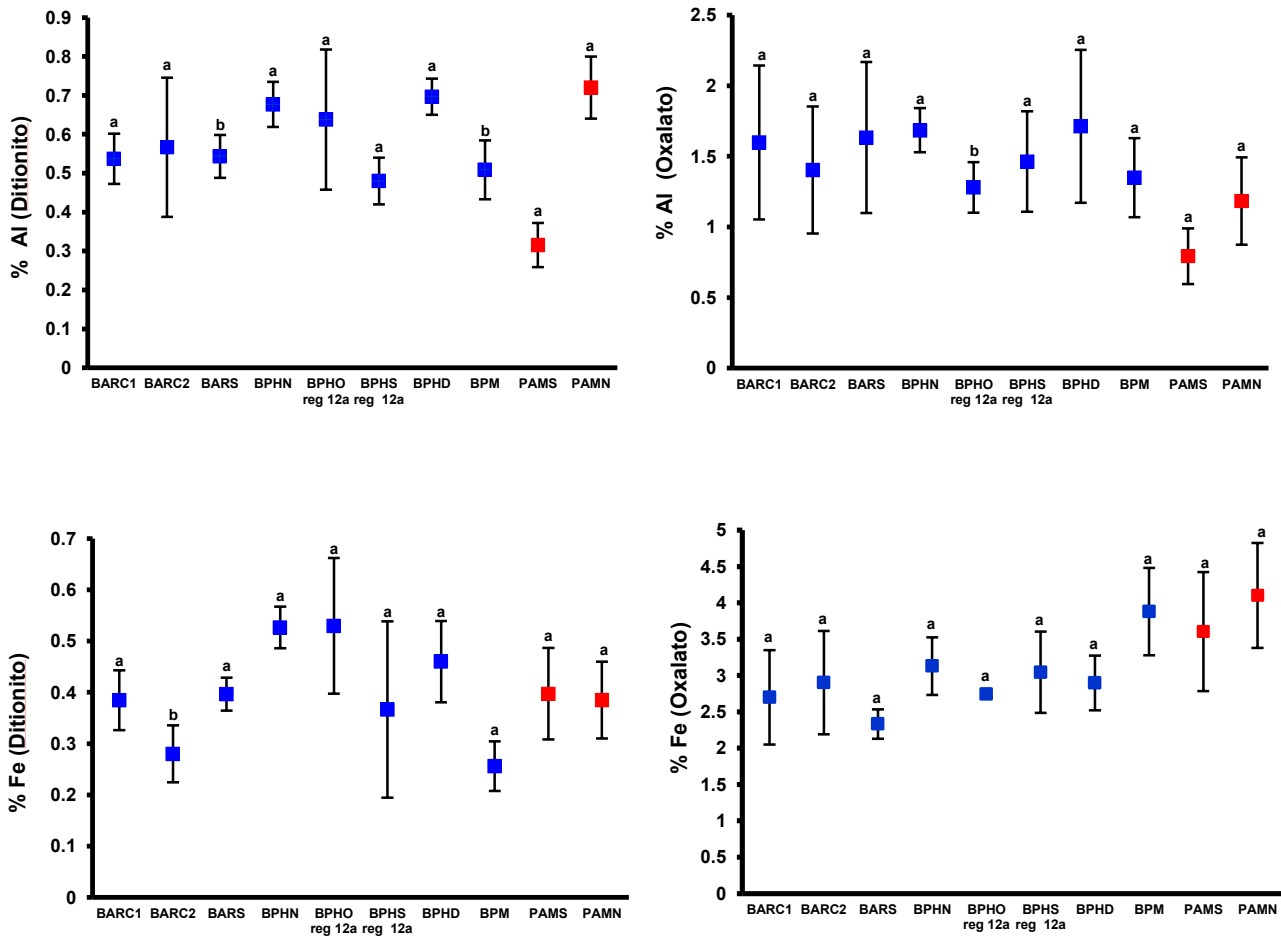


Fig 7. Analisis quimico de Aluminio y Hierro extractable por el método del Oxalato y Ditionito en suelos del PNPO. BARC1 =Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS=Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.

Cuadro 10. Microestructura y clasificación morfológica de los poros en los diferentes tipos de vegetación del PNPO

Sitio	Tipo de estructura				Tipo de poros			
	M	G	BS	Pec	Pca	Pcm	Pcv	Pf
	----- (%) -----							
BARC1	50	10	40	90			10	
BARC2	55		45	90	5		5	
BARS	100			93	5		2	
BPHN	100			72	5	20	3	
BPHOreg	70		30	95	5			
BPHSreg	100			93	5			2
BPHD	100			80	5			15
BPM	90		10	81	10	4	3	2
PAMS	40	45	15	80	10		10	
PAMN	100			90	2		6	2

M=Migajosa, G=Granulosa, BS=Bloques subangulares, Pec=Poros de empaquetamiento compuesto, Pcan=Poros canales, Pcm=Poros cámara, Pcv= Poros cavidad, Pf= Poros Fisura. BARC1=Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal sur; PAMN= Zacatonal norte.

Cuadro 11. Clasificación de los componentes básicos orgánicos y pedorrasgos de excrementos en los diferentes tipos de vegetación del PNPO

Sitio	Materia Orgánica	Excrementos
BARC1	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas), GP: Bueno a moderado, pardo oscuro, MOF: Hifas y carbón orgánico, MOA: No se observó (NSO).	Pardo claro, esferoidal y bacilocilíndrico, ondulada subredondeado, organomineral, porfirica, aleatorio y desintegrado.
BARC2	GD: Fragmento de órganos (raíces hojas y acículas), GP: Bueno a moderado. Pardo rojizo, MOF: Hifas, semillas, esporas y carbón orgánico MOA: NSO	Pardo oscuro a rojizo, esférico y elipsoidal, organomineral, porfirico y mónico, ondulado subredondeado y lisos subondulado, aleatoria, desintegrado y coalescentes.
BARS	GD: Solo contornos de raíces, acículas. GP: Moderado. Pardo oscuro a rojizo. MOF: Semillas, hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	Pardo claro a rojizo, esférica, organomineral, porfirica, aleatorio, desintegrado
BPHN	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno a moderado. Pardo oscuro. MOF: Hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	Pardo oscuro, esférico y bacilocilíndrico, organomineral, porfirica, aleatorio, desintegrado
BPHOreg	GD: Fragmento de órganos (raíces hojas y acículas). GP: Bueno a moderado. Pardo oscuro y rojizo. MOF: Hifas, C. orgánico. MOA: NSO	Pardo claro, esféricos y bacilocilíndrico, ondulado subredondeado, organomineral, aleatorio, porfirico, desintegrado.
BPHSreg	GD: Fragmento de órganos (raíces). GP: Bueno a moderado. Pardo oscuro. MOF: Hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	No se observó
BPHD	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno. Pardo oscuro a claro. MOF: Hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	Pardos claros y oscuros, esféricos, ondulado Subredondeado, organimineral, porfirico, aleatorio, desintegrado.
BPM	GD: Fragmento de órganos (raíces, hojas y acículas). GP: Bueno a moderado. Pardo rojizo a negro, oscuro a claro, MOF: Semillas, esporas, hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	Pardo rojizo y oscuro a pardo claro, elipsoidal, esféricos, bacilocilindrica ondulado subredondeado, organomineral, porfirica, aleatorio, desintegrado.
PAMS	GD: Fragmentos de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno a moderado Color Pardo rojizo a negro. MOF: Hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	Pardo claro y oscuro, esféricos, bacilocilíndricos y clonocilíndricos, organominerales, porfirica, aleatorio, desintegrado.
PAMN	GD: Fragmentos de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno a moderado. Color: Pardo oscuro. MOF: Hifas y carbón orgánico. MOA: NSO	No se observó

Propiedades micromorfológicas. GD=Grado de desmenuzamiento, GP=Grado de preservación, MOF=Material orgánico fino, MOA=Material orgánico amorfo. BARC1= Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte

Cuadro 12. Micromorfología en los diferentes tipos de vegetación del PNPO

SITIO	MASA BASAL	PEDORRASGOS AMORFOS Y CRIPTOCRISTALINOS	MINERALES
BARC1	Fabrica -b- Indiferenciada.	Nódulos,típicos,geódicos amiboidales de materia orgánica de impregnación fuerte	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita, plagioclasa zonales, microclina, ortoclasa) y Ferromagnesianos
BARC2	Fabrica -b- Indiferenciada.	Nódulos típicos, amiboidales de materia orgánica de impregnación fuerte	Feldespatos (Anortita, andesita labradorita ortoclasa) y Ferromagnesianos .
BARS	95%Fabrica –b-indiferenciada. 5% Fabrica moteada.	Nódulo típico, nucleado de materia orgánica de impregnación fuerte.	Feldespatos (Anortita, andesita labradorita plagioclasas) y Ferromagnesianos .
BPHN	Fabrica -b- Indiferenciada.	Nódulos típicos, geódicos amiboidales y nucleados de materia orgánica de impregnación fuerte.	Feldespatos (Albita, anortita, andesita labradorita, microclina). Ferromagnesianos, Vidrio ácido y fragmento de rocas básico.
BPHOreg	Fabrica -b- Indiferenciada.	Nódulos típicos de materia orgánica de impregnación fuerte	Feldespatos (Anortita, albita y andesita Labradorita), Ferromagnesianos y Fragmentos de rocas de tipo básico
BPHSreg	95% Fabrica -b- Indiferenciada 5% Fabrica- Moteada.	Nódulos típicos, geódicos amiboidales, de materia orgánica de impregnación fuerte	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita, Ortoclasa), Ferromagnesianos vidrio ácido.
BPHD	95% Fabrica –b- Indiferenciada 5% Fabrica Estriada Paralela.	Nódulos amiboidales de materia orgánica, de impregnación fuerte	Feldespatos (Anortita y plagioclasas zonales) Ferromagnesianos y vidrio ácido
BPM	95% Fabrica -b- Indiferenciada 5% Fabrica-moteada.	Nódulos típicos, geódicos, amiboidales y nucleados, de materia orgánica de impregnación modera a fuertemente.	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita, plagioclasas zonales, ortoclasas) Ferromagnesianos y vidrio ácido
PAMS	Fabrica- b -Indiferenciada.	Nódulos típicos, nucleados y geódicos de materia orgánica de impregnación Fuerte	Feldespatos (Anortita, albita, plagioclasa zonales), Ferromagnesianos y vidrio ácido.
PAMN	Fabrica-b-Indiferenciada.	Nódulos típicos, geódicos y amiboidales. de materia orgánica de fuerte impregnación	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita y plagioclasas zonales), Ferromagnesianos y fragmentos de roca

BARC1 =Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; BPHN= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; BPHO reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; BPHS reg = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; BPHD=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; PAMS= Zacatonal Sur; PAMN= Zacatonal Norte.

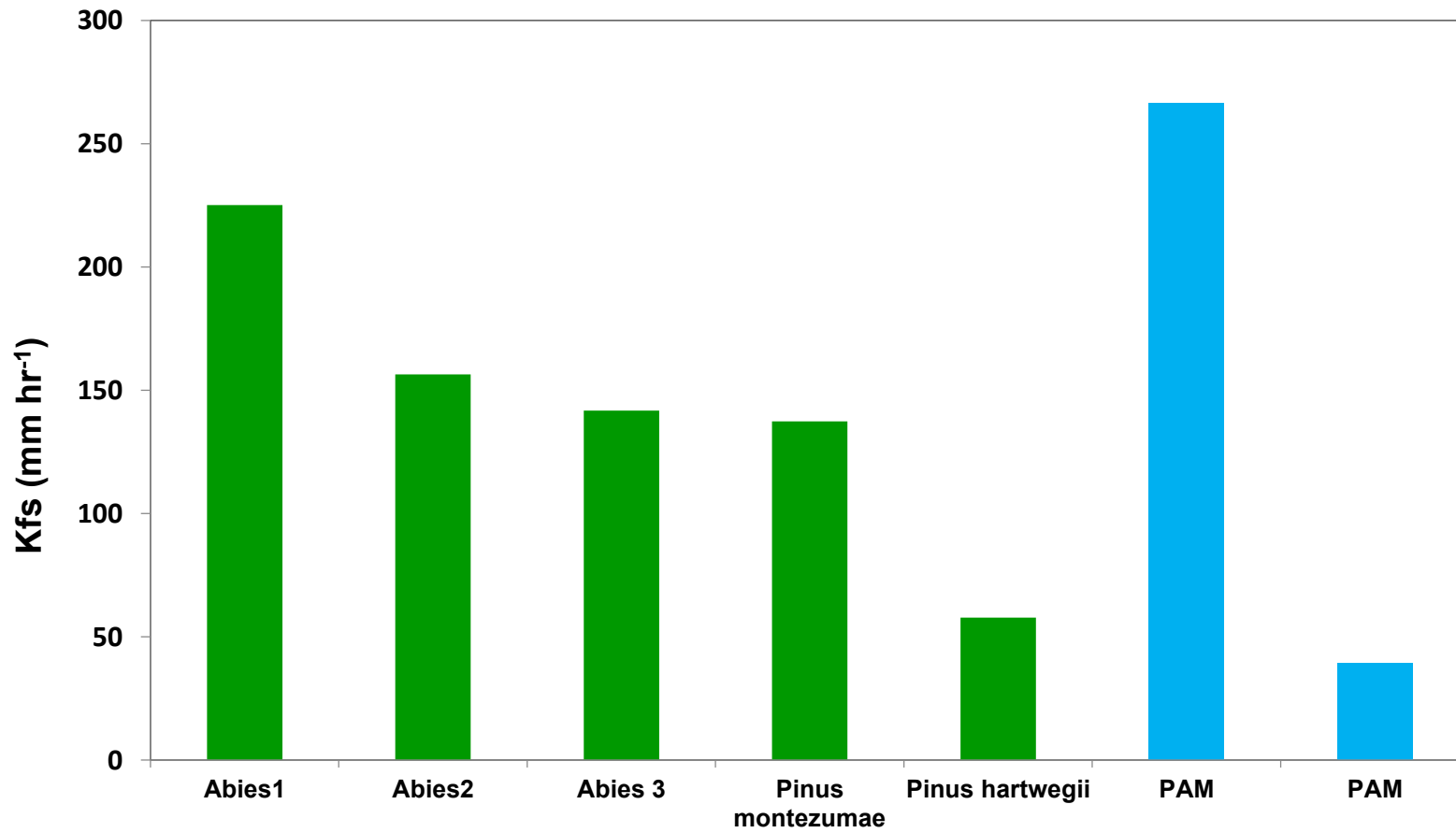


Figura 8. Variación de la conductividad hidraulica, en los diferentes tipos de vegetación del PNPO.

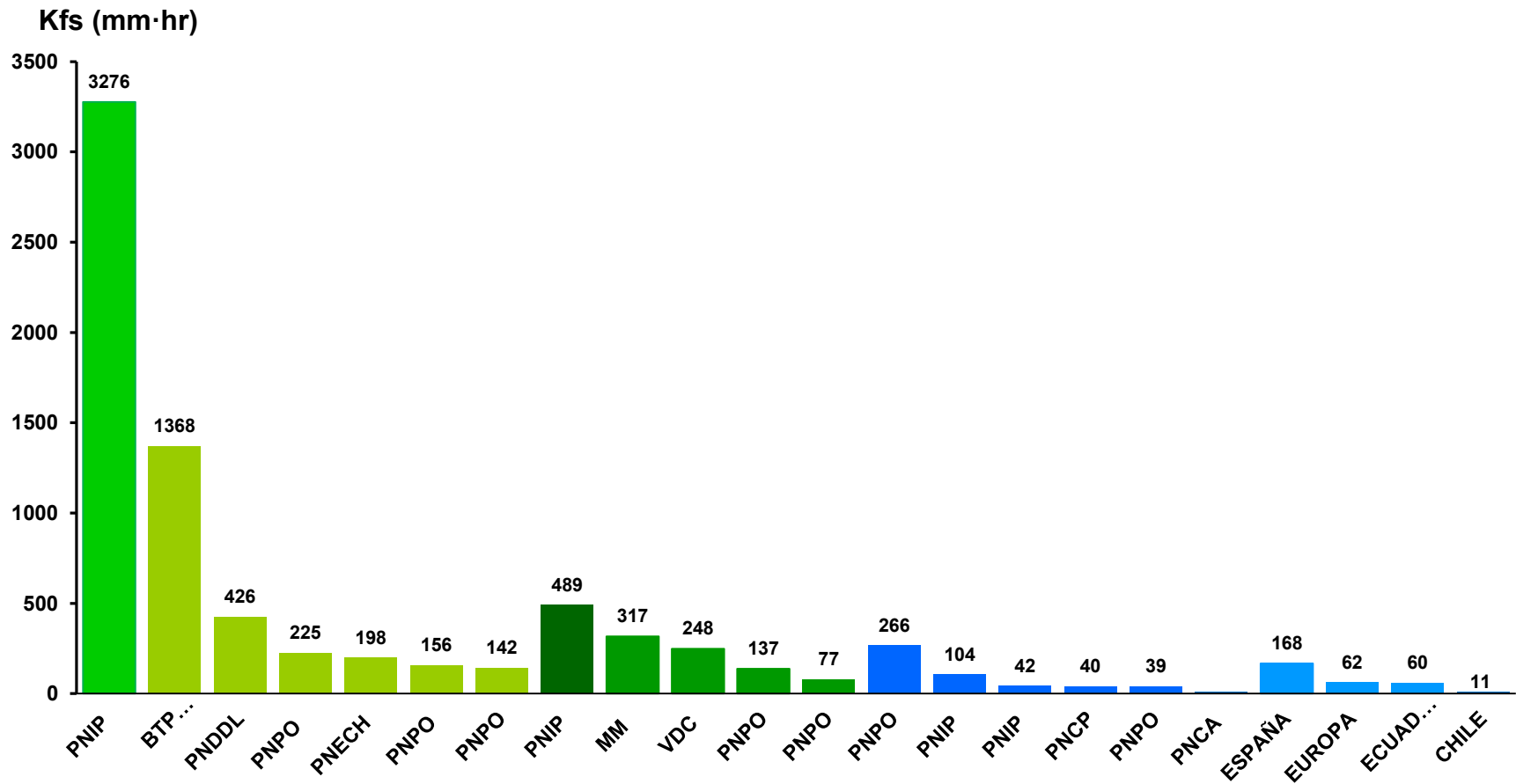


Figura 9. Conductividad hidráulica en bosques de Oyamel y Pino (color verde,) y en Praderas de alta montaña (color azul) en ANP de México y los reportados a nivel internacional. PNIP: Parque Nacional Iztapopo, BTP: Bosque Tropical Perennifolio: PNDDL: Parque Nacional Desierto de los Leones, PNPO: Parque nacional Pico de Orizaba, PNECH: Parque Nacional el Chico, MM: Mineral del Monte, VDC: Villa del Carbón, PNCP: Parque Nacional Cofre de Perote, PNCA: Parque Nacional Cumbres del Ajusco.

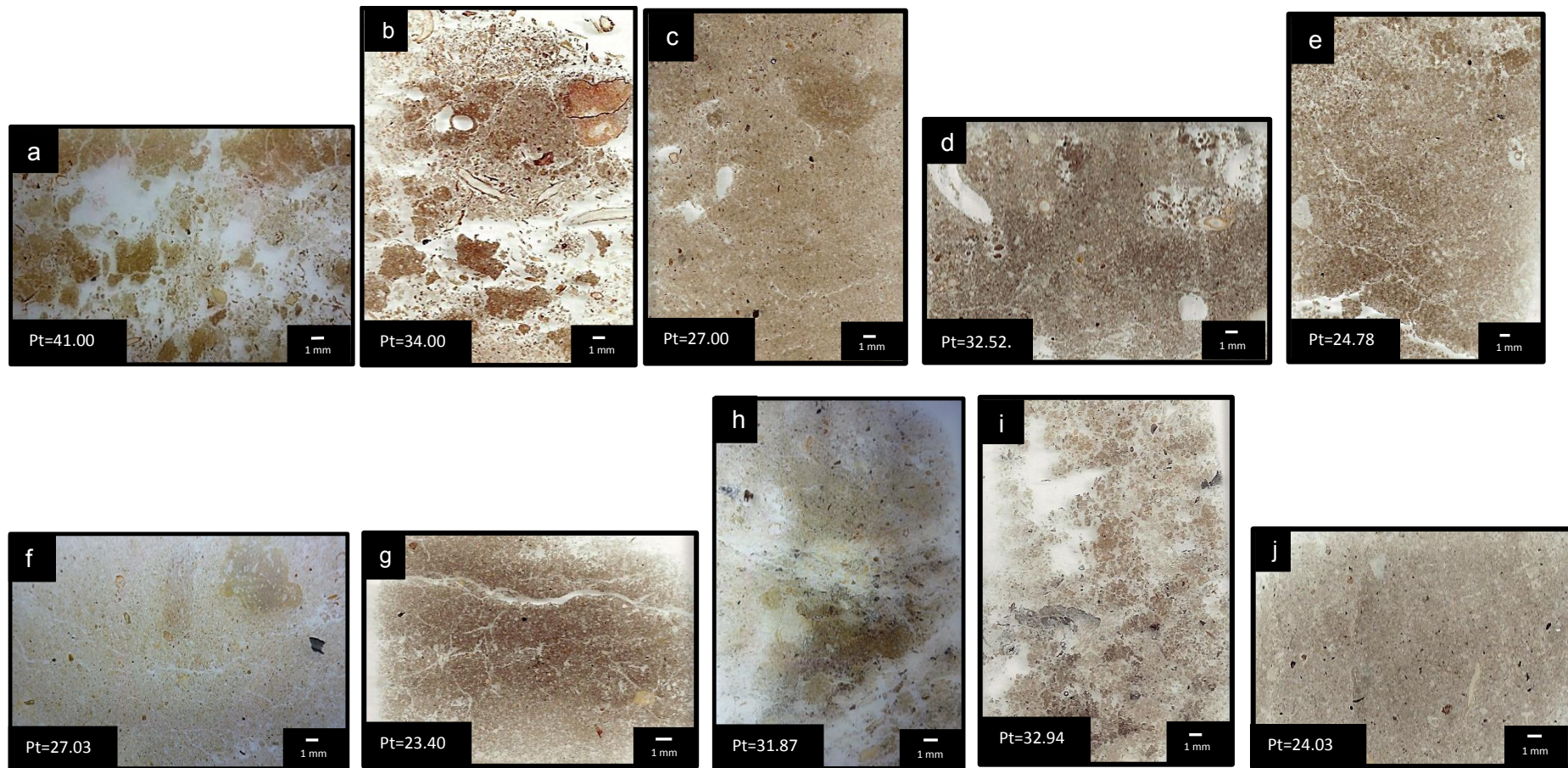


Figura 10. Secciones delgadas de muestras inalteradas de los diferentes tipos de vegetación del PNPO. a)BARC1= Bosque de *Abies religiosa* cañada 1; b)BARC2= Bosque de *Abies religiosa* cañada 2; c)BARS= Bosque de *Abies religiosa* ladera sur; d)BPHN=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte; e)BPHOreg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años; f)BPHSreg= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años; g) BPHD= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado; h)BPM= Bosque de *Pinus montezumae*; i)PAMS= Zacatonal Sur; j)PAMN= Zacatonal Norte.

7.3 Evaluación del efecto de adición de hidróxidos

De acuerdo con las pruebas realizadas en campo, mostradas en la Figura 10, únicamente la adición de KOH 25 ppm y de Ca (OH)₂ a 15 ppm, incrementó 4 veces más la tasa de infiltración superficial. La adición de los otros hidróxidos ocasionó reducciones en la misma tasa.

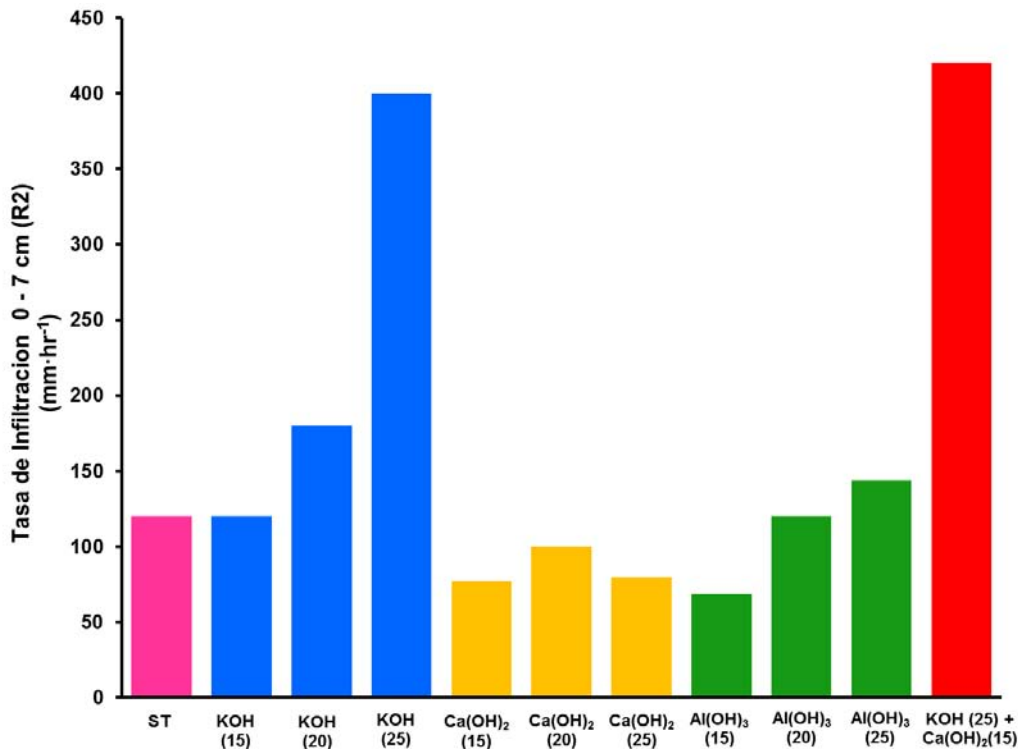


Figura 11. Efecto de la adición de hidróxidos (ppm), sobre la tasa de infiltración en suelos de pastizal en el PNPO (ST=sin tratamiento; K=Potasio; Ca=Calcio; Al=Aluminio).

Evaluación del tratamiento sobre las propiedades hídricas

Conductividad Hidráulica (Kfs). El bosque de BPHD presentó una Kfs de 29.10 (± 2.51) mm·hr⁻¹ y la adición de (KOH 25ppm + Ca (OH)₂ 15 ppm) incrementó a 54.26 (± 5.89) mm·hr⁻¹. En tanto, PAMN obtuvo una Kfs de 39.44 (± 20.54) mm·hr⁻¹ y con el tratamiento se incrementó a 67.91 (± 15.56) mm·hr⁻¹ (Cuadro 13 y Figura 11).

Tasa de Infiltración. El BPHD obtuvo una tasa de infiltración superficial de 199.08 (± 124.60) mm·hr⁻¹ y con el tratamiento de 1008.00 (± 400.87) mm·hr⁻¹. En cuanto a la tasa

de infiltración, a mayor profundidad se registró $72.57 (\pm 61.98) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y con el tratamiento se elevó a $480.00 (\pm 274.95) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$.

En PAMN presentó $800.00 (\pm 346.41) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ de infiltración superficial y con el tratamiento se incrementó a $1018.24 (\pm 127.23) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$. Con respecto a la tasa de infiltración, a una profundidad de 7-15 cm se obtuvo $400.00 (\pm 346.41) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y con el tratamiento se acrecentó a $416.00 (\pm 60.39) \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ (Cuadro 13 y Figura 11).

Potencial de flujo mátrico (Θ_m). El BPHD obtuvo $0.001 (\pm 0.0007) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$ y con el tratamiento aumentó a $0.006 (\pm 0.0024) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$. En PAMN mostró $0.005 (\pm 0.0003) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$ y con la adición del tratamiento se elevó a $0.009 (\pm 0.001) \text{ cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$.

Retención de humedad (%). El BPHD obtuvo $26.19\% (\pm 13.90)$ y con el tratamiento se incrementó a $29.69\% (\pm 11.32)$. En PAMN se encontró $16.19\% (\pm 9.30)$ y la adición del tratamiento lo elevó a $20.06\% (\pm 9.39)$ (Cuadro 13 y Figura 11).

Densidad aparente (DA). El bosque de BPHD mostró un valor de $0.89 (\pm 0.53) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y con la adición de tratamiento se redujo a $0.66 (\pm 0.20) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$. En tanto, PAMN registró $0.88 (\pm 0.70) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y con el tratamiento $0.70 (\pm 0.07) \text{ g}\cdot\text{cm}^3$.

Porosidad Total: El BPHD presentó 23.40% y con la adición del tratamiento se elevó a 28.08% . En tanto, PAMN obtuvo una porosidad de 24.03% y con el tratamiento se incrementó a 26.72% (Cuadro 13 y Figura 11).

Hidrofobicidad. A nivel superficial, el BPHD registró la clase fuertemente repelente (524s); mientras que con la adición del tratamiento resultó en la clase ligeramente repelente (57s) (Cuadro 13) En tanto, a 1, 2 y 3 cm de profundidad no existe repelencia al agua. Para el caso de PAMN a nivel superficial, 1, 2 y 3 cm mostraron la clase fuertemente repelente con valores de 314,268,93,64s respectivamente. La adición del tratamiento solo modificó la parte superficial a la clase ligeramente repelente (50s) y en las demás profundidades permaneció la clase fuertemente repelente.

Cuadro 13. Propiedades hídricas (media \pm desviación estándar) sin tratamiento y con tratamiento (KOH y Ca (OH)₂) en el PNPO.

Sitio	Infiltración (profundidad)		K _{fs}	ϕ_m	Retención de humedad	D.A	Porosidad Total	Hidrofobicidad			
	R2	R1						Profundidad			
	0 – 7cm	7 – 15 cm						0 cm	1 cm	2 cm	3 cm
mm·hr ⁻¹		cm ² ·seg ⁻¹	%	g·cm ³	%	seg					
BPHD ST	199.08 ^a (\pm 124.60)	72.57 ^a (\pm 61.98)	29.10 ^a (\pm 2.51)	0.001 ^a (\pm 0.0007)	26.19 ^a (\pm 13.90)	0.89 ^a (\pm 0.53)	23.40	524	3	4	4
BPHD TX	1008.00 ^b (\pm 400.87)	480.00 ^b (\pm 274.95)	54.26 ^b (\pm 5.89)	0.006 ^b (\pm 0.0024)	29.69 ^a (\pm 11.32)	0.66 ^a (\pm 0.20)	28.08	57	1	2	1
PAMN ST	800.00 ^b (\pm 346.41)	400.00 ^b (\pm 346.41)	39.44 ^{ab} (\pm 20.54)	0.005 ^b (\pm 0.0003)	16.19 ^a (\pm 9.30)	0.88 ^a (\pm 0.70)	24.03	314	268	93	64
PAMN TX	1018.24 ^b (\pm 127.23)	416.00 ^b (\pm 60.39)	67.91 ^b (\pm 15.56)	0.009 ^b (\pm 0.001)	20.06 ^a (\pm 9.39)	0.70 ^a (\pm 0.07)	26.72	50	133	81	62

Letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel $p \leq 0.05$. K_{fs}=Conductividad Hidráulica; Φ_m = Potencial de flujo mátrico; DA= Densidad aparente. BPHD ST= Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado sin tratamiento; BPHD TX=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado con tratamiento; PAMN ST= Zacatonal norte sin tratamiento; PAMN TX= Zacatonal norte con tratamiento.

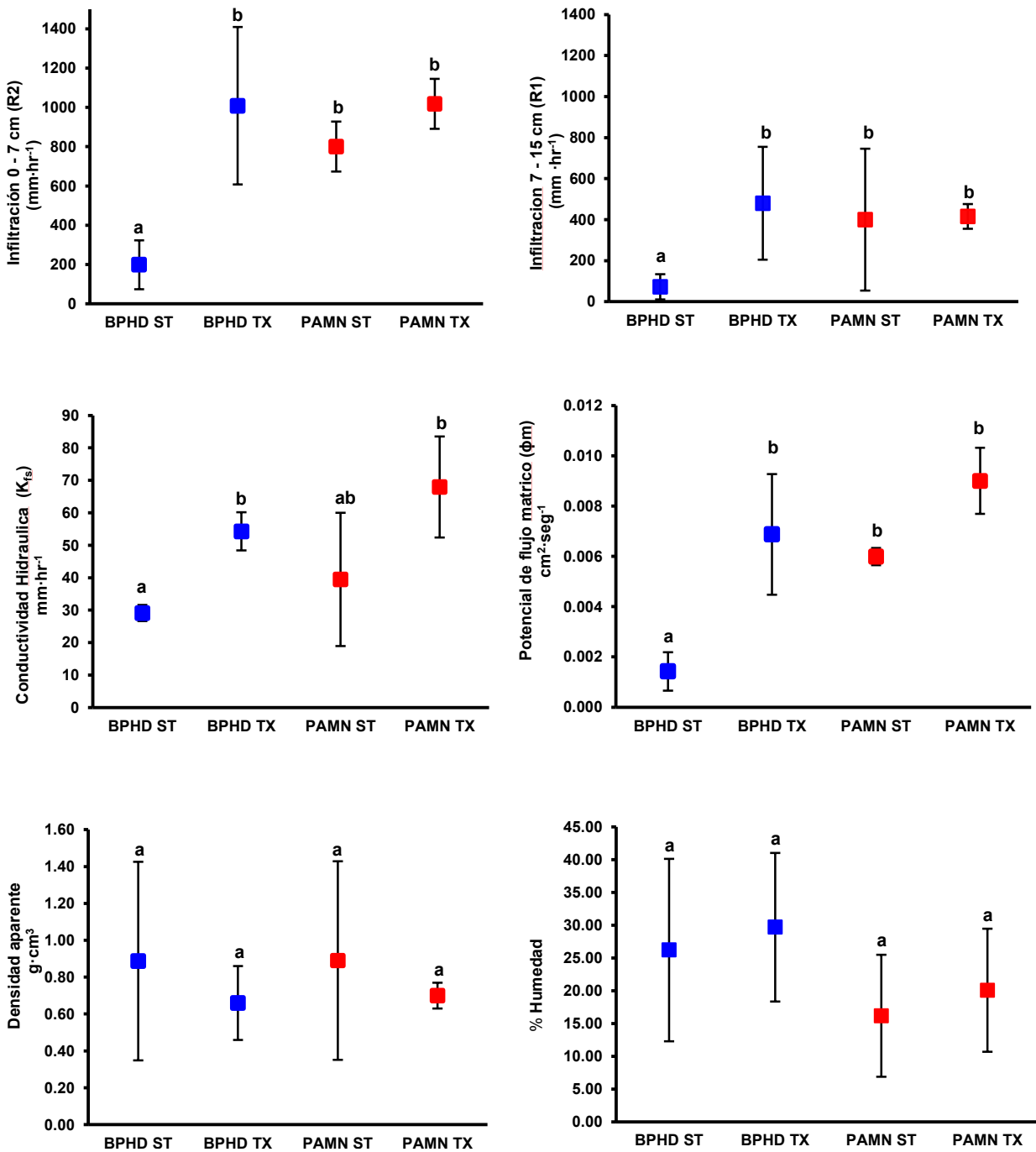


Figura 12. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades hídricas BPHD ST=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado sin tratamiento; BPHD TX=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado con tratamiento (KOH 25ppm + Ca (OH)₂ 15 ppm); PAMN ST=Zacatonal norte sin tratamiento; PAMN TX=Zacatonal norte con tratamiento (KOH 25ppm + Ca (OH)₂ 15 ppm).

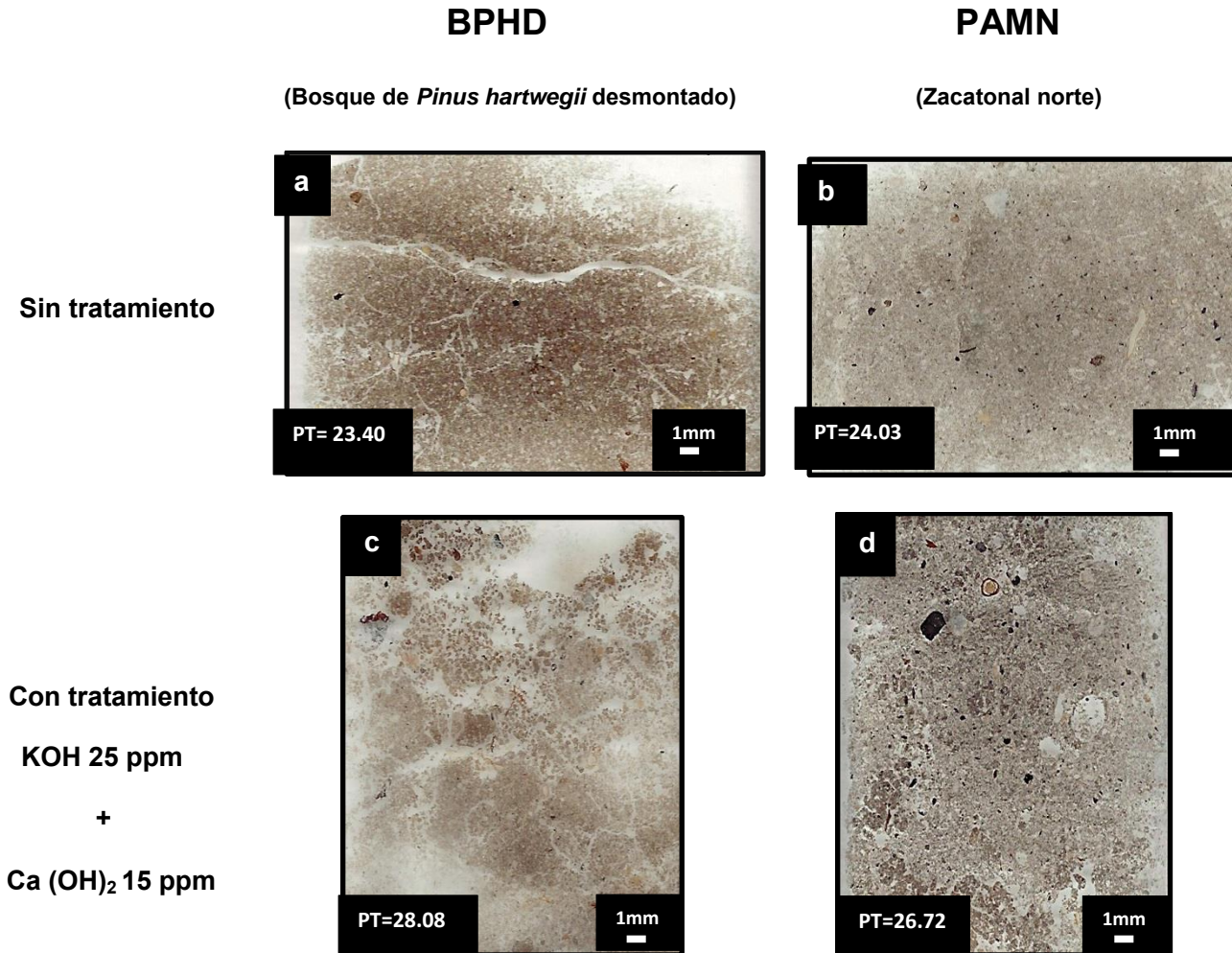


Figura 13. Secciones delgadas de muestras inalteradas a y b) BPHD (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado) y PAMN (Zacatonal norte) sin tratamiento; c y d) BPHD y PAMN con la adición de KOH 25 ppm + Ca (OH)₂ a 15 ppm.

Cuadro 14. Microestructura y clasificación morfológica de los poros antes y después del tratamiento en el PNPO

Sitio	Tipo de estructura			Tipo de poros				
	M	G	BS	Pec	Pcan	Pcam	Pcav	Pfis
	%							
BPHD ST	100			80	5			15
BPHD TX	20	35	45	60	10		25	5
PAMN ST	100			90	2		6	2
PAMN TX	90	10		75	15		10	

BPHD ST = Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado sin tratamiento; BPHD TX=Bosque de *Pinus hartwegii* con tratamiento (KOH + Ca (OH)₂); PAMN ST =Zacatonal norte sin tratamiento; PAMN TX=Zacatonal norte con tratamiento (KOH + Ca (OH)₂. M=Migajosa, G=Granulosa, BS=Bloques subangulares, Pec=Poros de empaquetamiento compuesto, Pcan=Poros canales, Pcm=Poros cámara, Pcv= Poros cavidad, Pf= Poros Fisura.

Cuadro 15. Clasificación de los componentes básicos orgánicos y pedorrasgos de excrementos antes y después del tratamiento en el PNPO

Sitio	Materia Orgánica	Excrementos
BPHD ST	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno, Pardo Oscuro a claro. MOF: Hifas, C orgánico. MOA: no se observó (NSO)	Pardos claros y oscuros, esféricos, ondulado Subredondeado, organomineral, porfírico, aleatorio y desintegrado.
BPHD TX	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas). GP: moderado. Pardo rojizo a Negro. MOF: Hifas, C. Orgánico. MOA: NSO	Pardo oscuros, esféricos, bacilocilíndricos, ondulado subredondeado, organomineral, porfírica, aleatorio y desintegrado.
PAMN ST	GD: Fragmentos de órganos (Raíces y Hoja). GP: Bueno a moderado. Pardo Oscuro. MOF: Hifas y Carbón orgánico. MOA: NSO	No se observó
PAMN TX	GD: Fragmento de órganos (raíces y hojas). GP: Bueno. Pardo Oscuro, rojizo. MOF: Hifas, C. Orgánico. MOA: NSO	Pardo claro, esferoidal, bacilocilíndrico, clonocilíndricos, organomineral, porfírico, aleatorio y desintegrado

BPHD ST=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado sin tratamiento; BPHD TX=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte con tratamiento (KOH + Ca (OH)²); PAMN ST =Zacatonal norte sin tratamiento; PAMN TX=Zacatonal norte con tratamiento (KOH + Ca (OH)₂); GD=Grado de desmenuzamiento, GP=Grado de preservación, MOF=Material orgánico fino, MOA=Material orgánico amorfo.

Cuadro 16. Clasificación micromorfológica antes y después del tratamiento en el PNPO

SITIO	MASA BASAL	PEDORRASGOS AMORFOS Y CRIPTOCRISTALINOS	MINERALES
BPHD ST	95% Fábrica-b- Indiferenciada 5% Fábrica Estriada Paralela.	Nódulos amiboidales de materia orgánica, de fuerte impregnación.	Feldespatos (Anortita, plagioclasas zonales), Ferromagnesianos y Vidrio volcánico.
BPHD TX	Fábrica-b-indiferenciada	Nódulos típicos y amiboidales de materia orgánica con impregnación fuerte.	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita), Ferromagnesianos y Fragmento de rocas.
PAMN ST	Fábrica-b-Indiferenciada.	Nódulos típicos, geódicos y amiboidales de materia orgánica de fuerte impregnación	Feldespatos (Anortita, albita, andesita labradorita, plagioclasas zonales), Ferromagnesianos y Fragmentos de roca.
PAMN TX	Fábrica-b-indiferenciada	Nódulos típicos, nucleados y geódicos de materia orgánica de fuerte impregnación	Feldespatos (Anortita, albita, plagioclasa zonales), Ferromagnesianos y Vidrio volcánico ácido.

BPHD ST=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado sin tratamiento; BPHD TX=Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte con tratamiento (KOH + Ca (OH)²); PAMN ST =Zacatonal norte sin tratamiento; PAMN TX=Zacatonal norte con tratamiento (KOH + Ca (OH)₂).

7.4 Supervivencia del *Pinus hartwegii*

Los resultados muestran que en la zona de zacatonal, el tratamiento con $\text{KOH}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ mostró una supervivencia de 87.4 %; mientras que en la zona desmontada, el KOH resultó el mejor tratamiento con un 100%. La supervivencia en la zona sin tratamiento fue de 60% y 75% para las zonas desmontadas. La reforestación se realizó en septiembre (época de lluvias) y se evaluó a principios de Abril (época seca).

8. DISCUSIÓN

8.1 Bosque de *Abies religiosa*

Propiedades hídricas

Los bosques de *Abies religiosa*, en el PNPO, al presentar la mayor macro porosidad (41%) y la menor hidrofobicidad (25 s) lo que generó las mayores tasas de infiltración y conductividad hidráulica; sin embargo, también presentan una alta capacidad de retención de humedad (30%), debido a la micro porosidad que se encuentran en los agregados migajosos (Pape y Lager, 1994). Esta porosidad se puede explicar porque el bosque de oyamel al tener mayor follaje en la copa, ramas desde la base y mayor cobertura (Ángeles-Cervantes, 2010) contribuyen a un mayor contenido de residuos orgánicos. Estos residuos al descomponerse e integrarse a los agregados del suelo incrementan el espacio poroso macro y micro que contribuyen a la porosidad del suelo (Brady y Weil, 1999). Además, la gran actividad biológica, mostrada en las secciones delgadas, indica una mayor cantidad de microorganismos en el suelo que posiblemente también degradan las sustancias hidrófobas y con sus movimientos generan cavidades cilíndricas o poros (Christon *et al.*, 1997; Swannell *et al.*, 1996).

La densidad aparente y la porosidad del suelo presentan valores similares a los reportados en otros andosoles del eje Neovolcánico como en los bosques de oyamel del Parque Nacional Desierto de los Leones (PNDDL) (González-Vargas, 2011); en el Parque Nacional el Chico (PNECH) (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2008; Ángeles-Cervantes, 2010) y Castro-Alonso (2009) en el PNIP. También, estas propiedades han sido evaluadas bajo otros tipos de vegetación como en el PNCP (Meza-Pérez *et al.*, 2003). Al respecto, Shoji *et al.* (1993) señalan que en los andosoles se presentan valores bajos de densidad aparente y porosidad alta debido a la presencia de materiales amorfos, contenido de humus y formación de microagregados.

El grado de alteración de las cenizas volcánicas y la humificación de la materia orgánica determina que los valores varíen en sus propiedades, por ejemplo en infiltración superficial (1395, 2310 y 2448 mm·hr⁻¹). Estos valores son mayores que los registrados por Ángeles-Cervantes (2010), similares a los reportados por González-Vargas (2011) y menores a los obtenidos por Castro-Alonso (2009) (16 920 a 23 760 mm·hr⁻¹).

La reducción de hasta un 80% en la tasa de infiltración en horizontes subsuperficiales se deben a una reducción del espacio poroso como se observó en las secciones delgadas a pesar de los altos contenidos de materia orgánica. Ángeles–Cervantes (2010) encontró que los incendios forestales pueden afectar la estructura y porosidad del suelo, disminuyendo el espacio macro, pero incrementando los micro poros lo que a su vez aumentan la retención de humedad.

Dorr (2003) menciona que las temperaturas alcanzadas durante un incendio son capaces de alterar el comportamiento hídrico de un suelo. Este proceso ocurre cuando las sustancias orgánicas que se evaporizan son movidas hacia el interior del suelo siguiendo un gradiente de temperatura hasta que llegan a capas interiores más frías que hacen que se condensen en ellas, generándose que la hidrofobicidad se encuentre a una mayor profundidad.

La K_{fs} en los bosques de *Abies religiosa* del PNPO presentaron valores (141.69, 156.44 y 225.11 $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) similares con los de Ángeles-Cervantes (2010) en el PNECH; sin embargo, todos estos valores se consideran bajos con respecto a los reportados por González-Vargas, (2011) en un bosque de oyamel del PNDDL y a los de Castro-Alonso, (2009) en una asociación de un bosque conservado de *Abies-Quercus* en el PNIP.

En cuanto al potencial del flujo mátrico de los suelos del PNPO (0.067, 0.015 y -0.018 $\text{cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$), son similares al citado por González-Vargas (2011) en el PNDDL y bajos con los reportados por Castro-Alonso (2009) en el PNIP. Los valores negativos indican que existen problemas en cuanto a la retención de agua por fuerza de capilaridad afectando la disponibilidad de agua para las plantas.

El porcentaje de retención de humedad de estos suelos (30.06, 29.75, 24.34%) son relativamente semejantes al reportado por González-Vargas (2011) (30%) en el PNDDL y bajos con respecto a los registros de Ángeles-Cervantes (2010) (44.5%) en bosques de oyamel del PNECH.

Con base en lo anterior, se puede decir que las propiedades hídricas en el suelo del PNPO son más bajas, con respecto a otros bosques, lo cual se atribuye a que la hidrofobicidad se incrementó de 5 a 6 veces más a mayor profundidad.

La presencia de residuos carbonizados en las secciones delgadas son una evidencia de que en los bosques analizados ocurrió un incendio forestal. Este incendio

genero hidrofobicidad. Al respecto, Santander-González (2004) encontró que cuando ocurre un incendio se afecta la capa superficial del suelo, y genera una combustión incompleta de los polisacáridos provenientes de la hojarasca y humus del suelo, lo que genera compuestos orgánicos hidrófobos como hidrocarburos saturados, fenoles, esterres y éteres. De acuerdo con Dorr (2003) y Debanó (1991), las sustancias orgánicas hidrofóbicas en la hojarasca y en la superficie del suelo se volatilizan durante el incendio y una parte se desplaza y se condensa a pocos centímetros bajo la superficie del suelo.

Propiedades químicas

Los suelos de los bosques de *Abies religiosa* del PNPO son moderadamente ácidos (5.80, 5.10 y 5.45), según la NOM-021-SEMARNAT-2000, y son similares a los registrados (de 5.0 a 5.9) en la misma zona por Ávila-Bello (2001), así como a los obtenidos en el PNDDL (Romero-Carmona, 1986) y González-Vargas (2011) y en el PNECH (Acevedo-Sandoval *et al.* 2008; Ángeles-Cervantes, 2010). A estos valores de pH se tiene una capacidad de formación de alófono.

Harsh *et al.* (2002) mencionan que el alófono e imogolita se forman cuando el pH se encuentra entre 4.8 y 6; por lo tanto, se presenta una mayor retención de agua en los suelos del bosque de oyamel; asimismo, a estos valores de pH las especies de Al monohidróxido, presentes en solución en los valores de pH 5 y 6.2, no son tóxicas para las plantas (Alcántar-González *et al.*, 2009).

El porcentaje de MOS en estos suelos (12.35, 13.19 y 4.23 %) se ubican en la clase alta y solo un sitio en la clase baja de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000. Los resultados son similares a los registrados por Ávila-Bello (2001) y Acevedo-Sandoval *et al.* (2008); sin embargo, existen registros de valores más altos como los citados por otros autores (González-Vargas, 2011; Santander-González, 2004; Ángeles-Cervantes, 2010), lo que se atribuye a su mayor grado de protección y conservación.

En general, los valores de MOS se explican porque los árboles de *Abies religiosa* presentan copa y ramas casi desde la base y hacen que cubran el suelo, lo que no pasa con los pinos porque su copa es más reducida y sus ramas se localizan en la parte alta del fuste. Además, las bajas temperaturas contribuyen a la baja actividad de los

microorganismos sobre la degradación de la MOS, y por ello se acumula (Tompson *et al.*, 2002).

En las secciones delgadas (Figura 14 y Cuadro 11) se observaron excrementos en proceso de descomposición y otros con mayor grado de descomposición (coloración que van de pardo claro a rojizo, respectivamente), además, de formas esféricas, elipsoidales y bacilocilíndricas, que indica la presencia de lombrices y ácaros. Por otra parte, la presencia de fragmentos y contornos de raíces, acículas y hojas muestran un grado de preservación que va de bueno a moderado es decir que el proceso de descomposición es relativamente variable. De acuerdo con Tomlin *et al.* (1995) y Coleman y Crossley (1996), las lombrices modifican la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados; mientras que, los ácaros tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica acelerando el proceso de descomposición, a través de la fragmentación de los residuos orgánicos.

En cuanto a la fertilidad química de los suelos, el porcentaje de nitrógeno total en estos suelos son bajos (0.27, 0.18 y 0.15 %), pero se encuentran dentro del intervalo registrado en otros bosques. Ávila-Bello (2001), en esta misma zona, obtuvo de 0.16% a 0.50%. En el PNDDL, bajo bosques de oyamel, se obtuvieron valores de 0.87% y 0.14% (Romero-Carmona, 1986; González-Vargas, 2011) lo que se atribuye a su menor grado de conservación. En el PNECH, López-López (2010) reportó 0.61% y Ángeles-Cervantes (2010) porcentajes entre 0.77% a 0.88%.

La concentración de fósforo registrada en los suelos de los bosques de *Abies religiosa* (94.47, 87.13 y 5.78 mg·Kg⁻¹) del PNPO, se clasifican como altos de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 y sólo un sitio registro la clase baja. En suelos de otras áreas naturales protegidas (ANP), López-López (2010) reportó 69 mg·kg⁻¹ en el PNIP; sin embargo, en otras ANP los valores de fósforo disponible son menores: 7.0 mg·kg⁻¹ en el Parque nacional Cofre de Perote (PNCP) (Campos-Cascaredo, 2001), de 3.15 mg·kg⁻¹ en bosques de oyamel del PNDDL (González-Vargas, 2011) y de 1.60 a 3.66 mg·kg⁻¹ en el PNECH (Ángeles-Cervantes, 2010). La gran diferencia en la disponibilidad del fósforo se ha observado a nivel nacional, regional y local (Senthilkumar *et al.*, 2012).

Las altas concentraciones de fósforo, del lado oeste con respecto a la del lado sur, se puede atribuir a que en el PNPO hubo un evento que estuvo caracterizado por la destrucción de un domo central, que generó flujos de bloques y cenizas formando un abanico del lado oeste del cráter (Siebe *et al.*, 1993), y se formaron depósitos de dacitas. Almaxan-Vaxquez (1988) encontró que las dacitas tienen mayor cantidad de fósforo.

Con respecto a los nutrimentos, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ sólo son altos en BARC1, en los otros es bajo y se le atribuye a los altos porcentajes de humedad como se observan en la Figura 5. Al respecto Ruiz- López *et al.* (2012) y Julca-Otiniano *et al.* (2006) mencionan que los altos contenidos de humedad aceleran el proceso de degradación de la materia orgánica; además, indican la presencia de un humus joven o lábil que todavía no ha sido fijado a las partículas del suelo y que por la tanto es sede de acumulación de nutrimentos

Estos mismos autores señalan que otra parte de los nutrimentos se encuentran ligados a la fracción mineral como se observó en el análisis del Cuadro12 donde se muestra la abundancia de las rocas de tipo ortoclasa, anortita y albita labradorita respectivamente.

La CIC registró valores altos y bajos, con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (30.45, 32.39 y 12.70 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$); sin embargo, se han reportado valores más altos como los de González-Vargas (2011) en el PNDDL y Ángeles-Cervantes (2010) en el PNECH, lo que se atribuye a su relación con el contenido de materia orgánica. Li *et al.* (1998) concluyeron que la capacidad de intercambio catiónico en suelos forestales está influenciada primeramente por la cantidad de materia orgánica, los minerales de rango corto y los contenidos de arcilla en el suelo.

El porcentaje de PSB mostró valores (51.83, 13.68 y 30.30 %) semejantes a los registrados en otras áreas naturales (ANP) como en el PNDDL y en el PNECH (González-Vargas 2011; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2008) respectivamente.

El porcentaje de aluminio extractable por ditionito en suelos del PNPO presentó valores bajos (0.53, 0.56 y 0.54%) de acuerdo con lo reportado en el PNCP (Campos-Cascaredo, 2001) y en el PNECH (Acevedo-Sandoval, 2008) de 2.45 y 2.39%, respectivamente.

Para el caso del aluminio extraído por oxalato ácido (1.59, 1.40 y 1.63%), los valores encontrados son similares a los reportados por otros autores, como en el PNECH (Acevedo-Sandoval, 2008); en el PNIP (López- López, 2014) y en el PNCP (Campos-Cascaredo, 2001). Paterson *et al.* (1993) mencionan que el aluminio extraído por oxalato ácido tiende a ser considerado como un representante de oxihidróxidos e hidróxidos de Al, los cuales pueden estar o no asociados con sustancias húmicas y aluminosilicatos amorfos. En tanto Acevedo-Sandoval (2008) indica que existe la presencia de aluminosilicatos de bajo grado de cristalinidad, es decir, hay minerales amorfos como el alófano y la imogolita, lo que puede explicar los valores altos en las propiedades hídras en estos suelos del PNPO.

En México, son pocos los trabajos que se reportan acerca del hierro en suelos. En el PNPO, en suelos bajo bosques de *Abies religiosa*, el hierro extraído por ditionito mostró valores de (0.38, 0.28 y 0.39%), los cuales se encuentran dentro del rango según los trabajos reportados por Hernández-Ordoñez (2014) en Villa del carbón, estado de México y Sadzawka *et al.* (1995) en Chile.

Los valores de Fe extraído por oxalato ácido (2.70, 2.90 y 2.33%) en el PNPO también oscilan en el intervalo según lo obtenidos por varios autores (González-Montiel, 2013; López-López, 2014; Hernández-Ordoñez, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995), respectivamente.

Interpretación ecohidrológica

Las propiedades químicas del suelo del bosque de oyamel del PNPO como el pH y su relación con la formación de alófano e imogolita contribuyen a explicar la gran retención de humedad. Además, la MOS favorece la actividad biológica de los microorganismos y explica su importancia en la formación de macro poros lo que disminuye el efecto de la hidrofobicidad, favoreciendo la infiltración y K_{fs} . La presencia de Ca^{2+} Mg^{2+} y K^+ no muestran relación con los valores de infiltración ni conductividad hidráulica, pero sí con la retención de humedad, lo que posiblemente se explique por los minerales que forman aluminosilicatos como los feldspatos, que aunado a la detección de aluminio relacionado con compuestos oxihidróxidos e hidróxidos de Al explican la alta retención de

humedad en estos suelos, esta alta infiltración, conductividad hidráulica e infiltración contribuyen a una alta riqueza de especies vegetales lo que a su vez explica la alta riqueza faunística, ya que en estos bosques Ruiz-Serrano (2014) encuentra la mayor riqueza faunística del PNPO.

8.2 Bosques de *Pinus*

Propiedades Hídricas

Los suelos de los bosques de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* son hidrófobos ya que registraron la clase fuertemente y severamente repelente, similares al reportado por Hernández-Ordoñez (2014) en Villa del Carbón, Estado de México. En otros bosques de *Pinus* González-Montiel (2012) encontró suelos extremadamente repelentes, en Mineral del Monte, Hidalgo. Los suelos de los pinares también presentan baja porosidad, en consecuencia ocurre una densidad aparente alta. Cuando los andosoles presentan altas densidades indican que los suelos son muy jóvenes y que el intemperismo no ha generado productos secundarios para producir amorfos e interactuar con la materia orgánica (Brady y Weil, 1999). Estas propiedades se encuentran dentro del intervalo reportado por otros autores, como los de González-Montiel (2013), Hernández-Ordoñez (2014) y Acevedo-Sandoval (2010), en otros bosques de pino.

La alta hidrofobicidad y la baja porosidad explican las menores tasas de infiltración y de K_{fs} registradas en el PNPO y está relacionada con los disturbios ya que los menores valores correspondieron al bosque de *Pinus hartwegii* afectado por tala. Por otro lado, cuando estos bosques se encuentran en proceso de recuperación presentan valores intermedios y se asemejan a lo reportado para otros bosques como los de Martínez-Hernández (2012) y González-Montiel (2013); no obstante, también se han encontrado valores mayores como los de Castro-Alonso (2009) ($3348 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) en el PNIP y Hernández Ordoñez (2014) ($2672 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) en Villa del Carbón, Estado de México. En general, los bosques de pinos del PNPO presentan valores de infiltración y K_{fs} bajos e intermedios con respecto a los registrados en otros pinares.

En cuanto al potencial de flujo mátrico los bosques de pino presentaron valores (0.061, 0.004, -0.006, 0.001 y 0.030 $\text{cm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$) similares a los reportados por Hernández-Ordoñez (2014) en Villa del Carbón, Estado de México; sin embargo, se consideran bajos con los encontrados por Castro-Alonso (2009) en el PNIP.

Propiedades químicas

Los suelos bajo bosques de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* del PNPO registraron la clase fuertemente y moderadamente acida de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000. (4.90, 4.93, 4.98, 4.85; 5.10), y son semejantes con los de González-Montiel (2013) y Hernández-Ordoñez (2014). En Colombia Cavelier *et al.* (1999) mostró 5.53 en bosques de *Pinus radiata*.

El porcentaje de materia orgánica y N total de estos suelos va de la clase muy baja, media y alta, lo que se debe a que los bosques de pino son de diferente edad y se presentan en parches, además el sitio desmontado presenta una gran cantidad de MOS. Esta variación también ocurre en otros bosques estudiados por González-Montiel (2013), Hernández-Ordoñez (2014) y Acevedo-Sandoval (2010).

El porcentaje de fósforo disponible obtuvo la clase baja, media y alta sin embargo, son mayores al compararlos con los de González-Montiel (2013) y Hernández-Ordoñez (2014). De acuerdo con Shoji *et al.* (1993), los andosoles relativamente jóvenes, derivados de basaltos pueden presentar altos valores de P, además del P de las Dacitas que surgieron por actividad volcánica.

Los valores de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ también presentaron la clase muy baja y baja, pero se encuentran dentro del intervalo citado por otros autores. Acevedo-Sandoval (2010) González-Montiel (2013), Hernández-Ordoñez (2014) y Cavelier *et al.*, (1999).

Para el caso del Na^+ , CIC y PSB registraron valores similares a los obtenidos por González-Montiel (2013) y Hernández-Ordoñez (2014).

Los suelos de los BPM presentan los mayores valores de N, P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ con respecto a los demás bosques de pinos a esto se le atribuye a que estos se encuentran en planicie, es zona receptora lo que favorece la acumulación de MOS y nutrimentos.

El porcentaje de aluminio extractable por oxalato ácido se consideran bajos con respecto a los reportados por Hernández-Ordoñez (2014) en Villa del Carbón, Estado de México; sin embargo, el aluminio extraído por ditionito son semejantes.

Los valores de aluminio, por oxalato ácido, dan una aproximación del grado de acumulación de productos amorfos de reciente alteración. Los materiales extraídos con oxalato ácido tienen influencia sobre algunas de las propiedades del suelo. Altos porcentajes de Al_0 están asociados con horizontes que presentan una elevada carga dependiente del pH y con una alta capacidad de fijación al fósforo.

McKeague y Day (1966) mencionan que la fracción amorfa de los suelos se relaciona con problemas de dispersión, floculación agregación, infiltración, erosión y estabilidad de los terrenos.

La cantidad de hierro extractable por oxalato ácido presentaron valores mayores a los encontrados por González-Montiel (2013) y similares a los de Hernández-Ordoñez (2014) (Villa del Carbón, Estado de México), quien además registra valores mayores en el Fe determinado por ditionito.

Interpretación ecohidrológica

Estos bosques presentan suelos, con menor porosidad y una alta hidrofobicidad (fuertemente y severamente repelentes), lo que ocasiona que también presenten las menores tasas de infiltración superficial, K_{fs} y porcentaje de humedad del suelo del PNPO. La menor porosidad y la alta hidrofobicidad se atribuyen a que estos bosques han sido afectados por incendios, cuyos vestigios de restos carbonizados se observaron en las secciones delgadas. Santander-González (2004) reportó que un incendio superficial ocasiona una oxidación incompleta lo cual genera compuestos orgánicos hidrófobos como fenoles, esteres y éteres. De acuerdo con Debanó (1991), las sustancias orgánicas hidrofóbicas se desplazan y condensan a pocos centímetros bajo la superficie del suelo.

Ángeles-Cervantes (2010) registró una reducción en la porosidad ocasionada por incendios superficiales, por lo que se puede inferir que los bosques de pino estudiados en el PNPO sufrieron incendios superficiales y generó reducción en la porosidad, mayor hidrofobicidad del suelo. Este fenómeno también explica la disminución en la infiltración

(a nivel superficial como a una mayor profundidad) y en la conductividad hidráulica, por lo que se generan escorrentías que ocasionan la erosión lo cual puede ser observado en varias zonas del PNPO. Con base a esto se recomienda construir represas en las cañadas de los bosques. En cuanto a las propiedades químicas, la acidez de estos suelos se relaciona con la disponibilidad de nutrimentos pero no con las propiedades hídricas del suelo. La productividad vegetal es menor y coincide también con lo registrado por Ruiz-Serrano (2014) quien registro menor cantidad de mamíferos terrestres.

8.3 Zacatonales o Pradera de alta montaña

Las praderas de alta montaña presentan propiedades hídricas altamente variables por lo que no mostraron diferencias significativas, pero la hidrofobicidad fue el factor más importante. En PAMS se registró nula hidrofobicidad y por lo tanto obtuvo los valores más altos de infiltración y K_{fs} . En tanto que el ubicado en la ladera norte (PAMN) mostró ser fuertemente hidrófobo, con mayor micro porosidad y tiende a registrar los menores valores de infiltración y K_{fs} . Por otro lado, los valores de hidrofobicidad son similares a los registrados en otras praderas de otros Parques Nacionales de México.

La tasa de infiltración superficial (TIS) en PAMS presentó un promedio de $2515.77 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$, mientras que PAMN obtuvo $800 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$. Ambos valores son bajos con respecto a los reportados por Aldana-Pérez (2012) y Jiménez-Cruz (2011). La K_{fs} encontrada en PAMS y PAMN fue de 266 y $39 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ los cuales se ubican dentro de los registrados por Jiménez-Cruz (2011), Aldana-Pérez (2012) y Castro-Alonso (2009) respectivamente.

Es interesante señalar, que la TIS, en suelos del PNPO y en otras áreas naturales (ANP) de México, es mayor que los reportados a nivel internacional por Zehetner y Miller (2006) en los Andes Ecuatorianos. La K_{fs} del PNPO es similar a los registrados a nivel internacional, tanto en Ecuador (Poulenard *et al.*, 2001; Buytaert *et al.*, 2005); Chile (Sandoval *et al.*, 2007); España (Arbelo *et al.*, 2002) y en Europa (Fontes *et al.*, 2004) respectivamente.

El potencial de flujo mátrico en PAMS presentó valores de $0.014 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ y en PAMN de $0.005 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, los cuales son semejantes a los reportados por Jiménez-Cruz (2011) y Sandoval *et al.*, (2007); sin embargo, valores mayores se han reportado como los de Castro-Alonso (2009) y Aldana-Pérez (2012) en una pradera de alta montaña del PNIP. La retención de humedad en PAMS es menor (11.34%) que la registrada en PAMN (16.19%); no obstante, fluctúa en el intervalo reportado en otras ANP de México y lo registrado a nivel internacional por Aldana-Pérez (2012) en el PNIP, Jiménez-Cruz (2011) en el PNCA, Cruz-Ruiz (2009) en el PNNT (Parque Nacional Nevado de Toluca), Estupiñán-Bravo (2002) en páramos de Guachaneca, Colombia, y Arbelo (2002) en Islas Canarias, España.

La densidad aparente no presenta variaciones, en PAMS fue de $0.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ y en PAMN de $0.88 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$; y también se encuentran en el intervalo reportado por otros autores como los de Jiménez-Cruz (2011) en el PNCA, Aldana-Pérez (2012) en el PNIP, Campos-Cascaredo (2001); Meza-Pérez y Geissert-Kientz (2006) en el PNCP, Kleberet *al.*, (2004) en Alemania, Fontes *et al.*, (2004) y Arbelo (2002) en Azores, España; Estupiñán-Bravo (2002) en Colombia, Alvarado y Forsythe (2005) en Costa Rica respectivamente.

El único factor que fue mayor en la PAMN es el porcentaje de humedad y se atribuye a que existe gran cantidad de micro poros como se observa en las secciones delgadas (Figura 9). La humedad proviene de los fenómenos como Nortes y los huracanes que vienen del Golfo de México, por lo que estas PAM favorecen la retención de agua.

Propiedades químicas

El pH (H_2O) en PAMS y PAMN del PNPO (5.20 y 4.83) mostraron la clase moderadamente ácida y fuertemente ácida según la NOM-021-SEMARNAT-2000; asimismo, ambas praderas se encuentra dentro del intervalo reportado en otras ANP de México y los registrados a nivel internacional como en el PNNT (Cruz-Ruiz, 2009), en el PNCP (Campos-Cascaredo, 2001), en el PNCA (Jiménez-Cruz, 2011), en PNIP (Aldana-Pérez, 2012), en Colombia (Cavelier *et al.*, 1999 y Estupiñán-Bravo, 2002) y en Ecuador (Hofstede, 1997) respectivamente.

El porcentaje de materia orgánica en PAMS se ubica en la clase muy baja y PAMN en la clase baja (2.77 y 5.90%) de acuerdo con la norma citada anteriormente. En otras áreas como el PNCA (Jiménez-Cruz, 2011) se presentaron valores de hasta 1.6%; sin embargo, todos estos valores son menores que los reportados en el PNNT (Cruz-Ruiz, 2009) y que los registrados a nivel internacional, como en las Islas Canarias, España (Arbelo, 2002); en paramos no alterados de Guachaneca, Colombia (Estupiñán-Bravo, 2002) y en Ecuador (Hofstede, 1997; Borja *et al.*, 2008).

En general, los valores de MOS en las praderas de alta montaña de la porción norte y sur se consideran bajas, lo cual puede ser explicado por la magnitud del aporte anual de restos orgánicos y por el porcentaje de materia orgánica que se descompone, al mismo tiempo por las bajas temperaturas. En la PAMN se atribuye a la mayor hidrofobicidad ya que es un suelo mineral por lo que presenta una baja productividad y la menor cantidad de restos vegetales y animales como se muestra en las secciones delgadas en la Figura 23.

El porcentaje de nitrógeno total en suelos bajo pastizales (PAMS y PAMN) del PNPO registraron la clase baja (0.10 y 0.27%) según la NOM-021-SEMARNAT-2000, pero se encuentran dentro del intervalo lo reportado por Jiménez-Cruz (2011) en el PNCA, Cruz-Ruiz (2009) en el PNNT, Taiwan y Farrell *et al.* (2010) en praderas de Europa, Arbelo *et al.* (2002); Shing y Yu (2003) en España, Hofstede (1997) en el páramo El Ángel, Ecuador y Estupiñán-Bravo (2002) en páramos de Guachaneca, Colombia respectivamente.

La concentración de fósforo disponible en PAMS mostró la clase media (20.46 mg·Kg⁻¹); mientras que en PAMN se obtuvo la clase alta (146.60 mg·Kg⁻¹). Al respecto Jiménez-Cruz (2011) reportó 93.05mg·Kg⁻¹ en el PNCA. Los valores de fósforo en las ANP de México son mayores que las registradas por Estupiñán-Bravo (2002) de 16.8mg·Kg⁻¹ en Colombia. Las mayores concentraciones de fósforo en PAMN con respecto a la PAMS pueden atribuirse por la cantidad de minerales y a las Dacitas de origen volcánico.

El Ca²⁺ intercambiable en PAMS (2.92cmol·kg⁻¹) registró la clase baja y PAMN (5.43 cmol·kg⁻¹) la clase media de acuerdo a la norma; no obstante, valores similares se han reportado en otros parques como en el PNNT (Cruz-Ruiz (2009), en el PNCP (Campos-

Cascaredo, 2001) y en el PNCA (Jiménez-Cruz ,2011); sin embargo, todos estos valores se consideran menores que los reportados por Aldana-Pérez (2012) en una pradera de alta montaña en el PNIP y Cavalier *et al.* (1999) en pastizales de Colombia.

En cuanto al Mg^{2+} , ambas praderas (PAMS y PAMN) obtuvieron valores medios (1.87 y $1.52 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) y oscilan en el intervalo a lo reportado por otros autores. Cruz-Ruiz (2009) en el PNNT, Campos-Cascaredo (2001) en el PNCP, Jiménez-Cruz (2011) en el PNCA, Aldana-Pérez (2012) en el PNIP y Cavalier *et al.*, (1999) en pastizales de Colombia.

El K^+ en estos suelos del PNPO (0.09 y $0.18 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$) presentaron la clase muy baja pero son similares a los de Jiménez-Cruz (2011) en el PNCA, Campos-Cascaredo *et al.*, (2001) en el PNCP, Aldana- Pérez (2012) en el PNIP y Cavalier *et al.*, (1999) en paramos de Colombia; asimismo, valores mayores se han encontrado como los de Cruz-Ruiz (2009) en el PNNT.

La concentración de Na^+ en praderas (PAMS y PAMN) del PNPO (0.08 y $0.17 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) reportaron valores semejantes a los encontrados en otros trabajos como los de Campos-Cascaredo (2001), Jiménez-Cruz (2011), Aldana-Pérez (2012) y Cavalier *et al.*, (1999).

La CIC en PAMS mostró la clase baja y en PAMN la clase alta (7.56 y $38.05 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, pero solo la pradera ubicada en la ladera norte es similar al que reporta Cruz-Ruiz (2009) en el PNNT y Cavalier *et al.*, (1999) en pastizales de Colombia.

El PSB en PAMS (74.48%) fue mayor que la registrada en PAMN (17.01%). La PAM norte solo es semejante a la reportada por Cavalier *et al.*, (1999) en pastizales de Colombia.

El aluminio por oxalato ácido y por ditionito en pastizales (PAMS y PAMN) del PNPO mostraron (0.79 y 1.18%) (0.31 y 0.72%) valores bajos con respecto a los reportados por Campos-Cascaredo (2001) en el PNCP. En cuanto al Fe extraído por oxalato y ditionito en PAMS y PAMN registraron (3.38 y 4.10%) (0.39 y 0.39%) valores altos y bajos comparados con los de Campos-Cascaredo (2001) en el PNCP.

Interpretación ecohidrológica

La variabilidad que hay entre PAMS y PAMN del PNPO se atribuye a que ocurrió un incendio, con mayor intensidad en lado sur y de menor intensidad en el lado norte. Esta variabilidad es observada en las secciones delgadas (Figura 9), donde incendios de mayor intensidad destruyeron las capas hidrófobas y formaron estructuras de bloques subangulares y por lo tanto generaron mayor porosidad e incrementaron la infiltración y la K_{fs} . De acuerdo con Santander-González (2004), los incendios de menor intensidad, tienden a formar compuestos como fenoles, esterres y éteres, que son hidrófobos; además, el suelo se deshidrata y se colapsa generando que se compacte y disminuya la porosidad, la infiltración y la K_{fs} . Resultados similares se han encontrado en sitios afectados por incendio (Ángeles-Cervantes, 2010). Los fenómenos atmosféricos como los nortes y huracanes generan mayor precipitación y las propiedades hídricas contribuyen a una mayor retención de humedad en la porción norte más que en la sur y por eso también existe una alta variabilidad en las propiedades hídricas. El Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^{2+} no registraron relación con las propiedades hídricas; sin embargo, el P mostró concordancia con la retención humedad.

8.4 Efecto de Tratamientos con hidróxidos

La adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no incrementaron las propiedades hídras; pero si la adición de KOH que ocasionó incrementos en las propiedades hídras en los suelos del bosque de *Pinus hartwegii* y zacatonal norte: infiltración superficial (de 199 a $1000\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y de 800 a $1018\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$), subsuperficial de (72.57 a $480\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y 400 a $416\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) y K_{fs} de (29 a $54\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ y 39.44 a $67.91\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$). No se presentaron efectos sobre la densidad aparente ni en la porosidad total, lo cual se le atribuye a que el hidróxido solo actuó sobre la capa hidrófoba del suelo y disminuyó el nivel de fuertemente repelente a ligeramente repelente.

El posible modelo que explica la destrucción de la capa hidrófoba es el siguiente: La descomposición de la materia orgánica, produce alcoholes que reaccionan con los ácidos grasos, para formar ésteres que son los que generan una capa hidrófoba en los primeros centímetros del suelo y en consecuencia no permite el ingreso y movilidad del agua. Los ésteres más comúnmente encontrados en la naturaleza son los ésteres de glicerina y ácidos grasos (ácido oleico, ácido esteárico, etc). Estas grasas o ésteres pueden ser descompuestos por ácidos o bases fuertes y como resultado, se descomponen en un alcohol y un ácido carboxílico, o una sal de un ácido carboxílico (Mc Murry, 2008) Figura 14.

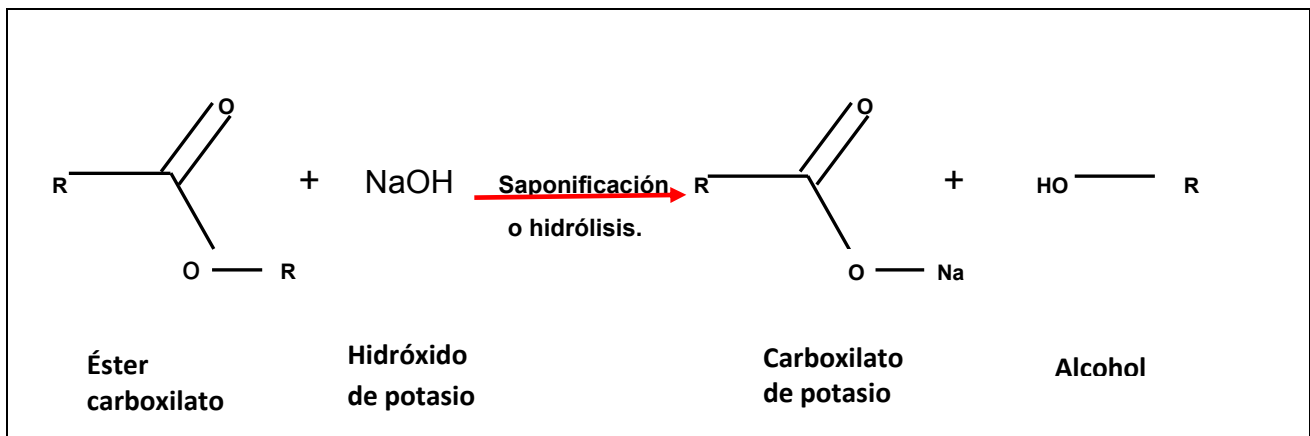


Figura 14. Procesos de saponificación en ésteres.

9. DISCUSIÓN GENERAL

La repelencia al agua o hidrofobicidad del suelo es importante en el servicio ambiental hidrológico de las PAM. Los sitios con mínima hidrofobicidad de la pradera de alta montaña (PAM) del lado sur, presentó los valores más altos de infiltración, K_{fs} y potencial mátrico o capacidad de retención del agua por capilaridad; mientras que la del lado norte registró suelos fuertemente repelentes y por lo tanto mostró los valores más bajos en las propiedades hidricas.

El bosque de *Pinus hartwegii*, en todos los casos, también mostraron una alta hidrofobicidad y sus suelos son severamente y fuertemente repelentes y también registraron bajos valores de infiltración y K_{fs} . Únicamente el bosque ubicado en la ladera norte presentó un mayor potencial mátrico lo cual se atribuye a la porosidad sobre todo de micro poros que se registró en sus suelos.

Los bosques de *Abies religiosa* ubicados al oeste del PNPO, ocurren suelos ligeramente repelentes en la parte superficial y a los 2 cm de profundidad son fuertemente repelentes, mientras que los ubicados al sur no son repelentes, lo que aunado a la mayor porosidad del suelo ocasiona que registren la mayor tasa de infiltración y K_{fs} . El potencial mátrico está asociado a la mayor porosidad del suelo sobre todo a micro poros y meso poros como se observó en las secciones delgadas.

Los bosques de *Pinus montezumae*, ubicados en la parte baja en planicie y pedregosa, presentan suelos severamente repelentes al agua, pero también mostraron una porosidad intermedia, por lo que registró valores intermedios de infiltración, K_{fs} y potencial de flujo mátrico dentro del PNPO.

Con base en lo anterior, se puede sugerir que la repelencia ocasionada por resinas y aceites emitidos por las raíces de las plantas y hojarasca, en los sitios ubicados en laderas norte y oeste, las temperaturas son más bajas y para mayor protección, las ramas y las hojas deben tener más resina los cuales al caer las hojas se liberan hacia el suelo y aunado a los incendios superficiales generan mayor hidrofobicidad. En tanto, los sitios orientados al sur y este, reciben de manera más directa vientos cálidos y abundantes lluvias tropicales y ciclones del golfo, por lo que el lavado de sustancias

hidrófobas es mayor (Shakesby *et al.*, 2000) y disminuye su efecto, lo que explica porque los sitios en estas exposiciones no presentan problemas de hidrofobicidad o repelencia.

Por lo anterior, la vegetación, el tipo de incendio, las propiedades del suelo y la orientación del lugar ejercen una alta influencia en el flujo hidrológico, así como en la productividad vegetal y en la riqueza faunística terrestre, Ruiz-Serrano encontró las mayores riquezas faunísticas en este parque en los bosques de oyamel y pastizal sur.

Con respecto al papel del aluminio los resultados obtenidos permiten decir que las concentraciones (0.2 a 0.8%) varían en los diferentes tipos de vegetación, y no muestran una relación con las propiedades hídricas en este parque. Además, las concentraciones son bajas con respecto a lo registrado en suelos de otros parques nacionales.

La adición de hidróxido de potasio tiene efectos benéficos para la micromorfología, las propiedades hídricas, y por ello explica porque hay mayor supervivencia de plántulas con su aplicación y puede ser usado como una alternativa para incrementar la supervivencia de las plantas en las reforestaciones

10. CONCLUSIONES

- 1) Las praderas de alta montaña ubicadas en el lado sur, los bosques de *Abies religiosa*, y el bosque de *Pinus montezumae* son los que registraron los valores más altos de infiltración, K_{fs} y potencial de flujo mátrico y por lo tanto son importantes en el servicio ambiental hidrológico de este parque.
- 2) Las praderas de alta montaña ubicadas en lado norte y los bosques de *Pinus hartwegii* presentaron valores bajos de infiltración, K_{fs} y potencial mátrico y por lo tanto son los que generan una mayor cantidad de escurrimientos superficiales.
- 3) Las propiedades hídricas del PNPO son relativamente menores que las registradas en otros parques nacionales de la Faja Neovolcánica, por lo que generan la mayor cantidad de escurrimientos y explica su función como generador de corrientes hídricas superficiales.
- 4) Los suelos de los bosques de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y Zacatonales del PNPO no presentaron niveles de toxicidad al aluminio.
- 5) Los bosques de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y praderas de alta montaña del PNPO presentaron suelos fuertemente y moderadamente ácidos; asimismo registraron suelos ligeramente a severamente hidrófobos lo que ocasiono bajos valores de K_{fs} , infiltración, Φ_m , retención de humedad y porosidad.
- 6) El único tratamiento que tuvo efectos sobre las propiedades hídricas fue el KOH y ocasiono el mayor incremento en la tasa de infiltración y K_{fs} .
- 7) La adición de KOH a 25 ppm más la adición extra de $Ca(OH)_2$ disminuyó la capa hidrófoba de fuertemente a ligeramente hidrófoba y por lo tanto cambio la microestructura del suelo e incrementó las propiedades hídricas y la supervivencia del *Pinus hartwegii*.

11.RECOMENDACIONES

Con base en lo anterior, se recomienda construir represas en las cañadas ubicadas en la parte norte, así como las que presentan bosques de *Pinus hartwegii*.

Asimismo se sugiere aplicar mayores concentraciones de hidróxidos para incrementar el éxito y desarrollo de plantas utilizadas en la reforestación de suelos con problemas de compactación e hidrofobicidad.

12. LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O., Prieto-García, F., y Gordillo-Martínez, A., 2008. Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España* **21 (3-4)**:125-132.
- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, M., y Prieto-García, F., 2010. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencia* **26(2)**:137-150.
- Aguirre-Gómez, A., 2001. *Química de los suelos ácidos, templados y tropicales*. FES Cuautitlán-UNAM, México.
- Alcantar-González G., 2009. *Nutrición de cultivos*. Ed. Colegios de Posgraduados, campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. 69-70.
- Aldana-Pérez S., 2012. *Ecología de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Iztapopo*, D.F México. Tesis de licenciatura. Biología- FES Zaragoza UNAM.
- Almaxan-Vázquez E., 1988. Geoquímica de las rocas volcánicas de la formación Alisitos del arroyo la Bocana en el estado de Baja California Norte. *Instituto de Geología UNAM* **7(1)**:78-88.
- Ángeles-Cervantes E.R., 2010. *Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de Oyamel*. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Arbelo, C. D., Rodríguez, R. A., Guerra, J. A. y Mora, J. L. 2002. Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias. *EDAFOLOGÍA*, **9(1)**: 23-30.
- Arshad M.A., Lowery B. y Grossman B., 1996. *Physical Test for Monitoring Soil Quality*. In: Doran JW, Jones AJ, (Ed.) *Methods for assessing soil quality*. Madison, WI. pp.123-41.
- Alvarado A., y Forsythe W., 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* **29(1)**:85-94.
- Ávila-Bello., C.H, López Mata., L. 2001. Distribución y análisis estructural de *Abies hickelii* (Flous y Gausson) en México. *Interciencia* **26 (6)**:244-251.
- Borja-Ramón P., Iñiguez V, Crespo P., Cisneros P., Cisneros F., 2008. Características Físicoquímicas de histosoles y andosoles de los Paramos de Quimsacocha, Ecuador. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. pp. 1-11.
- Bregje K., Van Wesenbeeck, Van Moourik, Joost F, Duivenvoorden. C. M., 2003. Strong effects of a plantation with *Pinus patula* on Andean subparamo vegetation: a case study from Colombia. *Biological Conservation*. pp. 207-218.

- Buruca G., Lazo B., V., 2009. "Estudio de factibilidad técnica y económica para captación de aguas superficiales en el cauce del Rio Loro de la ciudad de Jocoro, departamento de Morazan. Tesis de licenciatura, Universidad de Oriente. Salvador.
- 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.
- Buytaert W., Wyseure G., De Bièvre B., y Deckers J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* **19**:3985-3997.
- Campos-Cascaredo, A., Oleschko, K., Cruz-Huerta, L., Etechevers, B. J. D. y C. Hidalgo M., 2001. Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *TERRA Latinoamericana* **19**:105-116.
- Castañeda-Peralta A., Villalba Carpinteiro , Sashenka V., 2008. Análisis de tendencia de temperaturas extremas para la detección de cambio climático. Chapingo, México 5- 12.
- Castillo-Campos G., 2003. Biodiversidad de la selva baja caducifolia en un sustrato rocoso de origen volcánico en el estado de Veracruz, tesis doctoral, UAM-Iztapalapa, México. pp. 9-20.
- Castró-Alonso A. 2009. Conductividad hidráulica en bosques y praderas de alta montaña de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura Biología. FES Zaragoza, UNAM. México D.F.
- Cavelier, J. A. Santos C., 1999. Efectos de plantaciones abandonadas de especies exóticas y nativas sobre la regeneración de un bosque montano en Colombia. *Biology Tropical* **47(4)**:775-784.
- Céleri A., De Bièvre B., Iñiguez V., 2004. Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de Paramo. Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca, Ecuador. pp. 10-19.
- Challenger, A., 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO. Instituto de Biología-UNAM-Agrupación Sierra Madre. México. pp. 521-530.
- Christon, J., G. Hurst y R. Knudeen. 1997. Manual of environmental microbiology. American Society for Microbiology. ASM Press. Washington. 1138 p
- Congreso Mundial de Paramos., 2002. El Ministerio del Medio Ambiente, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y la Fundación Conservación Internacional Colombia. pp. 84-88.
- Cruz, H. L. y Geissert K. L., 2000. Carga eléctrica de los andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *TERRA Latinoamericana* **8(002)**: 115-124.

- Cruz-Ruiz, E., Cruz Ruiz A; Aguilera Gómez, L., Norman Mondragón, I., Velázquez, H. T., Nava Bernal R. A., Dendooven G., Reyes-Reyes B. G., 2012 .Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *TERRA Latinoamericana* **30(2)**:189-197.
- Dekker, L.W. y Jungerius P. D. 1990. *Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands*. En: Jaramillo Jaramillo D.F. 2004. *Repelencia al agua en suelos. Con énfasis en suelos de Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* **51**:33–65.
- Duque-Zapata J.R., Arbeláez Mesa S.P., Jaramillo Jaramillo D.F. y León Peláez J.D., 2004. *Hidrofobicidad en Andisoles bajo robledal (Quercus humboldtii) y plantaciones forestales (Pinus patula y Cupressus lusitanica) en la cuenca de la quebrada piedras blancas (Medellín, Colombia)*. Facultad de Ciencias Agropecuarias de Colombia.
- Eamus D., Hatton T., Cook P., Colvin C., CSIRO (2007): *Ecohydrology: Vegetation Function, Water and Resource Management*. *Agricultural and Forest Meteorology* **144**: 156-157.
- Estupiñán-Bravo L., 2002. Impacto causado en el suelo por las plantaciones de *Pinus* en el páramo de Gachaneca, Colombia. pp. 945-959.
- FAO 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Santiago de Chile. Cuadernos de la FAO **13**:6-20.
- Fontes J.C., Goncalves M.C. y Pereira L.S., 2004. Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena* **56**:145-154.
- Forsythe W. y Diaz-Romeu R., 1969. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* **19(1)**:128-131.
- García N., Krasilnikov P., Valera M. y Torres E., 2007. Suelos. En Luna, I.;Morrone JJ. y Espinosa D. (Eds). *Biodiversidad de la Faja Volcanica Transmexicana*. UNAM, México, D.F. pp. 514.
- González-Montiel E., 2012. Manejo forestal y servicios ambientales en Mineral del Monte, estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura, Biología, FES Zaragoza. UNAM.
- Gonzales-Vargas T., 2011. *Ecohidrología de un Bosque de Oyamel: diagnóstico y rehabilitación*. Tesis de Licenciatura, Biología FES Zaragoza. UNAM.
- Harsh, J. Chorover, J. y Nizeyimana, E., 2002. Allofane and Imogolite. En: Dixon J. B. y Darrell G. S. *Soil mineralogy with environmental applications*. Soil Science Society of America, Inc. Madison Wisconsin. U.S.A. 291-299.
- Hernández-Ordoñez, J.O., 2014. Diagnóstico y habilitación de suelos forestales con presencia de manganeso-hierro, caso Villa del Carbón, estado de México. Tesis de Licenciatura, Biología, FES Zaragoza UNAM.

- Hofstede, R., 1997. El impacto ambiental de plantaciones de *Pinus* en la sierra del Ecuador. Proyecto EcoPar, Universidad de Amsterdam, Larenstein Colegio Universitario Internacional, Velp, Holanda 54.
- Ilstedt ,U., Malmer, A., Verbeeten, E., Murdiyarso, D., 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 45–51.
- Ingaramo O., Paz A. y Dugo M., 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelos, en el NO de la Península Ibérica. Universidad Nacional del Nordeste.
- Januer G. A., 2000. Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological Engineering* **16**: 9-16.
- Jaramillo-Jaramillo D.F., 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* **30(115)**:215-232.
- Jiménez-Cruz D., 2011. Restauración del servicio ambiental hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D.F., México. Tesis de Licenciatura, Biología FES Zaragoza. UNAM.
- Jobbagy, E.G., Vasallo, M., Farley, K.A., Piñeiro, G., Garbulsky, M.F, Nosoetto, M.D., Jackson, R.B., Paruelo, J.M., 2006. Forestación en Pastizales: Hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia* **2**:109-124.
- Julca-Otiniano A., Meneses F.L., Blas S.R., Bello A.S., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA* **24**:(49-61).
- King, P. M., 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Australian Journal Soil Research* **19**: 275-285.
- Klaassen, W., Lankreijer, H.J.M., Veen, W.L., 1996. Rainfall interception loss near a forest edge. *Journal of Hydrology* **185**: 349-361.
- Kleber M., Mikutta C. y Jahn R. 2004. Andosols in Germany pedogenesis and properties. *Catena* **56**:67-83.
- Leal H., González J.C., Hernández A., 2002. Fundamentos de física para las ciencias agrícolas. Universidad Nacional de Colombia.
- Lipiec J., Wójciga A. y Horn R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil y Tillage Research* **103**:170-177.
- Li SY., Chen ZS., Liu JC., 1998. Subalpine loamy spodosols in Taiwan: Characteristics, micromorphology and genesis. *Soil Science Society American J.* 62: 710-716
- López F., 2000. *Relaciones hídricas en el continuo agua–suelo–planta–atmósfera*. Universidad Nacional de Colombia.
- López-López A.B., 2010. Variación del pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos. Tesis de Licenciatura. Biología FES Zaragoza, UNAM.

- López-López 2014. Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del Parque nacional Iztapopo. Tesis de maestría en ciencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra- Instituto de Geología UNAM.
- Maderey, L. E. y R. Jiménez., 2005. Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Martínez-Vázquez, J., 2001. Mastofauna de la vertiente occidental (oeste) del Parque Nacional Pico de Orizaba, Puebla (Fase 1). Benemérita, Universidad Autónoma de Puebla. Escuela de Biología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R044. México, D.F.
- McMurry, J., 2008. Química orgánica. Ed. Cengage Learning. México. pp.809
- Mckeague, J.A., and J.H.Day., 1996. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various clases of soil. *Canadian Journal of Soil Science* **46**:13-2
- Meza-Pérez y Geissert K., 2006. Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *TERRA latinoamericana* **24(2)**:163-170.
- NOM-021-RECNAT, 2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, D.F. México. pp. 85.
- NOM-059-ECOL-2001, DIARIO OFICIAL, miércoles 6 de marzo de 2001. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-059-RECNAT-2001.
- Paterson, E., L. Clark, and A.C. Birnie., 1993. Sequential selective dissolution of iron, aluminium and silicon from soils. *Communications of Soil Science Plant Analysis* **24**:15-16.
- Pape, TH.; Lagger, D. 1994. Manual for soil descriptions and classification. Department of Soil Science and geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Pereyra D. y Pérez S., 2005. Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz. *Revista higiene* pp. 81-97.
- Perry Jr. J.P. (1991). The pines of México and Central América. Timber Press. Portland, Oregón. pp. 231.
- Pickaver, A.H., Gilbert, C., Breton, F., 2004. An indicator set to measure the progress in the implementation of integrated coastal zone management in Europe. *Ocean and Coastal Management* **47**: 449-462.
- 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.
- Porta, J., López, M., and Roquero, C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente.: Editions Mundi-Prensa 2a ed. Madrid.

- Prado B., Duwig C., Hidalgo C., Gomez D., Yee H., Prat C., Esteves M., Etchevers J.D. 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma* **139**:300-313.
- Pritchett W. 1986. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Ed. Limusa, México.
- Revenga, C. J. Brunner, N. Henninger y R. Payne., 2000. Pilot analysis of global ecosystem. World Resources Institute, Washington, D.C. pp. 68.
- Reynolds W.D. y Elrick D.E., 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the parameter using the Guelph parameter. *Soil Science* **14(4)**:292-302.
- Ricker, M., Gutiérrez, G. G. y Daly, D. C. 2007. Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal Forestry Research* **37**: 977-989.
- Romero-Carmona J. 1986. Estudio de reconocimiento de los suelos forestales del Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones. Tesis de Licenciatura. Biología FES ZARAGOZA, UNAM México.
- Rodríguez-Gelóz J. 2008. Caracterización del proceso de hidrofobicidad en suelos afectados por la forestación con *Eucalyptus sp.* y *Pinus sp.* Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, Uruguay.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Hernández H. C. y V. Ortega-Barranda., 2004. Ecología del fuego en bosques de *Pinus hartwegii*. En: Villers, R.L. y López, B. J. Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. pp. 107-118.
- Ruiz-López 2012. Cambios del uso del suelo y su efecto en el contenido químico de M.O., C/N y C/P en el ejido "El Conejo", Perote, Veracruz. Tesis de licenciatura Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana.
- Ruiz-Serrano 2014. Índice de abundancia relativa en mamíferos en la parte occidental del Parque Nacional Pico de Orizaba, Puebla. Tesis de licenciatura Fes Zaragoza, UNAM.
- Rzedowski J., (1978). Vegetación de México. Limusa. México, D. F.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sadzawkar R.M., Peralta P.M., Ibarra M.J., Peralta A., Fuentes J.P., 1995. Características químicas de suelos forestales chilenos. *Bosques* **16(1)**: 9-28.
- Sandoval, E. M., Castillo, S.C., Zagal, V. E., Stolpe, L. N. y P. Undurraga D. 2007. Parámetros hidráulicos determinados en un andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *R. C. Suelo Nutrición Vegetal*. **7(2)**: 32-45.

- Santamarina, S.P., García, B.F., Rosello, C.J. y Vilella, F. v., 1997. Biología y Botánica (tomo1 y II). Ed. Servicio de Publicaciones. España.
- Santander-González, M., 2004. Caracterización de materia orgánica por espectroscopia de infrarrojo (FT-IR) y su relación con Nitrógeno y Fósforo en suelo post-incendio de un bosque de oyamel. Tesis de Licenciatura Biología FES Zaragoza, UNAM.
- Scott F.D., y Lesch. W., 1997. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchmentes, South Africa. *Journal of Hydrology*. pp.360-377.
- SEMARNAT (2002). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. pp.85.
- Senthilkumar, K., Nesme, T., Mollier, A., Pellerin, S., 2012a. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: the case of France. *Global Biogeochemistry Cycles* **26**:1–14.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., Walsh, R.P.D., 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*. pp. 178–191.
- Shing, C.J. y Yu. C.C., 2003. Characterization of soil organic matter in different particle-size fractions in humid subalpine soils by CP/MAS ¹³C NMR. *Geoderma*, **117**:129-141.
- Shoenerberger P.J., Wysocki A., Benham E.C., y Broderson W.D (editors), 2002. Field book forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. pp. 335-356.
- Shoji S., Nanzyo M. y Dahlgren R. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilización. Elsevier Science Publisher. pp.164-165.
- Siebe, H.C., Abrams, M., Sheridan, M., 1993. Major Holocene block-and-ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, México: implications for future hazards: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **59**:1-33.
- Solis, M.A. 1994. Monografía de *Pinus hartwegii* Lindl. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. División Ciencias Forestales. pp.130.
- Soil Taxonomy. 2010. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, D. C., United States.
- Swannell, R., K. Lee y M. McDonagh. 1996. Field evaluations of marine oil spill bioremediation. *Microbiological Review* 60 (2): 342-365.
- Tagliani, P.R.A., Landazuri, H., Reis, E.G., Tagliani, C.R., Asmus, M.L., Sanchez Arcilla, A., 2003. Integrated coastal zone management in the Patos Lagoon estuary: perspectives in context of developing country. *Ocean and Coastal Management* **46**: 807-822.

- 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. 431-466.
- Tomlin, A.D., Shipatalo, M.J., Edwards, W.M., y Protz, R. 1995. Earthworms and their influence on soil structure and infiltration, 159-184 p In: Hendrix, P. F. (ed.). Ecology and biogeography of earthworms in North America. Boca Raton, Florida, USA. Lewis Publisher.
- USDA 2000. Natural Resources Conservation Service (Departamento de Agricultura de EE.UU. - Servicio de Conservación de Recursos Naturales)
- Van der Kamp, J., Yassir, I. y P. Buurman. 2009. Soil carbon changes upon secondary succession in Imperata grasslands (East Kalimantan, Indonesia). *Geoderma* **149**:76-83.
- Van Reeuwijk L.P., 1999. Procedimientos para el análisis de Suelos (Para clasificación y correlación). Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C.; C.A. Tavares y C.A. Tavares y C.A. Ortiz s., la edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Velasco, M.H.A., 1983. Uso y manejo del suelo. Ed. Limusa. México, D. F. 81-184.
- World Reference Base for Soil Resources. 2006. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Wolanski, E., Chicharo L., Chicharo M., Morais P., 2006. An ecohydrology model of the Guadiana Estuary (South Portugal). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. pp.142.
- Zalewski, M., 2002. Ecohydrology-the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water-resources. *Hydrological Sciences Bulletin* **47**: 823-832.
- Ziegler A., Junjiro, N., Negishi R., Sidle C., Noguchi S., Nik A., 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena* **67**: 89-104.

REFERENCIAS ELECTRONICAS

- Price Martin F. (2013). Ecosistemas de importancia mundial. Depósito de documentos de la FAO. Tomado de: <http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s03.htm#TopOfPage>, el día 28/08/2013.
- CONABIO 2011. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_122.
- CONABIO 2012. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_122.
- CONAFOR 2012. <http://www.conafor.gob.mx/porta/index.php/temas-forestales/serviciosambiet>

ANEXOS

12. ANEXO MICROFOTOGRAFICO

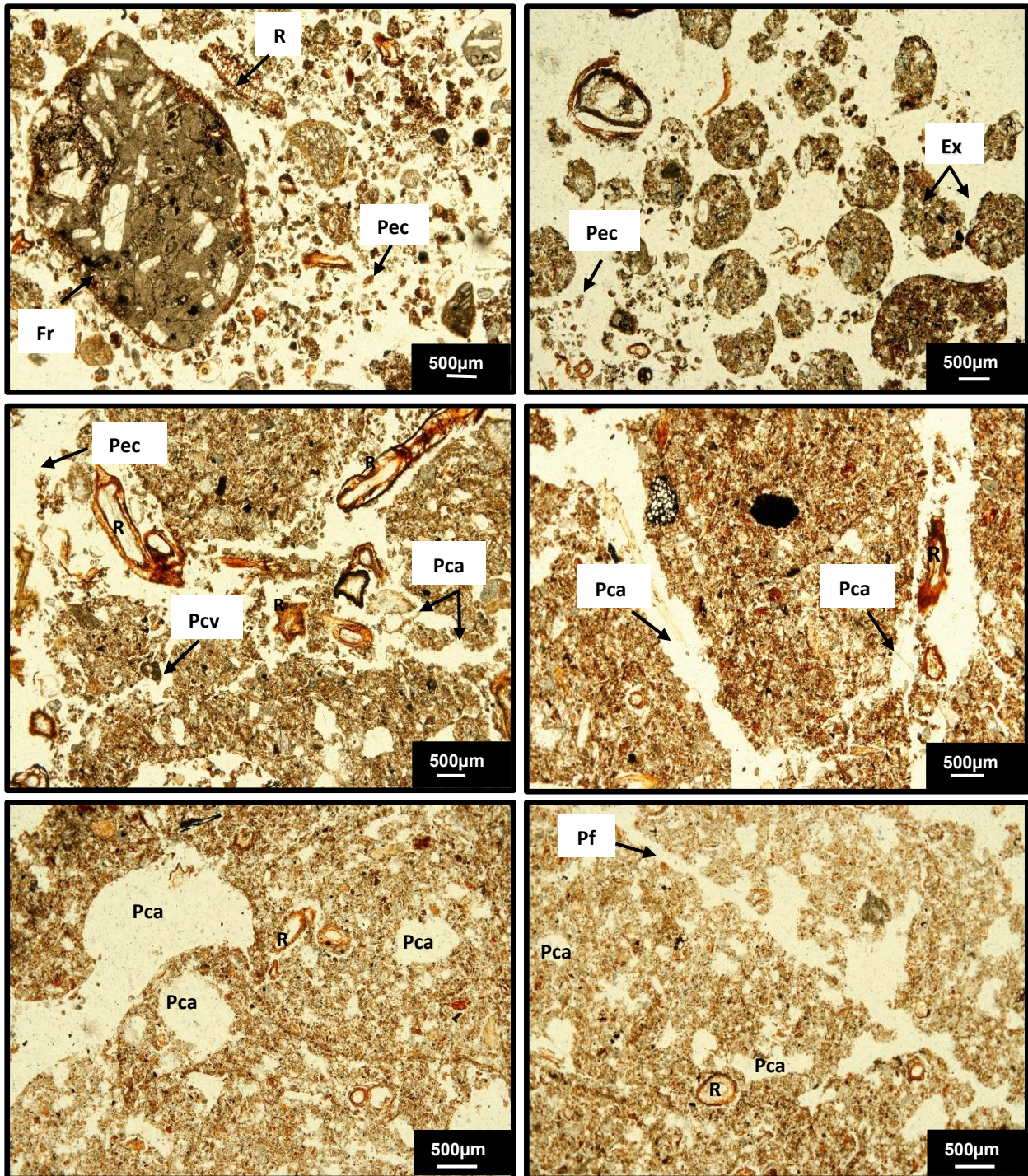


Figura 15. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del BARC1 (Bosque de *Abies religiosa* cañada 1) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv) Poros Fisura (Pf), Raíz(R), Excrementos (Ex), Fragmento de roca (Fg).

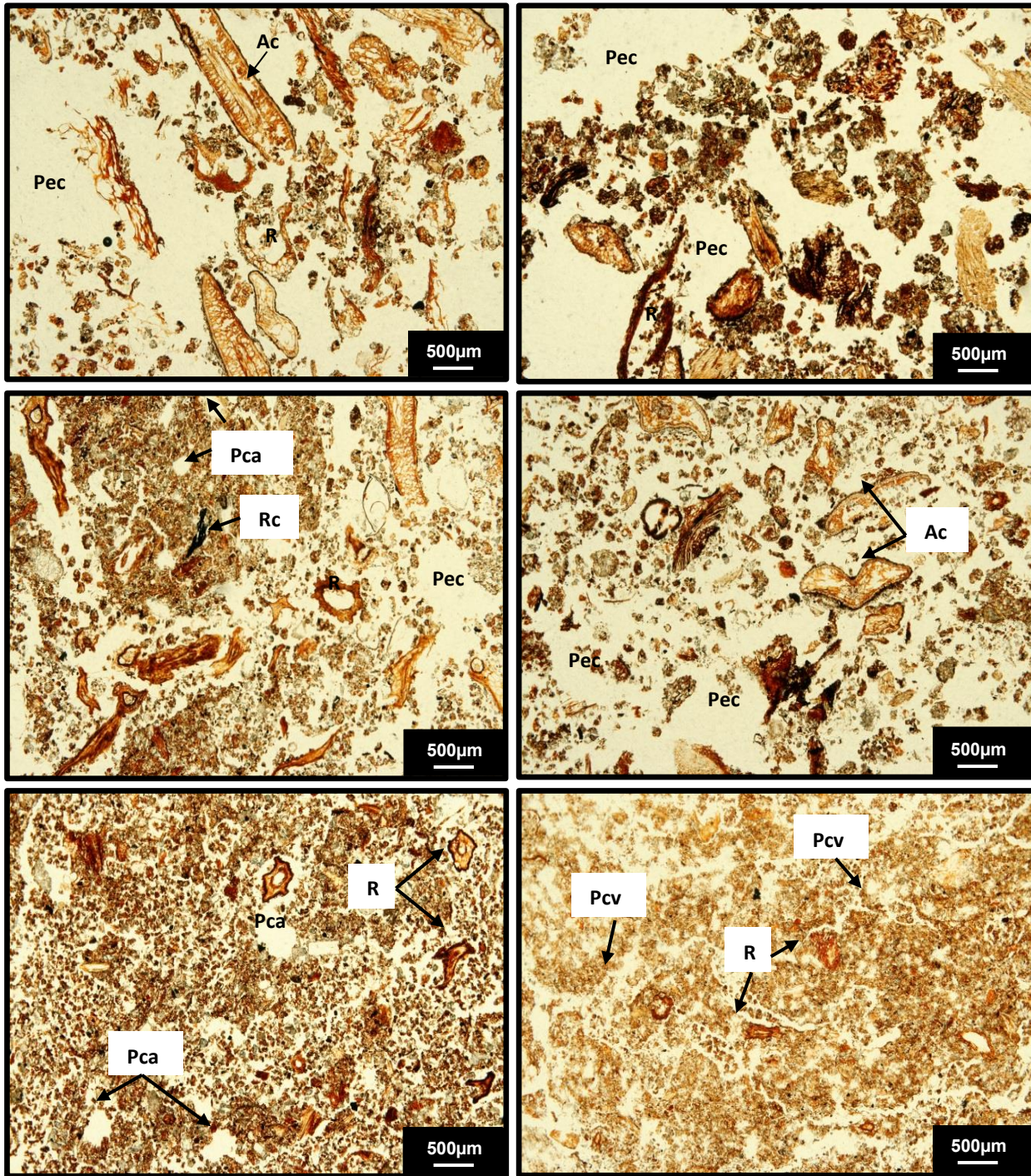


Figura 16. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del BARC2 (Bosque de *Abies religiosa* cañada 2) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Poros Fisura (Pf), Raíz(R), Acículas (Ac), Restos carbonizados (Rc).

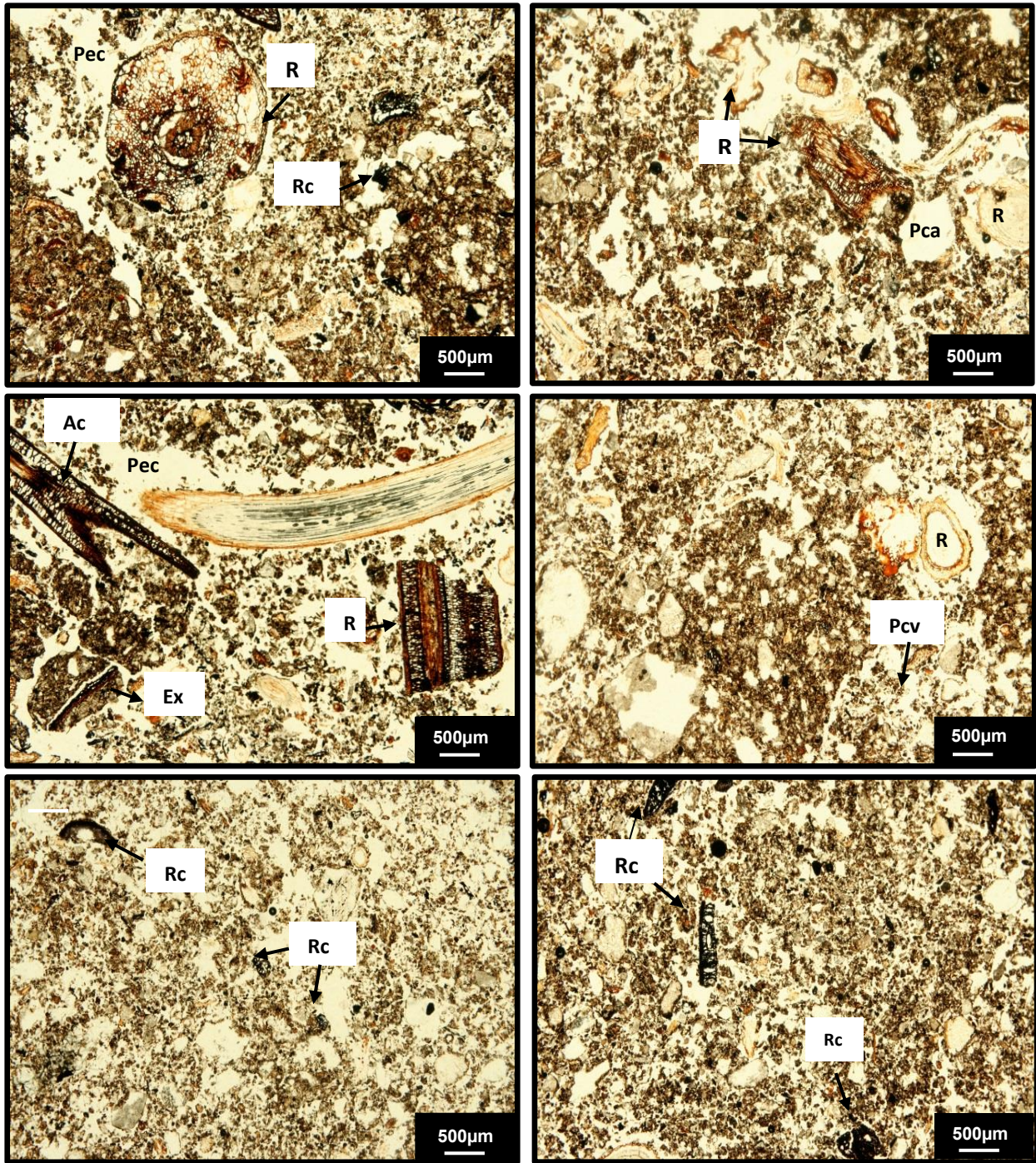


Figura 17. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del BARS (Bosque de *Abies religiosa* ladera sur) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Raíz(R), Acículas (Ac), Excrementos (Ex), Restos carbonizados (Rc).

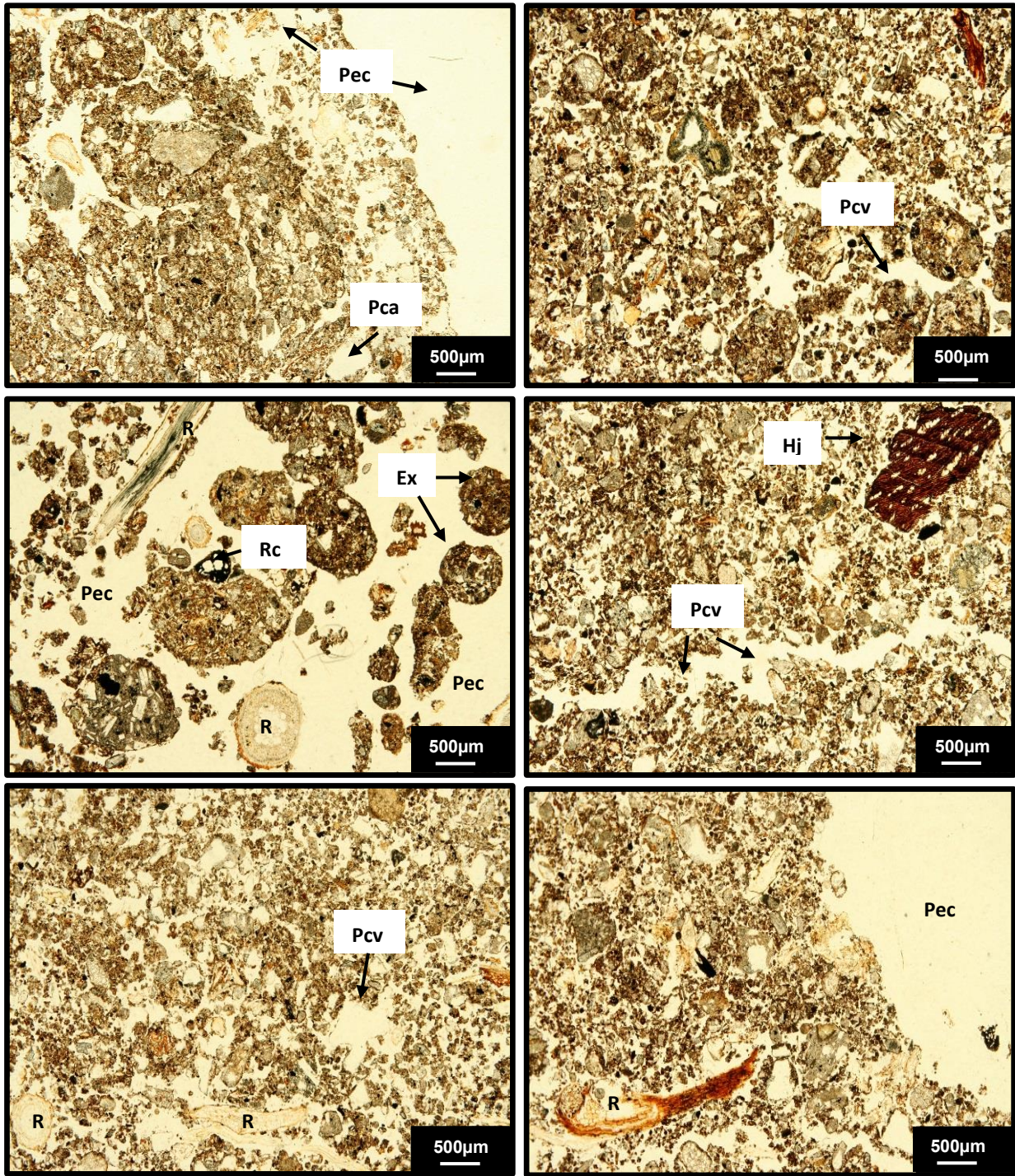


Figura 18. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del BPHN (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Raíz(R), Hojas (Hj), Excrementos (Ex), Restos carbonizados (Rc).

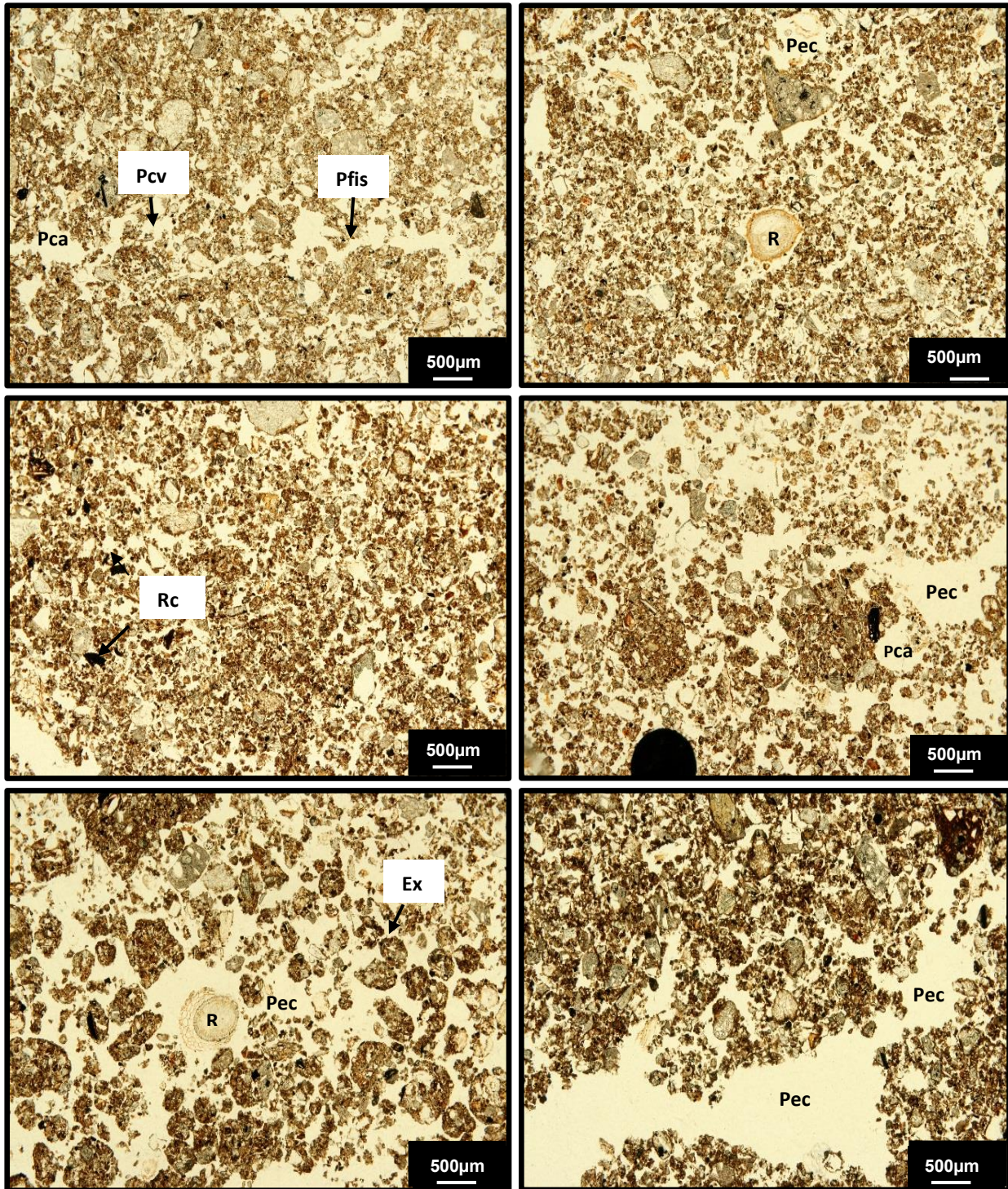


Figura 19. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de BPHSreg (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera sur en regeneración de 12 años) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Poros fisura (Pf), Raíz(R), Excrementos (Ex), Restos carbonizados (Rc).

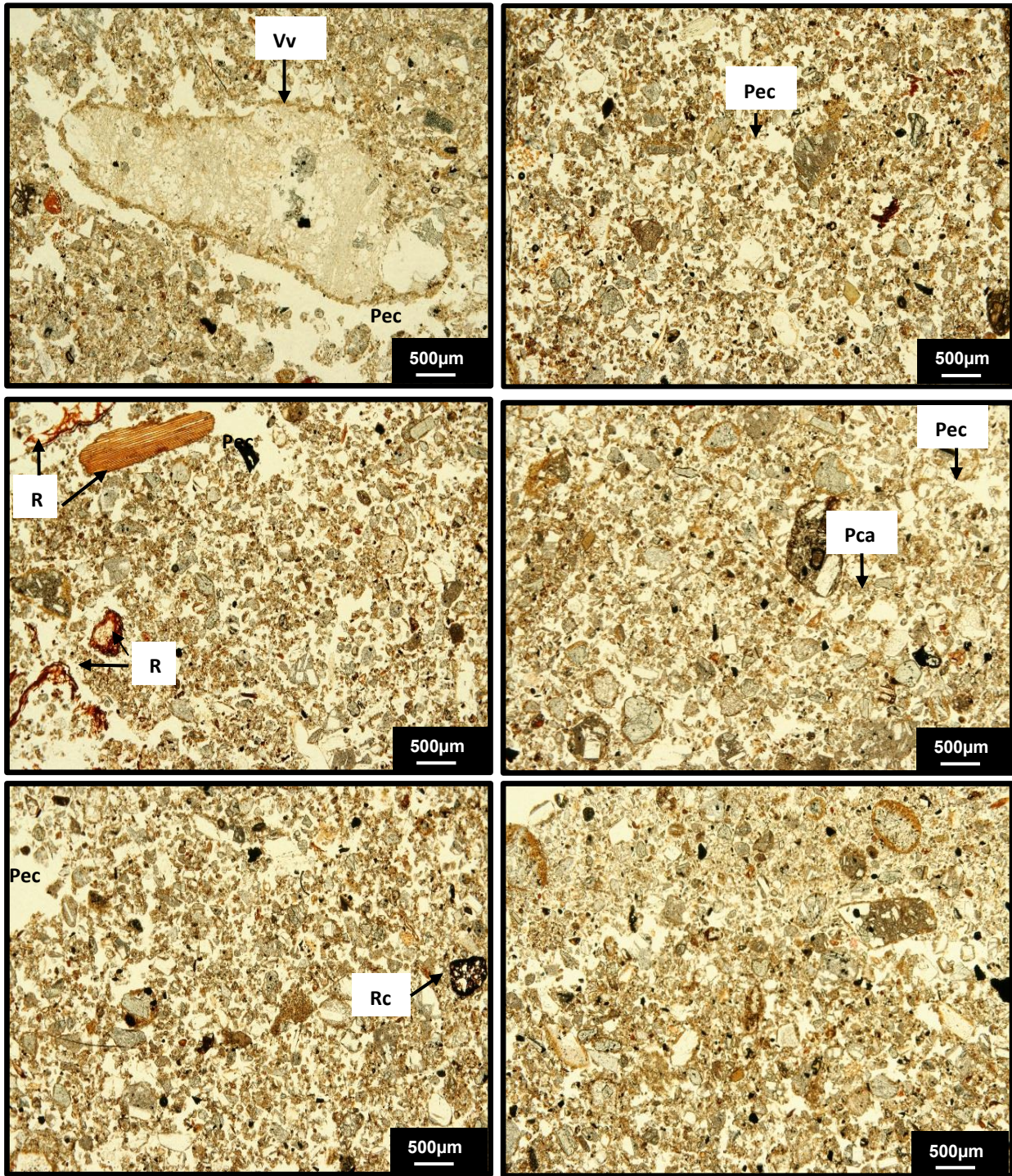


Figura 20. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de BPHOreg (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera oeste en regeneración de 12 años) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Vidrio volcánico (Vv), Raíz(R), Restos carbonizados (Rc).

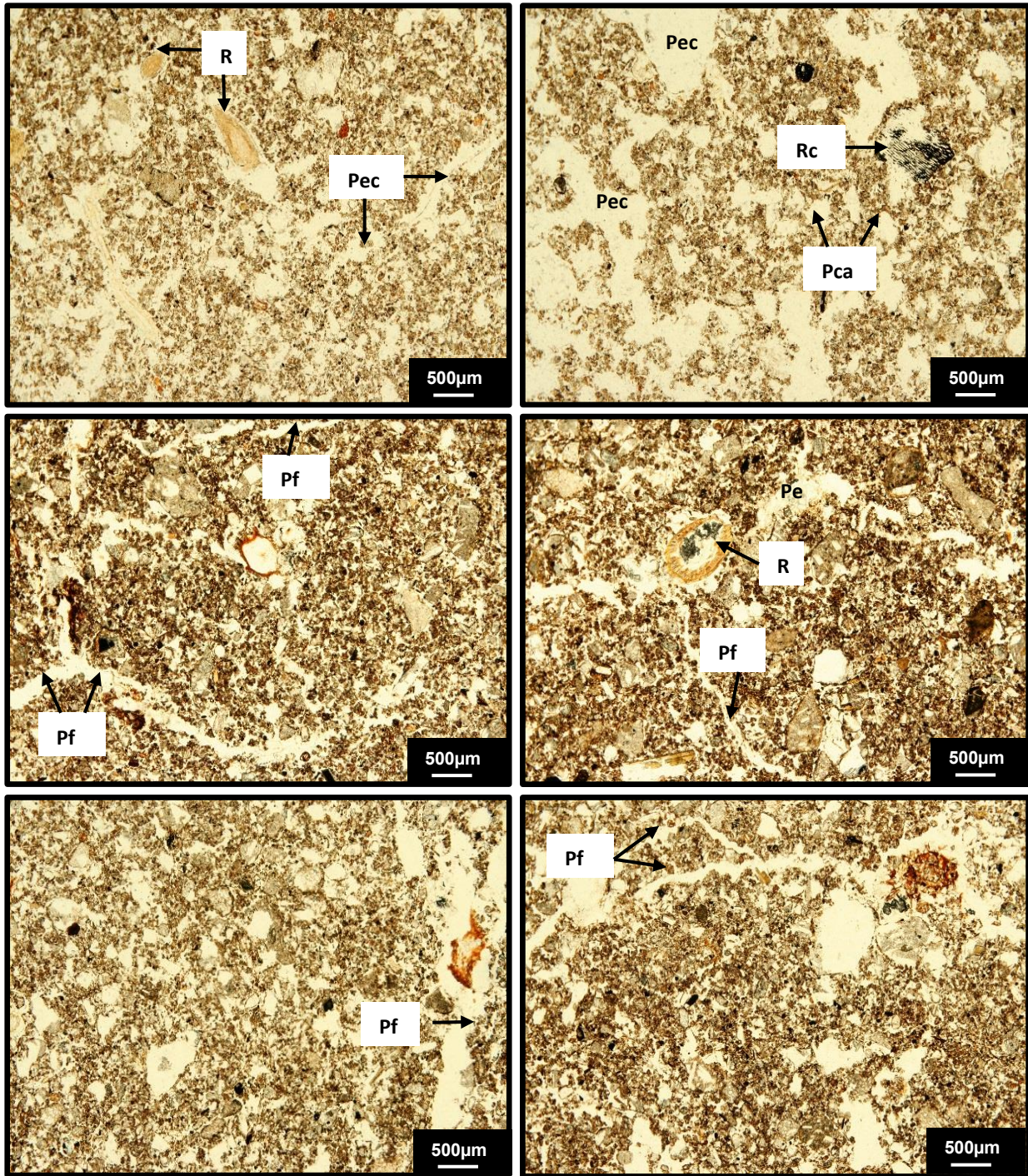


Figura 21. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de BPHD (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros fisura (Pf), Raíz(R), Restos carbonizados (Rc).

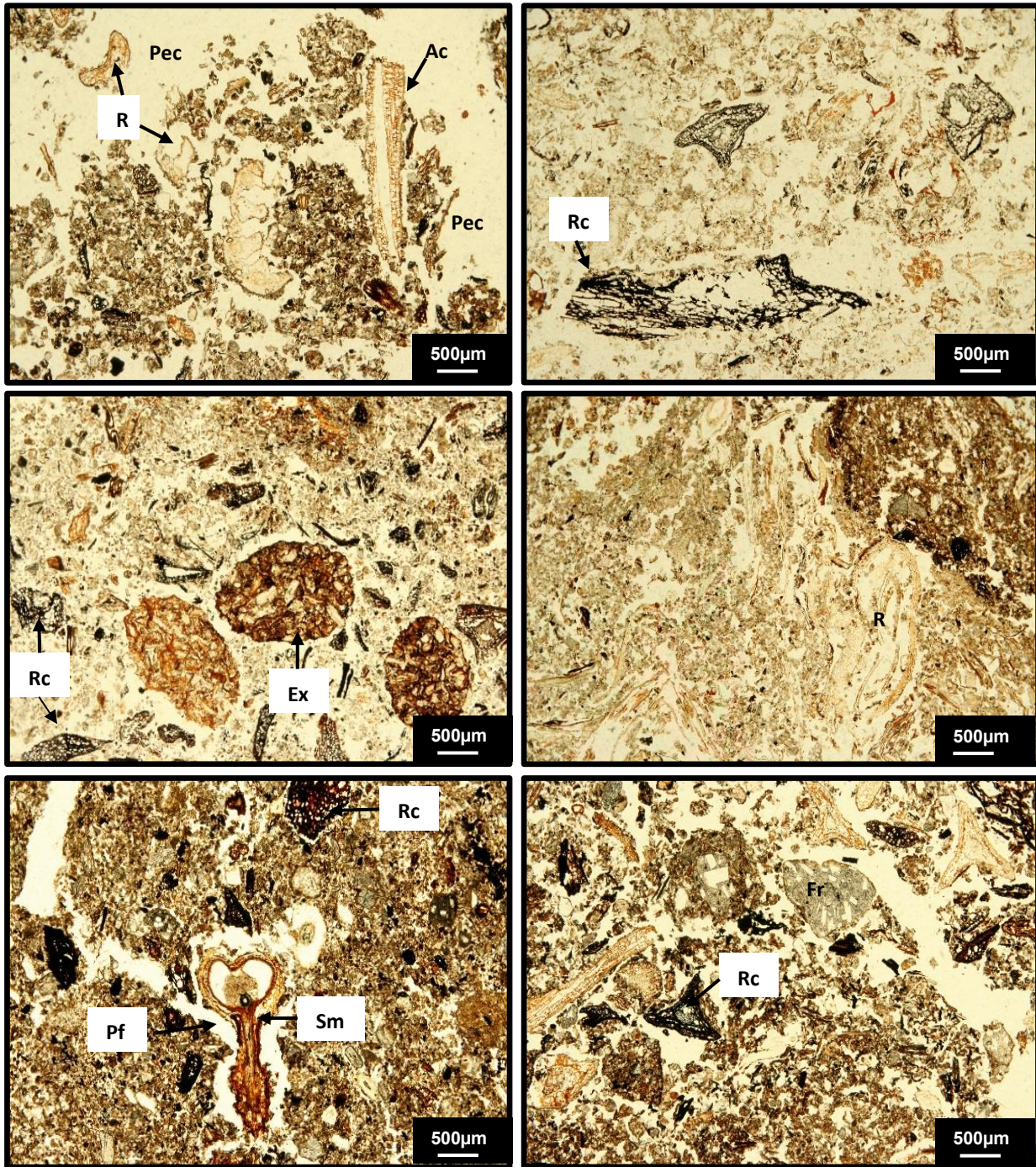


Figura 22. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas del BPM (Bosque de *Pinus montezumae*) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros fisura (Pf), Raíz(R), Acículas (Ac), Semillas(Sm) Restos carbonizados (Rc), Excrementos (Ex).

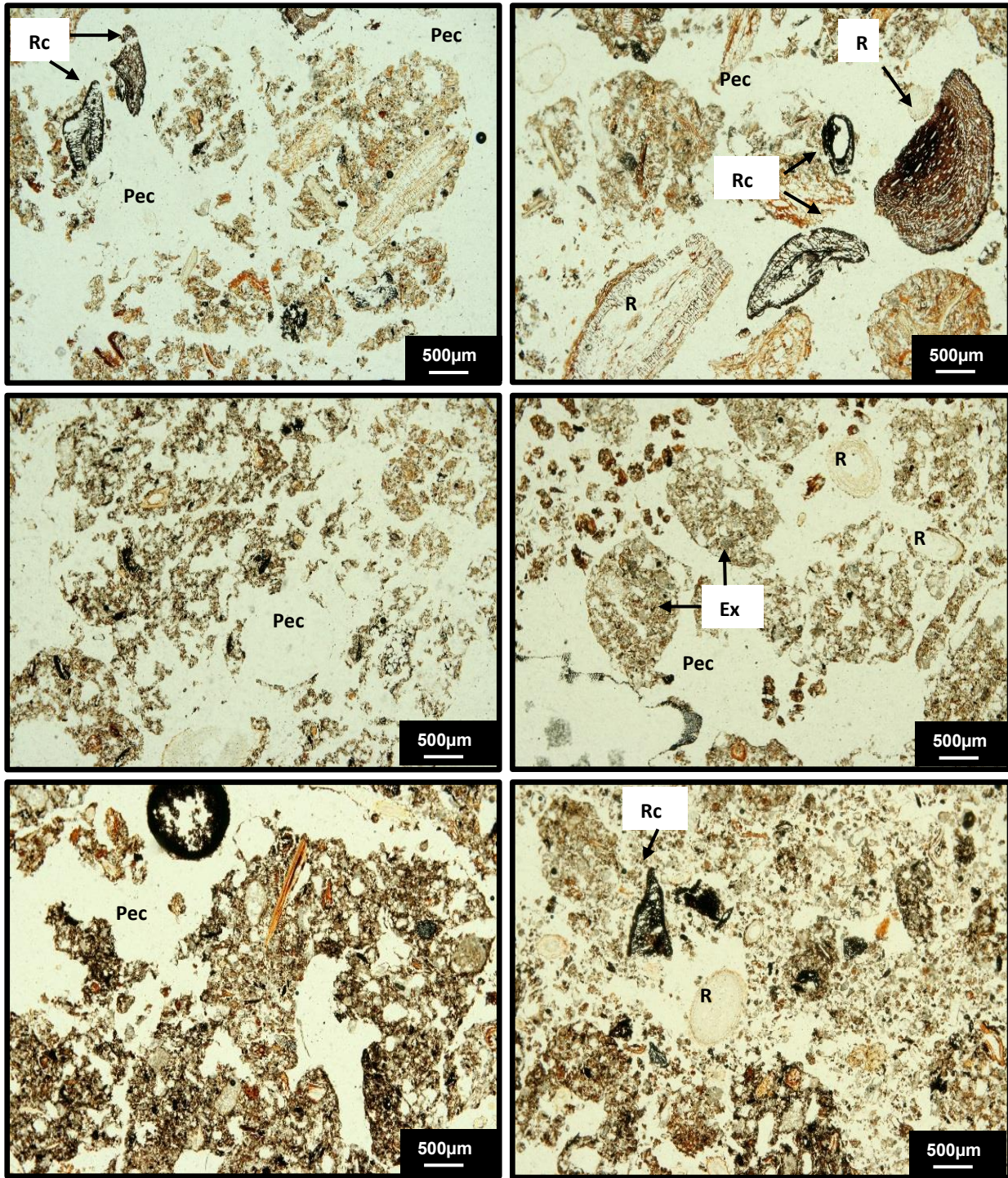


Figura 23. Microfotografías de secciones delgadas en muestras inalteradas de PAMS (Zacatonal o Pradera de alta montaña Sur) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Raíz(R), Restos carbonizados (Rc), Excrementos (Ex).

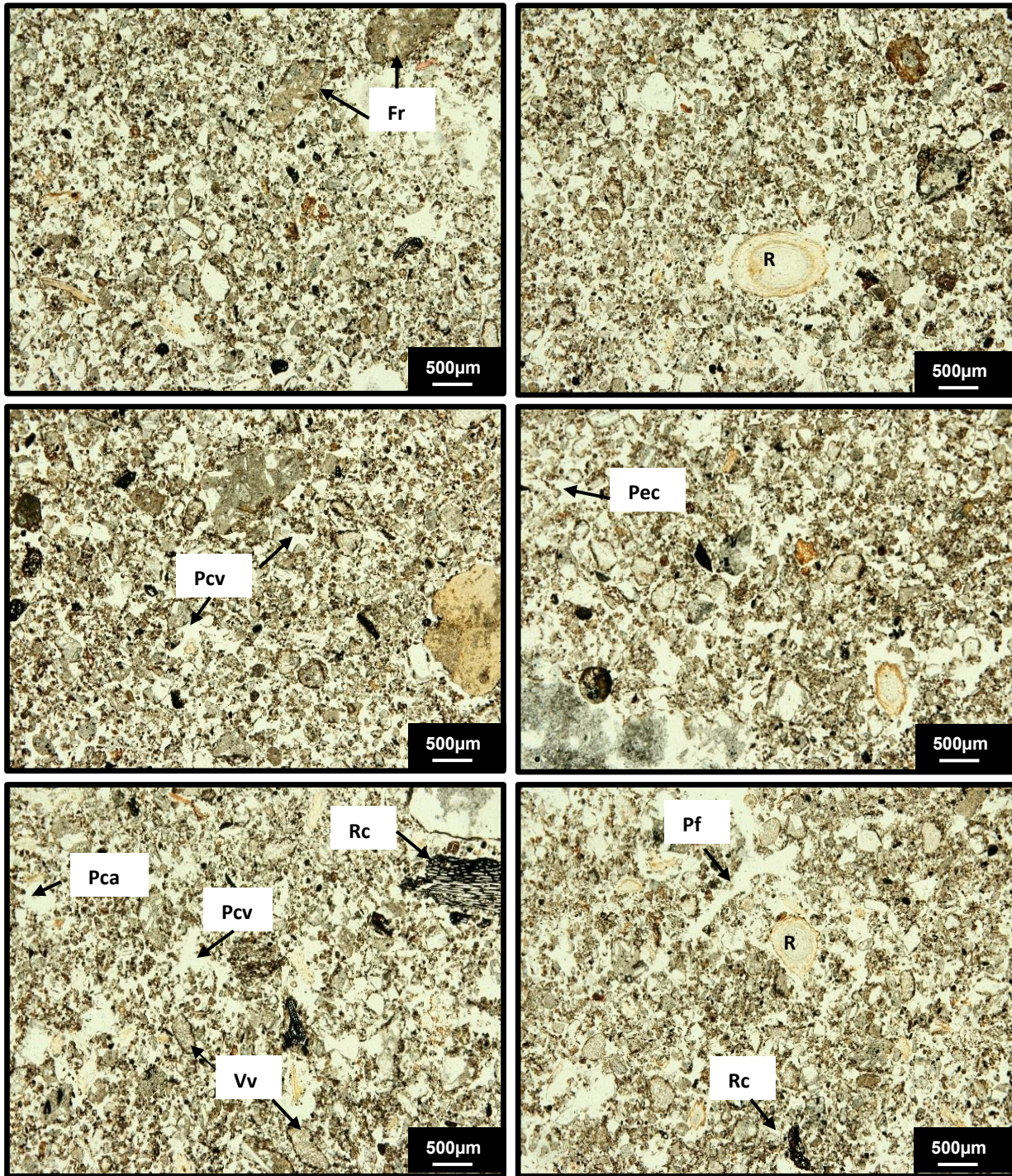


Figura 24. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de PAMN (Zacatonal o Pradera de alta montaña Norte) en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Poros fisura (Pf), Raíz(R), Restos carbonizados (Rc), Fragmento de roca (Fg) y Vidrio volcánico (Vv).

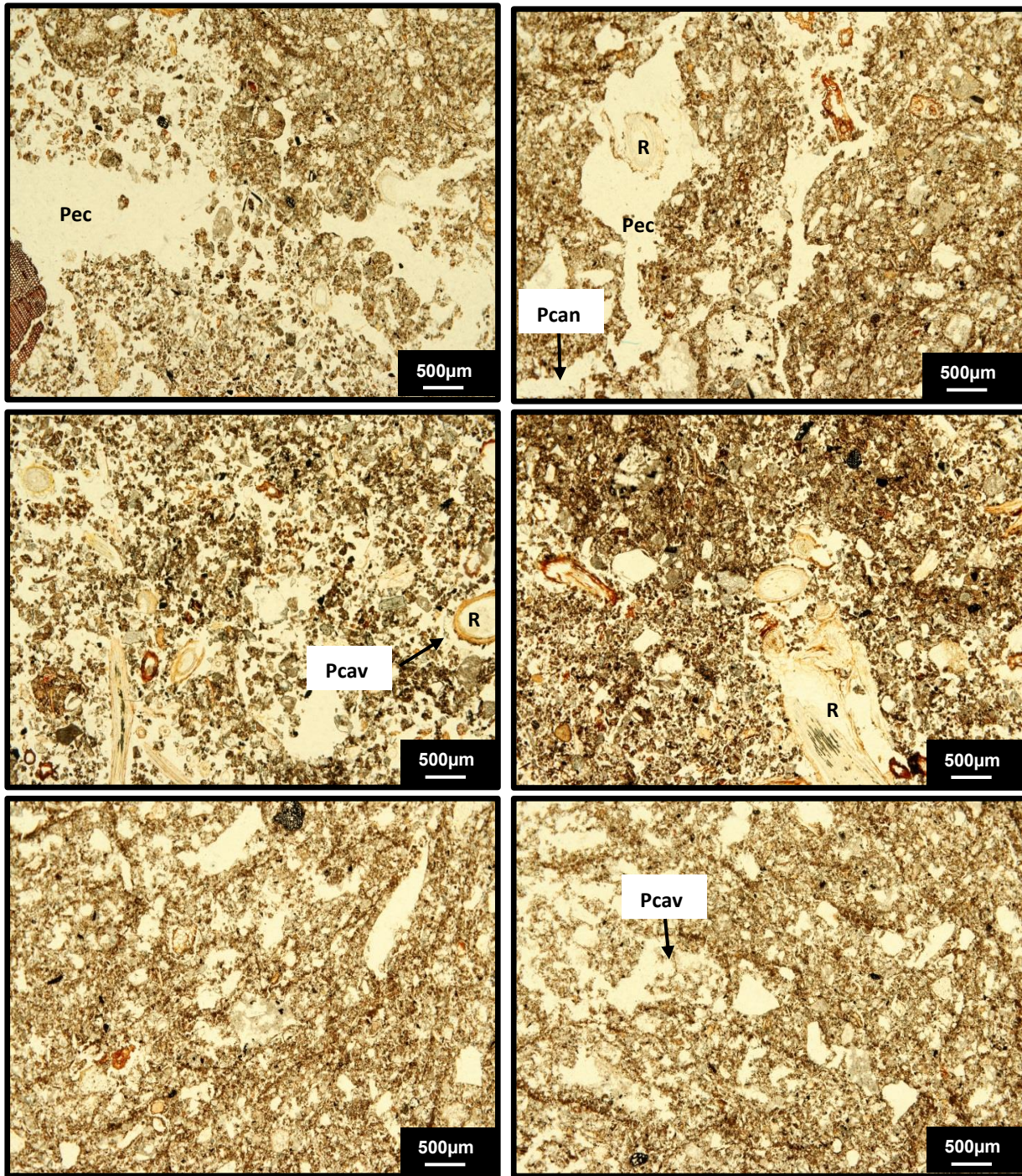


Figura 25. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de BPHD (Bosque de *Pinus hartwegii* ladera norte desmontado) con la adición del tratamiento KOH 25ppm + Ca (OH)₂ 15ppm en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Raíz(R).

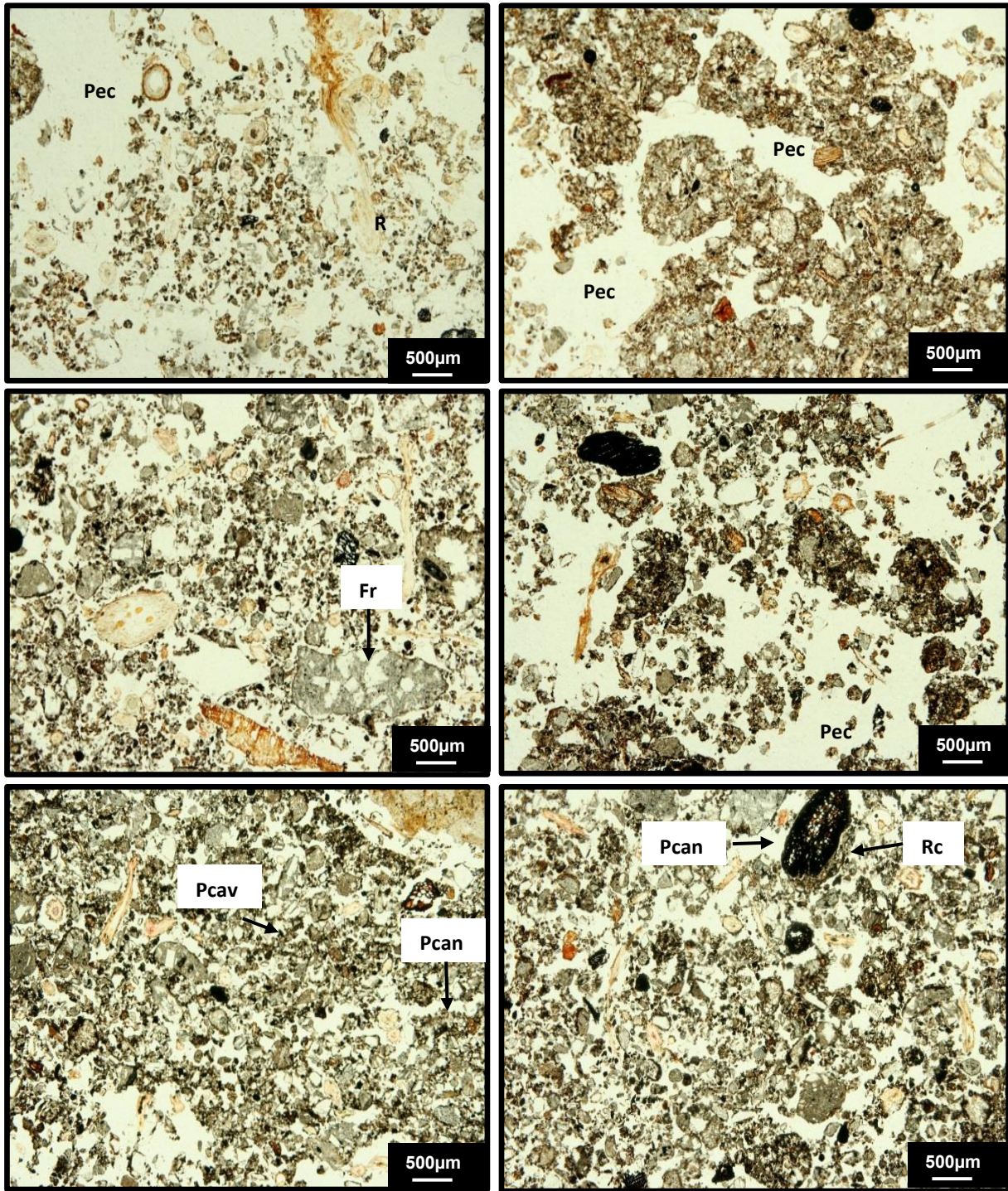


Figura 26. Microfotografías de secciones delgadas de muestras inalteradas de PAMN (Zacatonal o Pradera de alta montaña Norte) con la adición de KOH 25ppm + Ca (OH)₂ 15ppm en el PNPO. Poros de empaquetamiento compuesto (Pec), Poros canales (Pca), Poros cavidad (Pcv), Poros fisura (Pf), Raíz(R), Restos carbonizados (Rc), Fragmento de roca (Fg).

