



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

EL PAPEL DEL FUEGO EN EL REPOBLAMIENTO DE

*Pinus cembroides* Zucc

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**B I Ó L O G A**

Presenta:

**SANDRA MARIANA MARÍN GARCÍA**

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

ASESOR INTERNO:

Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes

Proyecto PAPIIT IN221614

Ciudad de México., Septiembre 2016





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIA:

*En primer lugar a mi madre, quien me dio la vida y que ha tenido una influencia positiva en mi vida, a ti que has sido una mujer valiente y luchona ante la vida quiero darte las gracias por tu cariño incondicional y por el apoyo que día a día me das.*

*A mi padre, quien siempre ha estado apoyándome en todo momento, me has enseñado a creer en mí y a ser mejor cada día. A lo largo de mi vida has sabido inculcarme tus creencias, tus ideales y tus hábitos, me has brindado años de enseñanzas, gracias por tu ejemplo, apoyo, dedicación y amor.*

*A la UNAM por abrirme las puertas y darme la oportunidad de acceder a un mundo de conocimientos.*

*A la FES Zaragoza por permitirme entrar a esta carrera universitaria y ayudar a mi formación profesional.*

## AGRADECIMIENTOS:

*Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN221614, bajo el proyecto titulado "ECOLOGÍA DEL FUEGO EN BOSQUES DE PINO PIÑONERO" Agradezco a la DGAPA -UNAM la beca recibida.*

*Le doy las gracias al Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes por ofrecerme su apoyo, dedicación, paciencia y sobre todo porque me brindo su asesoría y sus conocimientos, sabe que aparte de haber sido un pilar en mi vida académica también es un gran amigo que ha sabido dar buenos consejos en momentos oportunos y me impulsa a seguir adelante y sobre todo a no desistir de mis metas (nunca se me olvidara su famosa frase "sí no puedes, déjalo"), gracias por todo el apoyo.*

*A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena por atenderme de la mejor manera en el COLPOS y compartir sus conocimientos y dedicación en este proyecto, gracias por impulsarme a adquirir mayor conocimiento. Es una persona muy sencilla y agradable. Y de igual manera agradezco al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, en específico al Laboratorio de Génesis y clasificación de suelos por brindarme la oportunidad de realizar parte de mis análisis micromorfológicos, en donde me ayudaron el M en C. Patricio y Don Peter.*

*A mis padres Yuri Marín Hernández y Martha Rocío García Hinojosa, por todo el apoyo que me brindaron en toda mi carrera y en mi vida, gracias por su amor, comprensión, cariño, por todos esos momentos buenos y malos que hemos vivido, por todos esos consejos que me hacen ser una mejor persona; gracias por ser parte fundamental de mi vida, los quiero mucho y espero que se sientan orgullosos de mis logros que sin ustedes no serían posibles.*

*A mi hermana Ma. Brenda Valentina Marín García que aunque tengamos nuestras diferencias sé que me apoyas y estarás conmigo cuando necesite de ti.*

*A Luis Javier Juárez Tavera quien hace unos años empezó a ser parte importante de mi vida, has sabido escucharme y motivarme para echarle ganas a la vida, gracias por tu apoyo, comprensión, cariño y amor que día a día me das, gracias por ser el mejor compañero de mi vida.*

*A Francisco Javier Juárez Rivas y Cynthia Denisse Montes de Oca Ayala, por ayudarme en esta etapa importante de mi vida, con la cual podre tener armas para enfrentarme a la vida, les agradezco de todo corazón la ayuda que me brindaron y sobre todo la confianza que me dan.*

*A mis compañeros de las FES Zaragoza del Laboratorio 8 de la UMIES, con quienes compartí divertidas salidas a campo, así como trabajo en el laboratorio y en el colegio: sobre todo gracias a Sandra Monserrat Barragán Maravilla, Gabriel Alejandro Hernández Vallecillos y Maleny Guadalupe Orozco Méndez, porque gracias a su apoyo y arduo trabajo en campo obtuve todo mis datos. También agradezco a Marianita, a la Chinita (Judith), Javier Mirón, Páez y Aby. A mis amigos de la carrera: Brenda Arredondo, Lulú Hernández, Javier Ramos, Cesar Díaz, Noé Ramírez. Y por último, pero no menos importantes a mis amigos de toda la vida Cynthia Dorantes, Diego Rueda y Yehimí Mejía.*

# CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEORICO</b>	
2.1 <i>Incendios forestales.....</i>	<i>2</i>
2.2 <i>Tipos de incendios.....</i>	<i>3</i>
2.3 <i>Efecto de los incendios en la apertura de conos.....</i>	<i>3</i>
2.4 <i>Repoblamiento de los bosques de coníferas (Pinus) en stios post-incendio.....</i>	<i>4</i>
2.5 <i>Propiedades físicas e hídricas del suelo (infiltración, hidrofobicidad, densidad aparente y capacidad de campo).....</i>	<i>5</i>
2.6 <i>Morfología y porosidad del suelo.....</i>	<i>9</i>
2.7 <i>Bosques de Pinus cembroides (descripción, distribución y ecología).....</i>	<i>11</i>
<b>3. PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>13</b>
<b>4. HIPÓTESIS.....</b>	<b>15</b>
<b>5. OBJETIVOS</b>	
5.1 <i>Objetivo general.....</i>	<i>15</i>
5.1 <i>Objetivos particulares.....</i>	<i>15</i>

## 6. MÉTODO

6.1 Zona de estudio (topografía, clima, geología, edafología y vegetación).....	16
6.2 Selección de sitios de muestreo (bosque no afectado de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus pincea</i> , bosque afectado por sequía y bosques afectados por incendio superficial, de copa, copa severo y copa severo de hace 54 años).....	17
6.3 Evaluación del repoblamiento en sitios postincendio.....	22
6.4 Evaluación de propiedades hídricas y físicas del suelo.....	22
6.4.1 Tasa de infiltración.....	22
6.4.2 Nivel de hidrofobicidad o repelencia al agua (WDTP).....	23
6.4.3 Densidad aparente y porcentaje de humedad.....	23
6.4.4 Capacidad de campo.....	24
6.5 Evaluación de las propiedades micromorfológicas.....	24
6.5.1 Toma de muestras inalteradas.....	24
6.5.2 Análisis micromorfológico.....	24
6.5.3 Análisis de imágenes.....	25
6.6 Análisis estadístico de resultados.....	26

## 7. RESULTADOS

7.1 Evaluación del repoblamiento de pino piñonero en sitios no afectado y afectados post-incendio.....	27
7.2 Efecto del fuego sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo.....	28
7.2.1 Tasa de infiltración.....	28
7.2.2 Nivel de hidrofobicidad o de repelencia al agua.....	29
7.2.3 Densidad aparente.....	30
7.2.4 Porcentaje de humedad.....	30
7.2.5 Capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua disponible y capacidad de retención de humedad.....	31
7.3 Diagnóstico de las propiedades morfológicas.....	32
7.3.1 Tipo de porosidad.....	34

7.3.2 Tipo de agregación.....	34
7.3.3 Tamaño de poros.....	35
<b>8. DISCUSIÓN</b>	
8.1 Repoblamiento en sitios no afectados.....	42
8.2 Repoblamiento en sitios post-incendio.....	43
8.3 Propiedades hídricas y físicas del suelo.....	44
8.3.1 Tasa de infiltración.....	44
8.3.2 Nivel de hidrofobicidad o repelencia al agua.....	45
8.3.3 Densidad aparente (DA) y porcentaje de humedad.....	46
8.3.4 Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), agua disponible (AD) y capacidad de retención de humedad (CRH).....	47
8.4 Diagnóstico de las propiedades morfológicas.....	47
8.4.1 Tipos de porosidad y agregación.....	47
8.4.2 Tipos de poros (macro, meso y microporos).....	49
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>10. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Clases de infiltración ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).....	6
2. Clasificación del tiempo de penetración de una gota de agua (WDPT).....	7
3. Repoblamiento de <i>Pinus cembroides</i> en no afectados y afectados post-incendio, en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.....	27
4. Infiltración en sitios no afectados y afectados post-incendio, en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.....	29
5. Hidrofobicidad del suelo en bosques no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.....	30
6. Densidad aparente, porcentaje de humedad, capacidad de campo y punto de marchites permanente en sitios no afectados y afectados post-incendio, en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.....	31
7. Propiedades morfológicas del suelo en sitios no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Plántulas y semillas de <i>Pinus cembroides</i> .....	12
2. Incendio forestal en el municipio de Cardonal, estado de Hidalgo. .....	13
3. Mapa de localización del cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, estado de Hidalgo .....	17
4. Sitios de muestreo en bosques no afectados y afectados por incendios de diferentes intensidades.....	21
5. Muestreo aleatorio de repoblamiento.....	22
6. Evaluación de la tasa de infiltración con permeámetro Guelph.....	22
7. Evaluación de hidrofobicidad (por el método WDTP).....	23
8. Evaluación de densidad aparente por el método del cilindro.....	24
9. Preparación de secciones delgadas.....	25
10. Repoblamiento por hectárea de piño piñonero en sitios afectados y no afectados por incendio.....	28
11. Muestras de secciones delgadas de bosques no afectados de <i>Pc</i> , <i>Pp</i> y afectados por sequía.....	32
12. Muestras de secciones delgadas de bosques no afectado de <i>Pinus</i> <i>cembroides</i> contra afectados post-incendio.....	33
13. Fotomicrografías de suelos no afectados ( <i>Pc</i> , <i>Pp</i> y ASeq).....	37
14. Fotomicrografías de suelos post-incendio ( <i>Pc</i> vs AIS).....	38
15. Fotomicrografías de suelos post-incendio ( <i>Pc</i> vs AIC).....	39
16. Fotomicrografías de suelos post-incendio ( <i>Pc</i> vs AICS).....	40
17. Fotomicrografías de suelos post-incendio ( <i>Pc</i> vs AICS 54años).....	41

## RESUMEN

Los incendios forestales pueden tener un papel dual en el repoblamiento de los bosques de pino; al ser destructivos (afectan la reproducción y regeneración) o constructivos (favorecen la reproducción y repoblamiento), y pueden afectar las propiedades hídricas y morfológicas del suelo; sin embargo, se desconocen sus efectos en los bosques de pino piñonero. En 2011 ocurrieron incendios de diferente intensidad que afectaron bosques de piñón (*Pinus cembroides* Zucc), en el municipio de Cardonal, Hidalgo; en este estudio específicamente, se pretende analizar las relaciones entre las diferentes intensidades de los incendios forestales con las propiedades hídricas y morfológicas del suelo; por lo que los objetivos de fueron: determinar el papel de los incendios sobre el repoblamiento del bosque y evaluar su efecto sobre las propiedades hídricas y micromorfológicas del suelo que influyen en la supervivencia de plántulas de pino piñonero.

Se delimitaron siete sitios de muestreo: no afectado de *Pinus cembroides* NA(*Pc*) y *Pinus pinceana* NA(*Pp*), bosque afectado por sequía (ASeq), afectado por incendio superficial (AIS), afectado por incendio de copa (AIC), afectado por incendio de copa severo (AICS) y afectado por incendio de copa severo hace 54 años (AICS 54años). En cada uno se establecieron 30 puntos de muestreo de un metro cuadrado para evaluar repoblamiento (# de plántulas·m<sup>-2</sup>). Se evaluó la hidrofobicidad a diferentes profundidades, infiltración superficial, densidad aparente, porcentaje de humedad, capacidad de campo y las propiedades micromorfológicas (% de porosidad, % agregación y tipo de poros).

Los resultados mostraron que los bosques NA(*Pc*) en 2014 y 2015, presentan un repoblamiento de 2 667 y 6 333 individuos·ha<sup>-1</sup> respectivamente, este comportamiento es inverso para el bosque de NA(*Pp*). Por otra parte los bosques ASeq siguen proporcionando sitios de percheo para aves dispersoras, favoreciendo así la dispersión de semillas de piñoneros, manteniendo la densidad del repoblamiento (2 667 y 2 000 individuos·ha<sup>-1</sup>). En general el repoblamiento en bosques de piñoneros no afectados por incendio es altamente variable pero continuo.

En los sitios post-incendio, los bosques AICS y AICS (54 años) generan condiciones que no permiten la supervivencia de plántulas de *P. cembroides*, debido a la presencia de capas altamente hidrófobas que reducen la tasa de infiltración, la retención de humedad y modifican la estructura del suelo pasando de bloques subangulares a agregados de tipo migajoso y microagregados entre granos; mientras que los bosques AIC registraron un repoblamiento de 333 y 0 individuos·ha<sup>-1</sup> en el 2014 y 2015 respectivamente, aquí los sitios de percheo se mantienen al igual que la dispersión de semillas pero en menor proporción.

En tanto los incendios superficiales (AIS) no afectan el repoblamiento y se consideran como constructivos (4 667 y 667 individuos·ha<sup>-1</sup>) debido a la presencia de árboles y sitios de percheo, donde las aves pueden reposar y depositar las semillas para su consumo y las que escapan a esta depredación serán las que germinen. El repoblamiento y la supervivencia de plántulas de *P. cembroides* se ve favorecido porque estos incendios disminuyen la hidrofobicidad superficial e incrementan los mesoporos del suelo, contribuyendo así a una mayor disponibilidad del agua.

**Palabras clave.** Incendios forestales, piñón, repoblamiento, propiedades hídricas y morfológicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques de *Pinus cembroides* (piñón) se extienden en las montañas semiáridas de las Sierras Occidental y Oriental de México, los cuales son un gran producto de gran valor económico y nutricional para varias zonas ejidatarias en México. En 2011, en la región de Cardonal del Estado de Hidalgo, estos bosques fueron afectados por incendios de diferentes intensidades. En los bosques de coníferas, los incendios son el disturbio natural más importante (Kasischke, 2000) y constituye parte importante de su dinámica; sin embargo, todavía existen interrogantes sobre sus efectos en las propiedades edáficas y sobre el repoblamiento de pinos piñoneros.

Los incendios y sus efectos en el repoblamiento de los bosques de coníferas han generado una gran controversia, ya que presentan un efecto dual: pueden ser **destructivos** cuando afectan la reproducción de árboles ocasionando que el bosque no se regenere o son **constructivos** cuando favorecen la reproducción y el repoblamiento del bosque en general (Shvidenko y Nilsson, 2000). No obstante, hay poco conocimiento en cuanto a los factores que determina esta dualidad.

Los incendios forestales en bosques de coníferas desarrollados en Andosoles han generado cambios en las propiedades edáficas, pero se desconocen sus efectos en suelos derivados de calizas y con bosques de piñoneros.

En este trabajo se desea responder las siguientes interrogantes: ¿Qué papel tiene el fuego sobre el repoblamiento de los bosques de *Pinus cembroides*?, ¿Los incendios afectan las propiedades hídricas y morfológicas del suelo?

La hipótesis general que se plantea es que los incendios modifican las propiedades morfológicas y edáficas relacionadas con el agua, por lo que limitan el repoblamiento.

La respuesta a estas interrogantes podrá permitir proponer estrategias de recuperación y repoblamiento de estos bosques, ya sea mejorando la agregación y porosidad del suelo o bien disminuir la erosión.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 Incendios forestales

Los incendios forestales son resultado de la combustión de material vegetal en presencia de una fuente de calor, que junto con el oxígeno se producen gases que se liberan por calentamiento del combustible y el aire, el cual también proporciona el oxígeno necesario para que el proceso continúe (Carballas, 2003).

De acuerdo con la CONAFOR (2008), el fuego es el desprendimiento de calor y luz producida por la combustión de materia vegetal viva o muerta (combustible forestal) y se considera como un agente que influye en la heterogeneidad estructural de los bosques. El régimen del fuego por su parte se refiere a la caracterización de las perturbaciones que afectan un espacio determinado a lo largo del tiempo; Díaz *et al.* (2004) incluyen los siguientes parámetros:

- ♦ *Intensidad.*- mide la magnitud física (las temperaturas alcanzadas por el incendio).
- ♦ *Severidad.*- mide el grado de afectación en los organismos o en las propiedades del sistema (porcentaje de árboles muertos por el fuego).
- ♦ *Extensión.*- hace referencia a la superficie afectada.
- ♦ *Frecuencia.*- medida como número de perturbaciones que se producen en un área concreta a lo largo de un período de tiempo determinado.
- ♦ *Periodo de recurrencia.*- medido como el tiempo necesario para que un área vuelva a ser afectada por la misma perturbación.
- ♦ *Estacionalidad.*- o época del año en que se producen las perturbaciones.

Los conocimientos actuales ubican al fuego como un efecto dual: pueden ser destructivos porque afectan la reproducción de árboles y esto ocasiona que el bosque no se regenere o pueden ser constructivos si favorecen la reproducción y el repoblamiento del bosque en general (Shvidenko y Nilsson, 2000). El problema radica en que se desconoce cuándo un incendio será positivo y negativo, de ahí que se deje a la naturaleza la regeneración o degradación del sistema.

## 2.2 Tipos de incendio

Según con la CONAFOR (2008) existen incendios con diferentes grados de intensidad, y los dividen en:

- Incendio de copa, de corona o aéreo. Afecta gravemente a los ecosistemas pues destruye a toda la vegetación y en grados diversos daña a la fauna silvestre.
- Incendio superficial. Daña principalmente pastizales y vegetación herbácea que se encuentra entre la superficie terrestre y hasta 1.5 metros de altura. Deteriora en gran medida la regeneración natural y la reforestación. En México es el más frecuente (poco más de 90 %).
- Incendio subterráneo. Se propaga bajo la superficie del terreno y afecta las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramiento de roca. Se caracteriza por no generar llamas y por poco humo.

En México se registran cada año un promedio de 8 mil incendios forestales que afectan en diversos grados a los distintos ecosistemas terrestres del país. El registró histórico, con respecto a la frecuencia de incendios, se centra en dos datos básicos: el número de incendios y la superficie afectada. En la actualidad, el número de incendios ha disminuido con el paso de los años; la CONAFOR (2015) reportó 513 incendios con 1,373.48 hectáreas de superficie afectada en 2015.

En el país, 98 % de los incendios forestales son causados por actividades humanas y 2 % por causa naturales, como descargas eléctricas o erupciones volcánicas, además de las condiciones climáticas y meteorológicas (Ressl y Cruz, 2012).

## 2.3 Efecto de los incendios en la apertura de conos

Las piñas de pino o “conos” son estructuras cónicas que se encuentran distribuidos en la copa de los árboles; son caedizos y casi sésiles; de color marrón anaranjado o rojizo: con pocas escamas; dentro de éstos se forman las semillas que son marrones o negruzcas (González-Romero, 2005). Los bosques del género *Pinus* tienen especies con conos serótimos y no serótimos. Los conos serotinos son comunes en las especies que viven en las áreas que suelen

incendiarse, aumentando su supervivencia durante un fuego (Zwolinski, 1990). La serotinia maximiza el número de las semillas disponibles para la generación siguiente, almacenándolas y protegiéndolas contra los depredadores y el calor (Lamont y Enright, 2000). Además los conos serotinos se mantienen cerrados durante varios años y el fuego produce la apertura de las escamas leñosas y posteriormente comienza la dispersión de las semillas (Leone *et al.*, 1997).

Algunas especies que guardan una estrecha relación entre el factor ecológico fuego, y sus conos serotinos son *Pinus banksiana* Lamb., *P. rigida* Mill., *P. contorta* Dougl (Spurr y Barnes, 1982). También se puede encontrar *P. patula*, *P. cooperi*, *P. michoacana* (Rodríguez, 1994) y *P. montezumae* (Zendejas, 1971). En cambio, *Pinus cembroides* no posee conos serotinos, y sus semillas suelen ser viables por un año (De León-Morales, 2010).

#### **2.4 Repoblamiento de los bosques de coníferas (*Pinus*) en sitios post-incendio**

La regeneración o repoblamiento natural es aquel fenómeno que ocurre cuando nacen nuevas plántulas de semillas que fueron dispersadas a lo largo de la vida de un árbol maduro (Valladares, 2004).

Existen muchos agentes que controlan la regeneración, entre ellos están: el clima, temperatura, radiación solar, humedad, luz y las perturbaciones que ocurren en los ecosistemas de forma natural, además de la intervención del hombre; que son importantes en la estructura de los bosques y su composición (Rodríguez *et al.*, 2006).

Crotteau *et al.* (2012) encontraron que los incendios, en particular los de severidad media, favorecen el repoblamiento de *Abies concolor*, *Pinus lambrestiana* y *Pinus ponderosa* (con 6 539, 619 y 312 plántulas·ha<sup>-1</sup>, respectivamente); no obstante para *Pinus jeffreyi* el repoblamiento disminuye, y para *P. contorta* y *P. monticola* no tiene efectos. También reportan que los incendios de severidad alta disminuyen la regeneración de todas las coníferas.

Beghin *et al.* (2010) mencionan que la regeneración de *Pinus sylvestrie* es favorecida por incendios superficiales de baja gravedad (1 021 plántulas·ha<sup>-1</sup>); sin

embargo para otras coníferas como *Larix decidua* y *Picea abies* presentan un menor número de individuos (ambas con 142 plántulas·ha<sup>-1</sup>).

Dodson y Root (2013) reportan que la regeneración con mayor número de plántulas es *Pinus ponderosa* (con 1 196 plántulas·ha<sup>-1</sup>) para zonas con un menor gradiente altitudinal dañadas por incendios forestales severos.

Sánchez *et al.* (2014) registran una densidad alta de regeneración natural en sitios afectados por incendios forestales severos para *Pinus oocarpa* con 6 256 plántulas·ha<sup>-1</sup> en un bosque de encino-pino y matorrales.

En estudios de repoblamiento post-incendio en bosques de pino piñonero, en Estados Unidos de Norte América existe una controversia, ya que Hardy *et al.* (2002) señala que los incendios superficiales son los que dominan, mientras que para William y Douglas (2004) los incendios de copa o severos son los más comunes y los que dominan la dinámica. Estos estudios están basados en incendios controlados, o en muestreos después de varios años de ocurrido el incendio y no se han basado en incendios recientes.

## 2.5 Propiedades físicas e hídricas del suelo

La vitalidad y el crecimiento forestal se relacionan con la disponibilidad de agua y por lo tanto con las propiedades hídricas del suelo. Estas propiedades determinan la capacidad del suelo para transmitir, conducir y almacenar agua; además, son las responsables de la retención de humedad y el flujo hídrico pluvial hacia los mantos acuíferos. Así mismo están relacionadas con la tasa de infiltración, hidrofobicidad, densidad aparente, textura, tamaño y distribución de poros los cuales se determina mediante análisis micromorfológico (Lipiec *et al.*, 2009). A continuación se discutirá cada una de estas propiedades:

✧ **Infiltración:** es el proceso de entrada de agua al suelo; mientras que la capacidad de infiltración es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de tiempo, expresado en mm·h<sup>-1</sup> (Maderey, 2005). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, (USDA, 2001) propuso una clasificación para medir la infiltración en el suelo (Cuadro 1).

Cuadro1. Clases de infiltración (mm·h <sup>-1</sup> )	
Clase	mm·h <sup>-1</sup>
Muy rápida	>508
Rápida	152.4 a 508
Moderadamente rápida	50 a 152.4
Moderada	15.24 a 50
Moderadamente lenta	5.0 a 15.24
Lenta	1.524 a 5.0
Muy lenta	0.038 a 1.524
Impermeable	< 0.038

Fuente (USDA) 2001.

Harden y Scruggs (2003) evaluaron la infiltración en un bosque mixto en las montañas Apalaches y encontraron un intervalo de 16 a 117 mm·h<sup>-1</sup>; es decir, de lenta a moderadamente lenta. Por su parte, Zehether y Miller (2006) determinaron una infiltración moderadamente rápida de 56.9 mm·h<sup>-1</sup> en un bosque de Ecuador en suelos de materiales volcánicos.

En suelos predominantes con Rendzinas se desconocen las tasas de infiltración y los efectos del fuego sobre las mismas. Además los trabajos realizados en suelos bajo bosques de pino piñonero son escasos y se han descrito tasas de 667.9 mm·h<sup>-1</sup>, correspondientes a la clase muy rápida (Shukla *et al.*, 2006).

También se ha reportado que en bosques de coníferas la infiltración superficial pertenece a la clase rápida (504 mm·h<sup>-1</sup>), mientras que a mayor profundidad se reduce a 110.4 mm·h<sup>-1</sup>, de acuerdo con lo registrado por Aviña-Hernández (2015).

✧ **Hidrofobicidad:** es la repelencia al agua del suelo cuando se moja de manera espontánea (Müller *et al.*, 2010). La clasificación para los niveles de hidrofobicidad se lleva a cabo por el método de *Water Drop Penetration Time* (WDPT), fue establecido por Dekker y Jungerius (1990) revisado en Duque *et al.* (2004), como se reporta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación del tiempo de penetración de una gota de agua (WDPT).

Segundos	Nivel de repelencia al agua	Clase/ Persistencia
< 5	No repelente	0
50-60	Ligeramente repelente	1
60-600	Fuertemente repelente	2
600-3600	Severamente repelente	3
>3600	Extremadamente repelente	4

Fuente Dekker y Jungerius (1990) en Duque *et al.* (2004).

La hidrofobicidad está presente en diferentes tipos de suelo y dependiendo de su severidad puede reducir la tasa de infiltración y favorecer el flujo superficial aumentando el riesgo de erosión (Letey *et al.*, 2009; Zavala *et al.*, 2010). La repelencia al agua es generada principalmente por compuestos orgánicos producidos por plantas vivas o en descomposición, microorganismos, tasas de mineralización del suelo y por incendios forestales (Doerr *et al.*, 2000; Jordán *et al.*, 2009).

En los suelos afectados por incendios se ha encontrado que la tasa de infiltración se reduce debido a diversos factores como: la formación de capas repelentes o hidrófobas (DeBano, 1989), a las partículas de cenizas que obstruyen los poros superficiales (Mallik *et al.*, 1984) o a la generación de costras impermeables (Fox *et al.*, 2004).

Un componente no biótico que origina o destruye la hidrofobicidad es el fuego. DeBano (1981) menciona que después de un incendio la repelencia al agua puede manifestarse como una capa de espesor y continuidad variable en la superficie del suelo o a unos pocos centímetros de profundidad.

En España, Zavala *et al.* (2010), registraron una hidrofobicidad extremadamente repelente en muestras de suelo colectadas bajo pinos y eucaliptos; sin embargo no se han encontrado estudios sobre hidrofobicidad en Rendzinas, en bosques semiáridos.

✧ **Densidad aparente (DA):** Se define como la relación de la masa de suelo entre el volumen total del mismo, considerado el espacio entre las partículas del suelo. Es un indicador de la compactación del suelo y se calcula con el peso seco del suelo dividido por su volumen ( $DA=ms/Vt$ ), se expresa en  $g\cdot cm^{-3}$ .

Generalmente, esta propiedad cambia poco con los incendios, independientemente del tipo de suelos e intensidad, Thomas *et al.* (1999) reportaron en Leptosoles úmbrico, bajo bosque de pino una DA de  $0.63 g\cdot cm^{-3}$  en zonas afectadas por incendio y  $0.67 g\cdot cm^{-3}$  en zona no afectada por incendio.

En Andosoles, Ángeles-Cervantes (2010) encontró que la DA se incrementa en bosques con incendio superficial y se reduce en bosques con incendio moderado ( $0.81$  y  $0.52 g\cdot cm^{-3}$ , respectivamente) presentando diferencias significativas entre ellos, pero no con bosques conservados ( $0.65 g\cdot cm^{-3}$ ), ni con bosques con incendio severo ( $0.72 g\cdot cm^{-3}$ ). Por su parte Aviña-Hernández (2015) registró en bosques de coníferas una densidad aparente de  $0.73 g\cdot cm^{-3}$ .

En suelos bajo bosque de coníferas afectados por incendio en Estados Unidos, Alaska y Canadá; las densidades van de  $0.38 g\cdot cm^{-3}$  a  $0.48 g\cdot cm^{-3}$  (Johstone y Chapin III, 2006).

✧ **Capacidad de campo:** Se denomina capacidad de campo a la cantidad de agua que es capaz de retener el suelo luego de su saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que el potencial hídrico del suelo se estabilice (alrededor de 24 a 48 horas luego de la lluvia o riego). Este contenido de agua está en condiciones para ser utilizada por el cultivo y se define gráficamente como la diferencia entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, expresado porcentualmente en mm de agua disponible (Mayorga, 2001).

Las curvas de retención de humedad expresan la relación entre el potencial matricial y el contenido de agua en un suelo. Brinda información indirectamente sobre la distribución de la macro, meso y microporosidad. El agua en el suelo está

retenida por distintas fuerzas que determinan su potencial hídrico, expresado en unidades de presión. El rango de potenciales matriciales en el que se determina la curva, va desde 0 kPa (saturación) hasta aproximadamente  $-10^6$  kPa (suelo seco) (Flores y Alcalá, 2010).

González *et al.* (2006) encontraron que en Andosoles el fuego modifica el tipo de agregados del suelo cambian su tamaño, ya sea formando micros o macro agregados. Estas modificaciones tienen relación directa con la capacidad de retención de agua en los suelos quemados, debido a que la formación de macro también incrementa la microporosidad y la retención de humedad; mientras que la formación de micros la reduce aunque se incrementa el espacio poroso y por lo tanto la infiltración (Pape y Lager, 1994). En el caso de bosques de pino piñonero no existen estudios que hayan determinado la capacidad de retención de humedad en suelos post-incendio.

**2.6 Morfología y porosidad del suelo:** La microestructura del suelo se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes, rasgos y fábricas de los suelos a un nivel microscópico (Gutiérrez y Ortiz, 1999).

La estructura y porosidad se refieren a la distribución espacial y a la organización total del sistema del suelo, expresados por el grado y tipo de agregación, la distribución y el espacio poroso. En la mayoría de los suelos las partículas individuales no existen como entidades discretas sino que están agrupadas en agregados o *peds* de formas y tamaños bastante característicos. El grado y tipo de agregación determinara la aireación y la permeabilidad y, por tanto, la capacidad de infiltración y de movimiento del agua (Fitzpatrick, 1993)

La porosidad incluye a todos los espacios vacíos del suelo. Los poros están relacionados con el arreglo de los contribuyentes primarios del suelo, los patrones de enraizamiento, madrigueras de animales o algunos otros procesos de formación de suelos, como agrietamientos, translocaciones y lixiviaciones (Aviña-Hernández, 2015). Se pueden clasificar por: modo de formación, tamaño, forma, arreglo y continuidad (Pape y Lager, 1994). En relación a su tamaño existen

microporos ( $<30 \mu\text{m}$ ) que no pueden verse a simple vista y que se presentan en todos los suelos, los cuales determinan en gran medida el almacenamiento de humedad; los mesoporos ( $50\text{-}500 \mu\text{m}$ ) permiten la penetración y el crecimiento de raíces (Pagliai *et al.*, 1987); y los macroporos ( $>500 \mu\text{m}$ ) se observan a simple vista y contribuyen a la percolación del agua. Estos poros se clasifican en los siguientes tipos: intersticiales, vesículas, cavidades, canales y planos, los cuales permiten el movimiento del agua hacia el interior del suelo (Ortiz-Solorio, 2010), mientras que su permanencia y continuidad por la percolación del agua también se modifica (Pape y Lager, 1994).

El análisis morfológico se lleva a cabo por medio de secciones delgadas de suelos inalterados. Es una técnica de observación morfológica en el intervalo de micrómetros. Esta técnica requiere de muestras edafológicas de material recogido adecuadamente, previamente impregnadas con resinas, finamente cortadas y pegadas a las secciones delgadas petrográficas (Gutiérrez y Ortiz, 1999). Los materiales preparados se observan con la ayuda de lentes de aumento y microscopios polarizadores ópticos. Con esta técnica, se analizan los constituyentes sólidos y se identifican por sus propiedades ópticas, con las cuales también se podrá asumir su uso (Castro, 2003).

A través del estudio de secciones delgadas, se ha encontrado que después de un incendio quedan un gran número de partículas de ceniza que obstruyen los poros grandes superficiales del suelo (macroporos) y los transforman en múltiples poros pequeños (microporos) (Mallik *et al.*, 1984), mientras que si no hay presencia de esta capa de ceniza, los incendios no alcanzan a dañar su estructura (Parks y Cundy, 1989; Rab, 1996).

Ángeles-Cervantes (2010) registra en un bosque de oyamel no afectado agregados de bloques subangulares y poros tipo fisura con una porosidad total de 49.6 %. En sitios afectados por incendio superficial los agregados colapsaron y los bloques subangulares fueron de mayor tamaño, la porosidad total y el % de macroporos disminuyeron significativamente en un 14 y 20 % respectivamente. Los sitios afectados por incendio de copa moderado mostraron abundancia de microagregados, rodeados de poros con una estructura esponjosa, durante los

primeros 5 cm del suelo y mayor presencia de residuos carbonizados, la porosidad total fue similar al bosque no afectado y los microporos se incrementaron en casi un 10 %. Por último en sitios afectados por incendios de copa severo, se apreciaron agregados subangulares en el primer centímetro de suelo, con poros subsféricos intragregados y en los siguientes dos centímetros de profundidad predominan los microagregados rodeados de poros generando estructuras esponjosas.

En la actualidad no se han encontrado registros de morfología y porosidad en suelos de tipo Rendzina o Leptosoles calcicos bajo bosques de pino piñonero.

## **2.7 Bosques de *Pinus cembroides***

**Descripción:** Árbol perennifolio, de 5 a 10 m (hasta 15 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de 30 cm (hasta 70 cm). Copa redondeada y abierta en individuos maduros y copa piramidal (espaciada) en individuos jóvenes, con follaje ralo, sobre todo en sitios muy secos, de color verde oscuro algo azulado, pálido a veces amarillento. Las hojas en grupos de 2 a 3, entre 2.5 y 10 cm de longitud, cubren abundantemente las ramitas y dejan una cicatriz en éstas cuando caen. Conos subglobosos de 5 a 6 cm de ancho, casi sin pedúnculo, aislados o en grupos de 5, caedizos con escamas grandes gruesas y carnosas cuando están verdes y de color verde café-anaranjadas o rojizas cuando el cono madura. Semillas desnudas, subcilíndricas, ligeramente triangulares, sin ala, de 10 mm de largo, café o negruzcas, abultadas en la parte superior y adelgazada hacia la base.

**Distribución:** *Pinus cembroides* es uno de los pinos de mayor distribución en México (19 estados). Forma masas puras en la Sierra Madre Oriental al norte del Trópico de Cáncer. Las mayores poblaciones están en: Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo, y Zacatecas. Altitud: 1 350 a 2 800 m. Además, se ha reportado en: Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Ciudad de México, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas.

**Ecología:** Los bosques de piñón son muy extensos en ambas cadenas montañosas de la parte norte del país. Conforman una vegetación de transición entre las formaciones xerofíticas de la altiplanicie mexicana y las vertientes internas de las Sierras Madres Oriental y Occidental (CONABIO, 2000).

Por otra parte, los pinos piñoneros producen semillas (piñones) que son importantes en la economía de los ejidatarios y comuneros de varios pueblos de México, ya que se encuentran en el mercado a precios muy elevados (1kg=\$ 1500 pesos). Los piñoneros tienen un alto contenido nutricional debido a que aportan proteínas, lípidos y vitaminas B1 y B2. Incluso la (FDA) recomienda el consumo de piñón como medio para reducir el riesgo de enfermedades coronarias por su efecto atribuido al alto contenido de ácido linoleico. (Faday y Vendramin, 2008). Otros productos con valor económico son las resinas que se extraen de la corteza del pino (para extracción de taninos) y las escamas de las piñas (comúnmente utilizadas para combustible). La madera del pino es muy pesada y resistente por lo que es útil para la construcción También presentan un alto valor ornamental ya que se puede encontrar plantados en parques y jardines de todo el mundo.



Figura 1. Plántulas y semillas de *Pinus cembroides*.

### 3. PROBLEMÁTICA

En febrero de 2011, los incendios forestales afectaron aproximadamente 230 hectáreas de un bosque de piñon-junípero en el cerro de “La Soledad”, del municipio de Cardonal, Hidalgo (Figura 3). En este tipo de vegetación predomina el piño piñonero (*Pinus cembroides* Zucc.) especie de importancia económica para los ejidatarios y comuneros de la región, debido a que utilizan y venden las semillas conocidas como piñones.



Figura 2. Incendio forestal en el municipio de Cardonal, estado de Hidalgo.

La intensidad del fuego vario en la zona incendiada por lo que el bosque presento diferentes grados de severidad. Debido a que el cerro está en una zona de alta temperatura, poca humedad, con fuertes vientos y abundante cantidad de combustible natural, causó grandes daños en la flora y la fauna; mientras que en la parte más alta del cerro el arbolado se encontraba carbonizado desde el fuste hasta la copa, con presencia de capas de ceniza en el suelo, afloramiento rocoso y suelos someros (6 cm de profundidad).

Después de este disturbio se realizaron reforestaciones para recuperar la vegetación de estos bosques, desafortunadamente no han tenido éxito ya que se han introducido especies forestales no nativas de la zona (*Pinus greggi*), que son producidas en vivero y que están sometidas a condiciones favorables. Por todo lo anterior es necesario realizar estudios sobre el efecto de estos incendios sobre las propiedades físicas, hídricas y morfológicas del suelo, así como su relación con la repoblación de *P. cembroides* y a su vez comprender su influencia en la dinámica de los bosques de esta especie.

Debido a lo anterior surgen las siguientes interrogantes:

¿Qué papel tiene el fuego sobre el repoblamiento de los bosques de *Pinus cembroides*?

¿Qué efecto tiene el fuego sobre de las propiedades hídricas del suelo y cómo influyen en la supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides*?

¿Los incendios afectan las propiedades morfológicas del suelo?

Los resultados de este trabajo permitirán incrementar el conocimiento de los efectos de los incendios en los bosques semiáridos y servirán para proponer estrategias de prevención, manejo y control de incendios.

#### **4. HIPÓTESIS**

- ✧ Debido a que *Pinus cembroides* no posee conos serótinicos la regeneración no se verá favorecida por el fuego en sitios con mayor severidad de incendio.
- ✧ A mayor severidad de incendios se formara una capa hidrófoba que reduce la infiltración y modificara la morfología del suelo, por lo que el agua disponible para las plántulas será menor, y por lo tanto habrá menor repoblamiento de *Pinus cembroides* en los sitios post-incendio.
- ✧ La estructura y porosidad del suelo se ve afectada a mayor severidad de incendios; en sitios afectados por sequía la macroporosidad será mayor por el espacio que dejan las raíces muertas, mientras que en bosques no afectados la porosidad (los macro y microporos) permitirá buena retención de humedad.

#### **5. OBJETIVO GENERAL**

- ❖ Determinar el papel de los incendios a diferentes intensidades sobre el repoblamiento de los bosques de *Pinus cembroides* y su relación con las propiedades edáficas (hídricas y morfológicas), en el municipio de Cardonal, Estado de Hidalgo.

##### **5.1 OBJETIVOS PARTICULARES**

- ❖ Evaluar el repoblamiento natural de *Pinus cembroides* en las diferentes zonas no afectadas, afectadas post-incendio y afectadas por sequía.
- ❖ Evaluar el efecto de los incendios sobre las propiedades hídricas del suelo sobre los diferentes sitios.
- ❖ Evaluar el efecto de los incendios sobre las propiedades morfológicas (estructura y porosidad del suelo) en bosques afectados y no afectados de pinos piñoneros.

## 6. MÉTODO

### 6.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en el cerro “La Soledad”, a 5 km del municipio de Cardonal en el estado de Hidalgo, entre los poblados de San Miguel Tlazintla y Santuario Maphete, tiene las siguientes coordenadas geográficas: 99° 07' 28'' y 99° 05' 44'' longitud Oeste y 20° 37' 11'' y 20° 37' 56'' latitud Norte, a 2 100 y 2 700 msnm (INEGI, 2001).

**Clima:** En la temporada de estiaje (meses de noviembre a abril) presenta un rango de temperatura que va de 6 a 21 °C. La precipitación varía de 75 a 100 mm, con episodios de 0 a 29 días. En los meses de diciembre, enero y febrero ocurren en promedio de 1 a 8 heladas. Los vientos predominantes durante la estación seca están dados por un barlovento ubicado al Noroeste de la elevación, el cual origina vientos con una frecuencia del 29 % hacia el Norte, 10 % hacia el Noreste, 35 % hacia el Este, 10 % hacia el Sureste y 15 % hacia el Sur (INEGI, 1985).

En época de lluvias (meses de mayo a octubre) existe un rango de temperatura que va de 12 a 24 °C. La precipitación es de 500 a 625 mm, con episodios de 60 a 89 días en promedio. Los vientos predominantes en la temporada de lluvias, están dados por un barlovento ubicado en la parte alta y Noreste de la elevación, dirigiendo el viento con una frecuencia del 40 % hacia el Norte, 5 % hacia el Noroeste, 12.5 % hacia el Este, 5 % hacia el Sureste y 30 % hacia el Sur (INEGI, 1985).

**Geología:** En la mayor parte del área se encuentra roca caliza (sedimentaria) proveniente del periodo Cretácico Inferior. En una pequeña porción del área ubicada al Suroeste, en la parte baja de la elevación, hay presencia de conglomerado (roca sedimentaria) del periodo Terciario Superior (INEGI, 1983).

**Edafología:** El suelo predominante es Leptosol de acuerdo con el Grupo de trabajo de WRB (2007) (antes Litosol) y Rendzina como suelo secundario, con una clase textural media y una fase física petrocálcica (INEGI, 1983).

**Vegetación:** El bosque es principalmente de *Pinus cembroides* acompañado de *Juniperus flaccida*. Es importante recalcar que el bosque de pino

se localiza entre dos tipos de vegetación contrastantes: matorral xerófilo y bosques de pino y encino más húmedos (Ángeles-Cervantes, 1984).

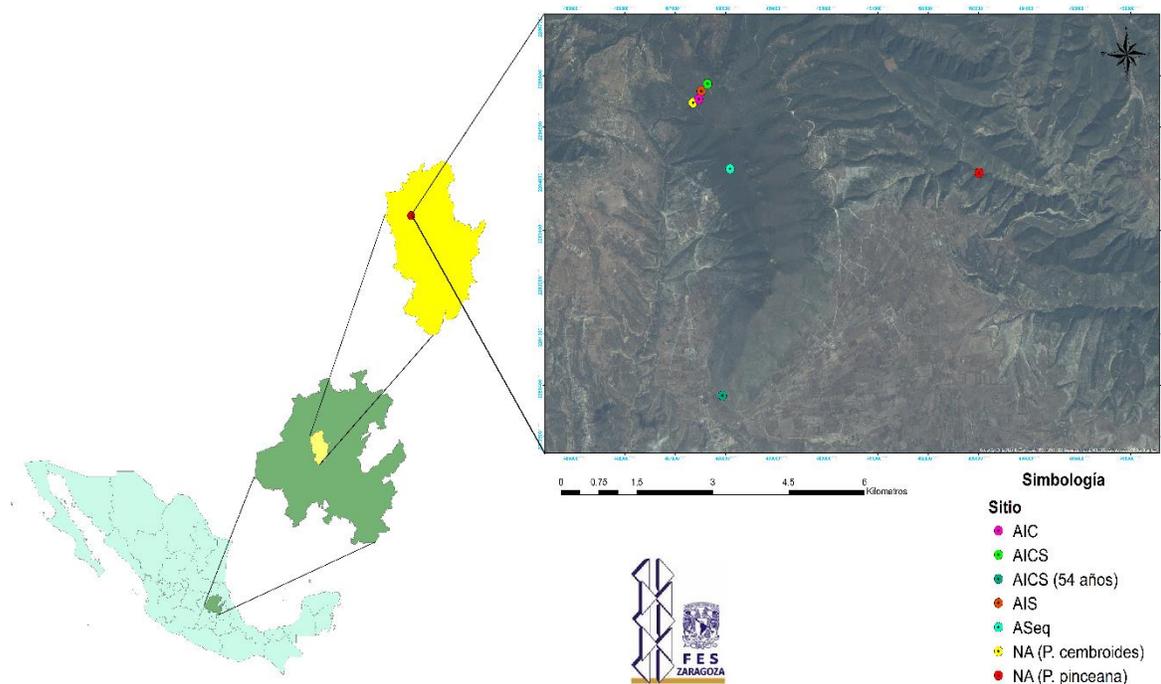


Figura 3. Mapa de localización del cerro de "La Soledad" en el municipio de Cardonal, estado de Hidalgo.

## 6.2 Selección de sitios de muestreo

En el cerro de "La Soledad" se realizó un recorrido por toda el área afectada y se seleccionaron cuatro sitios afectados por incendio conforme lo sugerido por la CONAFOR (2010); además de un sitio afectado por sequía dentro del mismo cerro y un poco alejado del área de estudio se seleccionó un bosque no afectado de *Pinus pinceana*, las características de los sitios de muestreo se mencionan a continuación:

Sitios	Caracterización ecológica	Coordenadas
Bosque no afectado de <i>Pinus cembroides</i> (NA Pc)	Este sitio se ubicó en la parte baja de la ladera donde predomina el estrato arbóreo y le sigue el estrato arbustivo y herbáceo, presenta pendiente de 35°, capa de hojarasca de 8 cm y textura arcillo-arenoso (Orozco, 2015). No presentan ningún vestigio de incendio	20°40'02.06" N 99°07'17.24" O 2396 msnm
Bosque no afectado de <i>Pinus pinceana</i> (NA Pp)	Este bosque se encuentra en una barranca húmeda en donde predomina la vegetación arbórea y arbustiva con cactáceas columnares ( <i>Cephalocereus senilis</i> ) de hasta 6 a 7 m de altura y globosas ( <i>Ferocatus sp</i> ), biznagas ( <i>Echinocactus</i> ), árboles de <i>Pinus pinceana</i> y gran variedad de herbáceas; se encuentra a seis kilómetros de la zona de estudio. Este bosque no ha sido afectado por ningún tipo de incendio. Presenta un capa de hojarasca de 5 cm aproximadamente, pendiente de 65° y textura arcillo-limoso (Orozco, 2015).	20°39'22.30" N 99°04'01.75" O 1951 msnm
Bosque afectado por sequía (ASeq)	Este sitios los estratos arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del suelo no presentan ningún vestigio de incendio; sin embargo, los árboles de <i>Pinus cembroides</i> se encuentran muertos de pie, presentan una capa de hojarasca de 4 a 6 cm aproximadamente, pendiente de 40° y textura arcillo-arenoso (Orozco, 2015).	20°39'24.6" N 99°06'51.88" O 2456 msnm
Incendio superficial (AIS)	En este incendio el fuego se propagó en forma horizontal sobre la superficie del terreno y alcanzó hasta metro y medio de altura, por lo que el arbolado presentó vestigios de incendios de hasta un metro de altura; y los estratos arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca se encontraron ligeramente afectados. Este sitio se ubicó en la parte media de la ladera donde predomina el estrato arbóreo vivo y muerto, le sigue el estrato arbustivo y herbáceo, pendiente de 55°, capa de hojarasca de 8 a 10 cm aproximadamente y textura arcillo-arenoso (Orozco, 2015).	20°40'08.68" N 99°07'11.57" O 2527 msnm

<p>Incendio de copa (AIC)</p>	<p>En este incendio el fuego avanzo primero sobre el nivel del suelo y se propagaron por continuidad vertical, es decir, escalaron poco a poco la vegetación, iniciando con la capa de hojarasca, el estrato herbáceo y arbustivo hasta llegar a las copas del arbolado, las cuales se encuentran carbonizadas pero aún están presentes. Este sitio se ubicó en la parte media y alta de la ladera; predomina el estrato arbóreo muerto y le sigue el estrato herbáceo y arbustivo, pendiente entre 55 y 60°, sin capa de hojarasca y con afloramiento rocoso y textura arcillo-limoso (Orozco, 2015).</p>	<p>20°40'04.12" N 99°07'13.28" O 2460 msnm</p>
<p>Incendio de copa severo (AICS)</p>	<p>En este incendio el fuego fue de mayor intensidad porque copas del arbolado se perdieron por completo, solo se encuentra el fuste de los arboles carbonizado. Este sitios se ubicó en la parte alta de la ladera, predomina el estrato arbóreo carbonizado (muerto) y le sigue el estrato herbáceo y arbustivo, pendiente de 65°, sin capa de hojarasca y con afloramiento roco y textura arcillo-limoso (Orozco, 2015).</p>	<p>20°40'12.78" N 99°07'07.26" O 2625 msnm</p>
<p>Incendio de copa severo de 54 años (AICS 54años)</p>	<p>Esta zona actualmente es un matorral de <i>Flourensia resinosa</i>, que en 1961 sufrió un incendio que arrasó con la capa de hojarasca, el estrato herbáceo, arbustivo y el arbolado por lo que predomina solamente el estrato arbustivo, presenta pendientes de 45 y 60°, textura arcillo-arenoso (Orozco, 2015), el suelo está desnudo ya que se encuentra cubierto totalmente de rocas y grava.</p>	<p>20°37'15.94" N 99°06'57.05" O 2082 msnm</p>



Figura 4. Sitios de muestreo en bosques no afectados y afectados por incendios de diferentes intensidades.

### 6.3 Evaluación del repoblamiento en sitios postincendio

En cada sitio se evaluó el número de plántulas, utilizando 30 cuadros de 1m<sup>2</sup>. En total el número de cuadros contabilizados fue de 210, estos se ubicaron de manera aleatoria, y alejados de los bordes como lo recomienda Kayes y Tinker (2012). Únicamente se registró si la plántula estaba viva o muerta y la edad aproximada, de acuerdo al número de verticilos (Figura 5).



Figura 5. Muestreo aleatorio de repoblamiento.

### 6.4 Evaluación de las propiedades hídricas y físicas del suelo

#### 6.4.1 Tasa de infiltración

En cada sitio, la tasa de infiltración se determinó *in situ* de tres a cuatro registros, utilizando el permeámetro Guelph-2800KI® (Figura 6). Este es un



Figura 6. Evaluación de la tasa de infiltración con permeámetro Guelph.

instrumento que se basa en el principio del bulbo húmedo constante; opera con el principio del sifón de Mariotte que mantiene el agua a un nivel constante en un agujero, previamente hecho con una barrena. Para esta evaluación, se realizó un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro y 5 cm de profundidad, en el cual se coloca el permeámetro y se ajusta la válvula del reservorio. En seguida se niveló el agua a 0 cm y la velocidad de descenso se registró por medio de una escala graduada en intervalos constantes de tiempo; cuando la velocidad de descenso se vuelve constante se obtiene R1.

Este valor será nuestra tasa de infiltración ya que en el sitio de estudio no existen más de 6 cm de profundidad en el suelo.

#### 6.4.2 Nivel de hidrofobicidad o repelencia al agua

El nivel de hidrofobicidad se determinó por el método de WDTP (Penetration Time a Drop of Water) descrito por Duque *et al.* (2004) (Figura 7). Se colocó una gota de agua en la superficie del suelo y se registró el tiempo, en segundos, que tarda en penetrar completamente el suelo; esta medición se realizó a los 0, 1, 2 y 3 cm de profundidad. Por último se clasificó y se ubicaron los niveles de hidrofobicidad con base al Cuadro 1.



Figura 7. Evaluación de hidrofobicidad (por el método WDTP).

#### 6.4.3 Densidad aparente (DA) y porcentaje de humedad

Se determinó por medio del método del cilindro (Figura 8). Tres muestras en cada sitio fueron colectadas de 0-5 cm de profundidad; posteriormente, en laboratorio se registró el peso inicial (peso húmedo) y peso final (peso seco) para este último las muestras se colocaron en un horno a 105°C, tomando lecturas del peso cada 24 horas hasta que fuera constante. De acuerdo con Guerra y Cruz (2014) se determinó la DA y el porcentaje de humedad con las siguientes formulas:

$$\text{Densidad Aparente (DA)} = \frac{\text{masa del suelo seco (g)}}{\text{volumen total del suelo (cm}^3\text{)}} = (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{Porcentaje de Humedad} = \frac{(\text{peso inicial del suelo} - \text{peso final del suelo})}{\text{masa del suelo seco}} \times 100(\%)$$



Figura 8. Evaluación de densidad aparente por el método del cilindro.

#### **6.4.4 Capacidad de campo**

Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. El método que se utilizó fue de olla y membrana de presión para obtener la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) a una tensión de  $-33\text{kPa}$  y  $-1500\text{kPa}$  respectivamente. La diferencia entre CC y PMP nos da el valor de la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (Soil Survey Staff, 1996)

### **6.5 Evaluación de las propiedades micromorfológicas**

#### **6.5.1 Toma de muestras inalteradas**

En cada sitio de muestreo se colectó de manera aleatoria tres muestras inalteradas del suelo dentro de los primeros 10 cm, para ello se utilizaron cajas tipo Kubiena de  $8 \times 6 \times 4$  cm. Las cajas se colocaron en bolsas de plástico y se selló la parte inferior con cinta adhesiva, mientras que la parte superior se dejó con una burbuja de aire, la cual ayudó a los cambios de presión. Estas se etiquetaron correctamente.

#### **6.5.2 Análisis micromorfológico**

Todas las muestras inalteradas se dejaron secar lentamente a la sombra y luego fueron impregnadas con resina poliéster insaturada y monómero-estireno con una relación 7:3 para su endurecimiento de acuerdo con el método de Murphy (2007). Una vez endurecidas las muestras se cortaron y se colocaron en portaobjetos ( $6 \times 9$  cm) y con la ayuda de diferentes abrasivos de carburo de silicio, las muestras se

pulieron hasta lograr un espesor de 30  $\mu\text{m}$ . Las secciones delgadas se describieron bajo un microscopio petrográfico marca Olympus BX51 con base en el Manual propuesto por Bullock *et al.* (1985) (Figura 9).

### 6.5.3 Análisis de imágenes

Para cada una de las secciones delgadas se obtuvieron 6 fotografías microscópicas a 2x (11.19 x 7.46 mm), para ello se dividió la sección en tres zonas: superior, intermedia y baja, en cada una se tomaron dos fotografías. Las imágenes obtenidas fueron procesadas con el programa Image Pro Plus. Este análisis permitió registrar tipo de estructura, porosidad, tipos de poros (macro, meso y microporos) y presencia de residuos vegetales carbonizados de acuerdo con el sistema de Bullock *et al.* (1999).



Figura 9. Preparación de secciones delgadas: a) las muestras inalteradas se impregnaran con resina b) corte de muestras con disco de punta diamante, c) pulida de muestras, d) muestras pegadas en portaobjetos y se pulen hasta tener un espesor de 30  $\mu\text{m}$  e) análisis de fotomicrografías con Image Pro.

## **6.6 Análisis estadístico de resultados**

Para comparar los resultados de las propiedades hídricas, micromorfológicas y de repoblamiento, se realizó una comparación de medias con el programa SAS a un nivel de significancia de 0.05.

Para relacionar el repoblamiento con las variables de propiedades hídricas, micromorfológicas del suelo se realizó un análisis de regresión múltiple con el paquete estadístico SAS.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Evaluación del repoblamiento de pino piñonero en sitios no afectados y afectados post-incendio

Los bosques NA presentan diferencias en el repoblamiento. En *Pc* este fue mayor en otoño de 2015 con más de 74 % de nuevos individuos, mientras que *Pp* ocurrió lo contrario ya que presentaron mayor repoblamiento en primavera de 2014 y en bosques ASeq el repoblamiento no fue alterado (Figura 10).

En los bosques AIS el repoblamiento fue mayor en primavera (>87 % individuos). En los bosques afectados por incendio de copa el repoblamiento fue bajo o nulo AIC, AICS y AICS (54 años) tal como se puede observar en el Cuadro 3. Por lo que la intensidad de los incendios si afecta el repoblamiento de *Pc*, mientras que la estación afecta entre especies de pinos.

**Cuadro 3.** Repoblamiento de *Pinus cembroides* en sitios no afectados y afectados post-incendio, en el cerro de “La Soledad”, en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

Época	REPOBLAMIENTO	Sitios de muestreo						
		NA ( <i>Pc</i> )	NA ( <i>Pp</i> )	ASeq	AIS	AIC	AICS	AICS (54años)
Primavera 2014	Total de individuos	8	19	8	14	1	0	0
	Ind·m <sup>-2</sup>	0.27	0.63	0.27	0.47	0.03	0	0
	Promedio	0.27	0.63	0.27	0.47	0.03	0	0
	Desv. Est.	± 0.45	± 0.49	± 0.45	± 0.51	± 0.18	0	0
Otoño 2015	Total de individuos	19	5	6	2	0	0	0
	Ind·m <sup>-2</sup>	0.63	0.17	0.2	0.07	0	0	0
	Promedio	0.63	0.17	0.2	0.07	0	0	0
	Desv. Est.	±1.07	±0.38	±0.41	±0.25	0	0	0

\***NA (*Pc*)**= Bosque no afectado de *Pinus cembroides*; **NA (*Pp*)**= Bosque no afectado de *Pinus pinceana*; **ASeq**= Bosque afectado por sequía; **AIS**= Bosque afectado por incendio superficial; **AIC**= Bosque afectado por incendio de copa; **AICS**= Bosque afectado por incendio de copa severo; y **AICS (54años)**= Bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años. (± D.E)= Desviación Estándar.

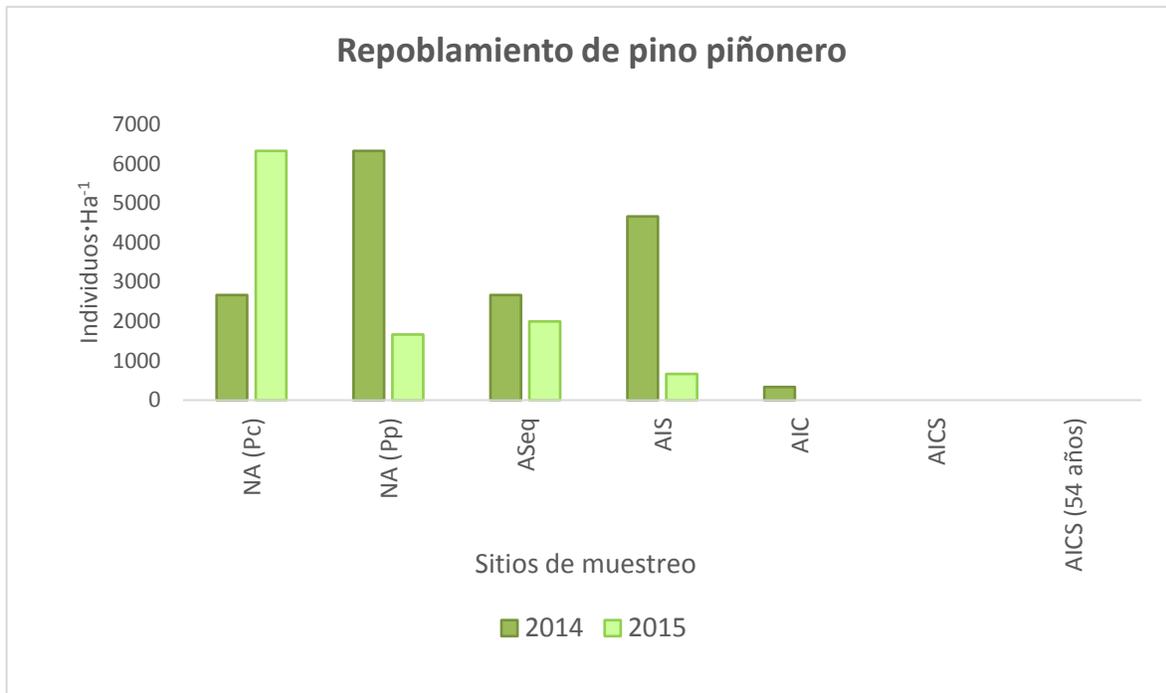


Figura 10. Repoblamiento por hectárea de pino piñonero en sitios afectados y no afectados por incendio.

## 7.2 Efectos del fuego sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo

### 7.2.1 Tasa de Infiltración

Los suelos de los bosques NA tienen un comportamiento diferencial en cuanto a la tasa de infiltración entre especies. En *Pc* se presenta mayor tasa de infiltración (43% más) que los bosques *Pp*. Esta tasa no se incrementa significativamente cuando los bosques de *Pc* son afectados por sequía (Cuadro 4).

En cuando al efecto de los incendios, esta propiedad disminuye significativamente, sólo cuando son muy severos (entre 28 %, 32 % y 35 % en los AIC, AICS y AICS 54 años, respectivamente).

**Cuadro 4.** Tasa de Infiltración en suelos de sitios no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

TASA DE INFILTRACIÓN (mm·h <sup>-1</sup> )		
Sitios	Promedio (± D.E.)	Valores Max-Min
NA ( <i>Pc</i> )	3961 (±2305) <sup>a</sup>	1350 - 7290
NA ( <i>Pp</i> )	2249 (±2491) <sup>a</sup>	360 - 6000
ASeq	4011 (±2129) <sup>b</sup>	720 - 7056
AIS	3788 (±1809) <sup>b</sup>	1980 - 6768
AIC	1403 (±616) <sup>a</sup>	540 - 1890
AICS	1298 (±377) <sup>b</sup>	855 - 1680
AICS (54años)	1097 (±834) <sup>ab</sup>	600 - 2060

\***NA (*Pc*)**= Bosque no afectado de *Pinus cembroides*; **NA (*Pp*)**= Bosque no afectado de *Pinus pinceana*; **ASeq**= Bosque afectado por sequía; **AIS**= Bosque afectado por incendio superficial; **AIC**= Bosque afectado por incendio de copa; **AICS**= Bosque afectado por incendio de copa severo; y **AICS (54años)**= Bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años.

\*\*Letras diferentes en la misma columna, indican diferencias significativas a un nivel de  $p \leq 0.05$ ; (± D.E)= Desviación Estándar.

### 7.2.2 Nivel de hidrofobicidad o repelencia al agua

Los bosques NA registran valores contrastantes (Cuadro 5). En *Pc* la hidrofobicidad es fuertemente repelente (FR) de 0-1 cm y cambia a ligeramente repelente (LR) de 2 a 3 cm; mientras que en *Pp* el comportamiento es inverso. También este comportamiento cambia cuando los bosques de *Pc* son afectados por sequía (ASeq).

La intensidad del incendio solo afectó a la hidrofobicidad cuando este es AIS debido que pasa de FR a NR (no repelente) y en AIC (de FR a LR) en la capa superficial del suelo, mientras que en los demás incendios no hay cambios: AICS y AICS (54 años).

**Cuadro 5.** Hidrofobicidad del suelo en bosques no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

HIDROFOBICIDAD								
Sitios	Profundidad del suelo							
	0 cm		1 cm		2 cm		3 cm	
	Tiempo (s)	Nivel	Tiempo (s)	Nivel	Tiempo (s)	Nivel	Tiempo (s)	Nivel
NA ( <i>Pc</i> )	77 (2-350) <sup>ab</sup>	FR	88 (2-517) <sup>a</sup>	FR	8 (3-15) <sup>a</sup>	LR	10 (3-38) <sup>a</sup>	LR
NA ( <i>Pp</i> )	17 (1-11) <sup>b</sup>	LR	42(1-48) <sup>a</sup>	LR	90 (1-41) <sup>a</sup>	FR	119 (1-7) <sup>a</sup>	FR
ASeq	5 (1-75) <sup>b</sup>	LR	9 (2-150) <sup>a</sup>	LR	7 (1-460) <sup>a</sup>	LR	3 (2-528) <sup>a</sup>	NR
AIS	3 (1-13) <sup>ab</sup>	NR	109 (2-315) <sup>a</sup>	FR	47 (1-210) <sup>a</sup>	LR	30 (1-122) <sup>a</sup>	LR
AIC	6 (3-13) <sup>b</sup>	LR	165 (1-1200) <sup>a</sup>	FR	186 (2-1200) <sup>a</sup>	FR	8 (1-16) <sup>a</sup>	LR
AICS	93 (1-474) <sup>a</sup>	FR	8 (2-13) <sup>a</sup>	LR	9 (2-21) <sup>a</sup>	LR	28 (2-145) <sup>a</sup>	LR
AICS (54 años)	169 (14-282) <sup>b</sup>	FR	-	-	-	-	-	-

\***NA (*Pc*)**= Bosque no afectado de *Pinus cembroides*; **NA (*Pp*)**= Bosque no afectado de *Pinus pinceana*; **ASeq**= Bosque afectado por sequía; **AIS**= Bosque afectado por incendio superficial; **AIC**= Bosque afectado por incendio de copa; **AICS**= Bosque afectado por incendio de copa severo; y **AICS (54años)**= Bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años.

\*\***NR**= No repelente; **LG**= Ligeramente repelente y **FR**= Fuertemente repelente.

\*\*\*Letras diferentes en la misma columna, indican diferencias significativas a un nivel de  $p \leq 0.05$ ; ( )= Máximos y mínimos.

### 7.2.3 Densidad aparente (DA)

Los bosques NA(*Pc*) y NA(*Pp*) muestran una densidad aparente que varió de 0.90 a 0.98 g·cm<sup>-3</sup>. El bosque ASeq, se incrementa significativamente la densidad aparente del suelo (1.22 g·cm<sup>-3</sup>) con respecto al bosque NA(*Pc*); mientras que los incendios no modifican significativamente la densidad aparente del suelo (Cuadro 6).

### 7.2.4 Porcentaje de Humedad

El contenido de humedad de los bosques NA (*Pp* y *Pc*) presentan un porcentaje que varía de 33 a 36 %, respectivamente. Este contenido se incrementa hasta 46 % en bosques afectados por sequía (Cuadro 6).

Los bosques AIS, AIC y AICS no modifican significativamente el porcentaje de humedad del suelo, únicamente los bosques AICS (54 años) reducen significativa el porcentaje de humedad en 6 % (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Densidad aparente, porcentaje de humedad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente en sitios no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

Sitio	Densidad aparente g.cm <sup>-3</sup>	Humedad %	CC %	PMP %	AD %	CRH cm
NA ( <i>Pc</i> )	0.90 (±0.21) <sup>c</sup>	36 (±5) <sup>b</sup>	49	44	5	0.225
NA ( <i>Pp</i> )	0.98 (±0.17) <sup>b</sup>	33 (±3) <sup>d</sup>	50	37	13	0.793
Aseq	1.22 (±0.18) <sup>b</sup>	46 (±4) <sup>bcd</sup>	31	22	9	0.441
AIS	1.03 (±0.12) <sup>bc</sup>	33 (±2) <sup>bc</sup>	47	31	16	0.824
AIC	0.98 (±0.16) <sup>a</sup>	35 (±4) <sup>a</sup>	33	27	6	0.294
AICS	0.97 (±0.08) <sup>b</sup>	36 (±3) <sup>cd</sup>	42	28	14	0.679
AICS (54 años)	1.01 (±0.14) <sup>bc</sup>	33 (±5) <sup>cd</sup>	36	28	8	0.404

\*NA (*Pc*)= Bosque no afectado de *Pinus cembroides*; NA (*Pp*)= Bosque de *Pinus pinceana*; ASeq= Bosque afectado por sequía; AIS= Bosque afectado por incendio superficial; AIC= Bosque afectado por incendio de copa; AICS= Bosque afectado por incendio de copa severo; y AICS (54 años)= Bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años.

\*\*CC= Capacidad de campo, PMP= Punto de marchitez permanente, AD= Agua disponible y CRH= Capacidad de retención de humedad.

\*\*\*Letras diferentes en la misma columna, indican diferencias significativas a un nivel de  $p \leq 0.05$ ; (± D.E)= Desviación Estándar.

### 7.2.5 Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), agua disponible (AD) y capacidad de retención de humedad (CRH)

Los bosques NA (*Pc* y *Pp*) mostraron un % CC similar, sin embargo el % PMP disminuyó en ambos sitios, generando así entre 5 y 13 % de agua disponible para estos bosques. Por otro lado los bosques ASeq registraron el porcentaje más bajo tanto de % CC y % PMP, generando solo 9 % agua útil para las plantas.

Para el caso de los bosques afectados post-incendio se registró lo siguiente:

Los bosques AIS y AICS generan el mayor porcentaje de agua disponible para las plantas, mientras que el % CC se mantiene similar a los bosques de *Pc* pero el % PMP disminuye significativamente. Por otro lado los bosques AIC y AICS (54 años) registraron menor porcentaje agua disponible, de % CC y % PMP (Cuadro 6).

### 7.3 Diagnóstico de las propiedades morfológicas

La toma de sección delgada completa nos muestra una visualización general de como la morfología cambia la estructura del suelo después de los diversas intensidades de incendios.

El bosque NA(*Pc*) presenta suelo erosionado con presencia de vestigio de incendio, los cuales probablemente ocurrieron años atrás, mientras que los NA(*Pp*) presentan gran cantidad de material vegetal con pequeños fragmentos de roca y los bosques ASeq presentan características similares de los dos bosques de piñoneros (Figura 11).

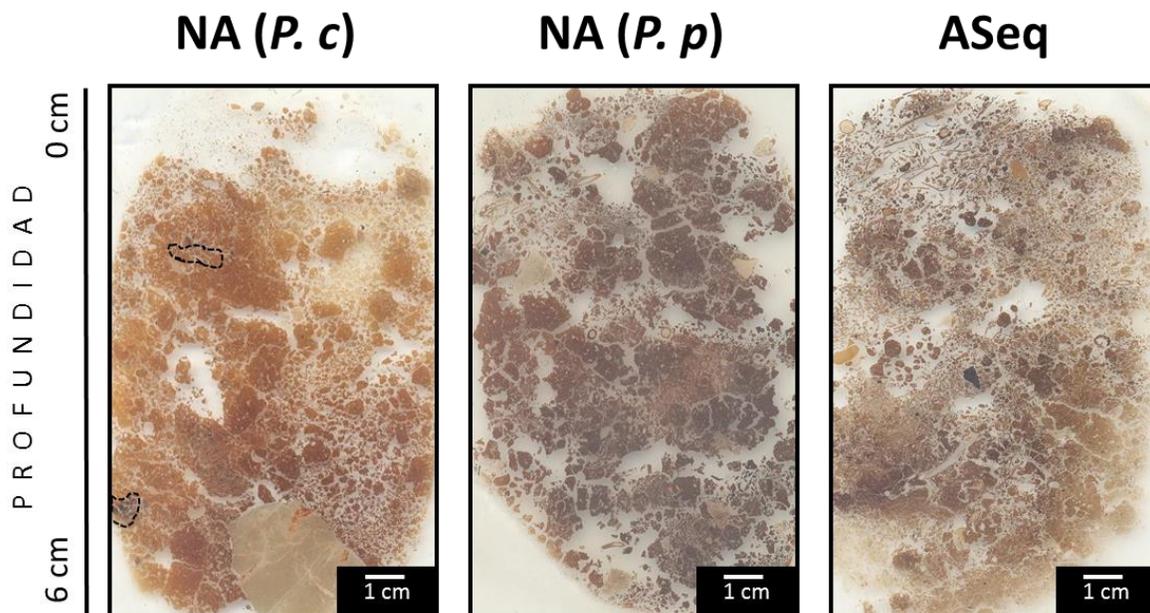


Figura 11. Muestras de secciones delgadas de bosques no afectados de piñoneros y afectados por sequía.

Mientras que las secciones correspondientes a suelos post-incendio presentan vestigios de material carbonizado a diferentes profundidades: los bosques AIS presentan vestigios de material carbonizado hasta los dos primeros centímetros de profundidad, mientras que AIC registran hasta más de cuatro centímetros sin embargo se puede observar que hay mucha actividad biológica y compactación, los AICS generan pequeños manchones de vestigios de material carbonizado en los seis centímetros de profundidad y en los dos últimos centímetros se presenta compactación del suelo, la cual es similar a los bosques de *Pc* (Figura 12).

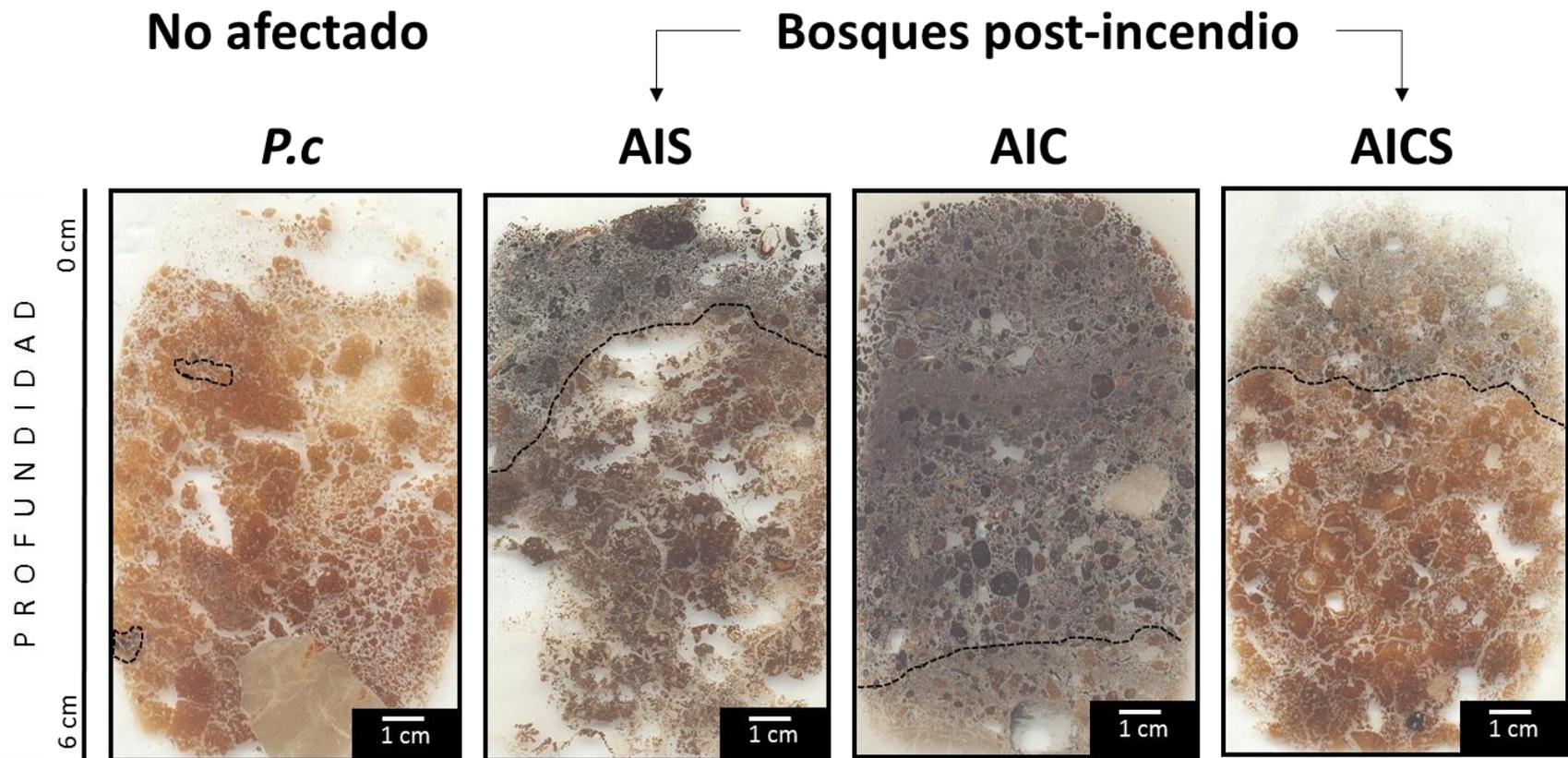


Figura 12. Muestras de secciones delgadas de bosque no afectado de *Pinus cembroides* contra afectados post-incendio (las líneas punteadas indican las fronteras donde se encuentra el materia carbonizado).

De manera más particular las muestras de secciones delgadas nos provén fotomicrografías con las cuales se llevó a cabo una mejor descripción de la morfología del suelo, en estas se aprecia mejor la forma y estructura de poros y agregados (Figuras de la 13 a la 17), las cuales se describen a continuación:

**7.3.1 Tipo de porosidad.** El análisis de porosidad mostró que todos los sitios no afectados y afectados por incendios presentaron poros de empaquetamiento compuesto con diferente proporción; sin embargo, difieren en cuanto a la presencia de otro tipo de poros.

Los bosques NA presentan entre 28 % ( $Pp$ ) y 34 % ( $Pc$ ) de poros de empaquetamiento compuesto; sin embargo, en  $Pc$  hay fisuras (4 %); mientras que en  $Pp$  ocurren poros de empaquetamiento complejo (12 %) como se puede apreciar en el Cuadro 7. En cuanto a la intensidad de los incendios, la porosidad puede disminuir entre 9 y 10 %. En general, el porcentaje de porosidad total en los sitios post-incendio no varía significativamente, con respecto a los bosques NA( $Pc$ ). En los bosques AICS (54años) son los que presentan el porcentaje de porosidad total (51 %) con un 5 % de empaquetamiento complejo (Figura 17).

**7.3.2 Tipo de agregación.** Los bosques NA( $Pc$ ) muestran bloques subangulares (52 %) y los NA( $Pp$ ) estructura migajosa (38 %). En los bosques ASeq se registró una estructura migajosa (50 %) y bloques subangulares (6 %) (Cuadro 7).

Donde se encontraron diferencias en el tipo y tamaño de agregados fue en la intensidad de los incendios. El porcentaje de bloques subangulares disminuye regularmente con forme aumenta la intensidad (de 52 a 9 %, de NA $Pc$  a AICS respectivamente) mientras que se generan los agregados migajosos (de 0 % en NA $Pc$  hasta 37 % en AICS) (Cuadro 7). Esto significa que entre más se incrementa el fuego, los agregados migajosos se van formando.

Los microagregados comienzan a presentarse desde los incendios con menor intensidad (desde 12 % hasta 22 % en AIS y AIC, respectivamente) para después disminuir hasta 16 % en AICS.

En los bosques AICS (54años), la estructura de bloques cambia a microagregados entre granos (50 %). Esto significa que a mayor severidad mayor porcentaje de microagregados, lo que indica que el fuego al incrementar su temperatura en el suelo hizo que los agregados explotaran y formaran microagregados (Cuadro 7).

**7.3.3 Tamaño de poros.** En los suelos de los bosques NA(*Pc*) predominan los macro y microporos mientras que en los bosques NA(*Pp*) los mesoporos son los que registran el mayor valor; mientras que los bosques ASeq presentan bajo porcentaje de macro, meso y microporosidad.

Los bosques AIS, AIC y AICS ocasionan una disminución de macro y microporos pero incrementan los mesoporos (17, 15 y 11 % respectivamente). Los bosques AICS (54años) presentan mayor porcentaje de meso y de macroporos (con 24 y 17 % respectivamente) (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Propiedades micromorfológicas del suelo en sitios no afectados y afectados post-incendio en el cerro de “La Soledad” en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

SITIO	TIPOS DE POROS	PROPIEDADES MICROMORFOLOGICAS				TIPOS DE AGREGADOS	GRADO DE DESARROLLO
		% POROSIDAD (Image Pro)	TAMAÑO DE POROS				
			% MACRO	% MESO	% MICRO		
NA (Pc)	Emp. Compuesto 34% Fisuras dentro de agregados 4%	38 (±12)	15 <sup>ab</sup> (±12) 0 - 37	8 <sup>c</sup> (±4) 1 - 17	15 <sup>a</sup> (±6) 5 - 29	B. Subangulares 52% Granular por excrementos 6% Microagregados alrededor de agregados 3%	F
NA (Pp)	Emp. Compuesto 28% Emp. Complejo 12%	40 (±12)	13 <sup>ab</sup> (±13) 0 - 34	18 <sup>ab</sup> (±7) 9 - 30	9 <sup>b</sup> (±4) 4 - 15	Migajosa 38% Microagregados entre rocas 14% B. Subangulares 6%	F
ASeq	Emp. Compuesto 30% Fisuras dentro de agregados 3%	33 (±10)	12 <sup>b</sup> (±7) 5 - 24	11 <sup>bc</sup> (±5) 7 - 21	10 <sup>b</sup> (±4) 3 - 16	Migajosa 50 % B. Subangulares 6% Granular por excrementos 3%	M-F
AIS	Emp. Compuesto 25% Canales 5% Cavidades 2%	32 (±5)	7 <sup>ab</sup> (±5) 2 - 17	17 <sup>bc</sup> (±8) 7 - 29	8 <sup>b</sup> (±5) 3 - 16	B. subangulares 29% Migajosa 19% Microagregados 12% Granular 6%	F
AIC	Emp. Compuesto 26% Emp. Complejo 7% Cavidades 2%	35 (±13)	9 <sup>ab</sup> (±9) 0 - 31	15 <sup>bc</sup> (±5) 5- 25	11 <sup>b</sup> (±5) 3 - 19	Microagregados 22% Migajosa 22% B. Subangulares 12% Granular por excrementos 6%	F
AICS	Emp. Compuesto 26% Fisuras 7%	33 (±4)	10 <sup>a</sup> (±6) 3 - 25	11 <sup>b</sup> (±5) 5 - 20	11 <sup>b</sup> (±4) 6 - 16	Migajosa 37% Microagregados 16% B. subangulares 9%	F
AICS(54 años)	Emp. Compuesto 46% Emp. Complejo 5%	51 (±17)	17 <sup>ab</sup> (±12) 0 - 31	24 <sup>ab</sup> (±9) 12 - 39	10 <sup>b</sup> (±5) 4 - 19	Microagregados entre granos 50%	F

\*NA (Pc)= Bosque no afectado de *Pinus cembroides*; NA (Pp)= Bosque de *Pinus pinceana*; ASeq= Bosque afectado por sequía AIS= Bosque afectado por incendio superficial; AIC= Bosque afectado por incendio de copa; AICS= Bosque afectado por incendio de copa severo; y AICS (54años)= Bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años.

\*\*Letras diferentes en la misma columna, indican diferencias significativas a un nivel de  $p \leq 0.05$ ; ( $\pm$  D.E)= Desviación Estándar; Máximos y mínimos.

\*\*\*Grados de desarrollo: M-F= De moderado a fuertemente; F= Fuertemente.

## FOTOMICROGRAFIAS DE SUELOS NO AFECTADOS

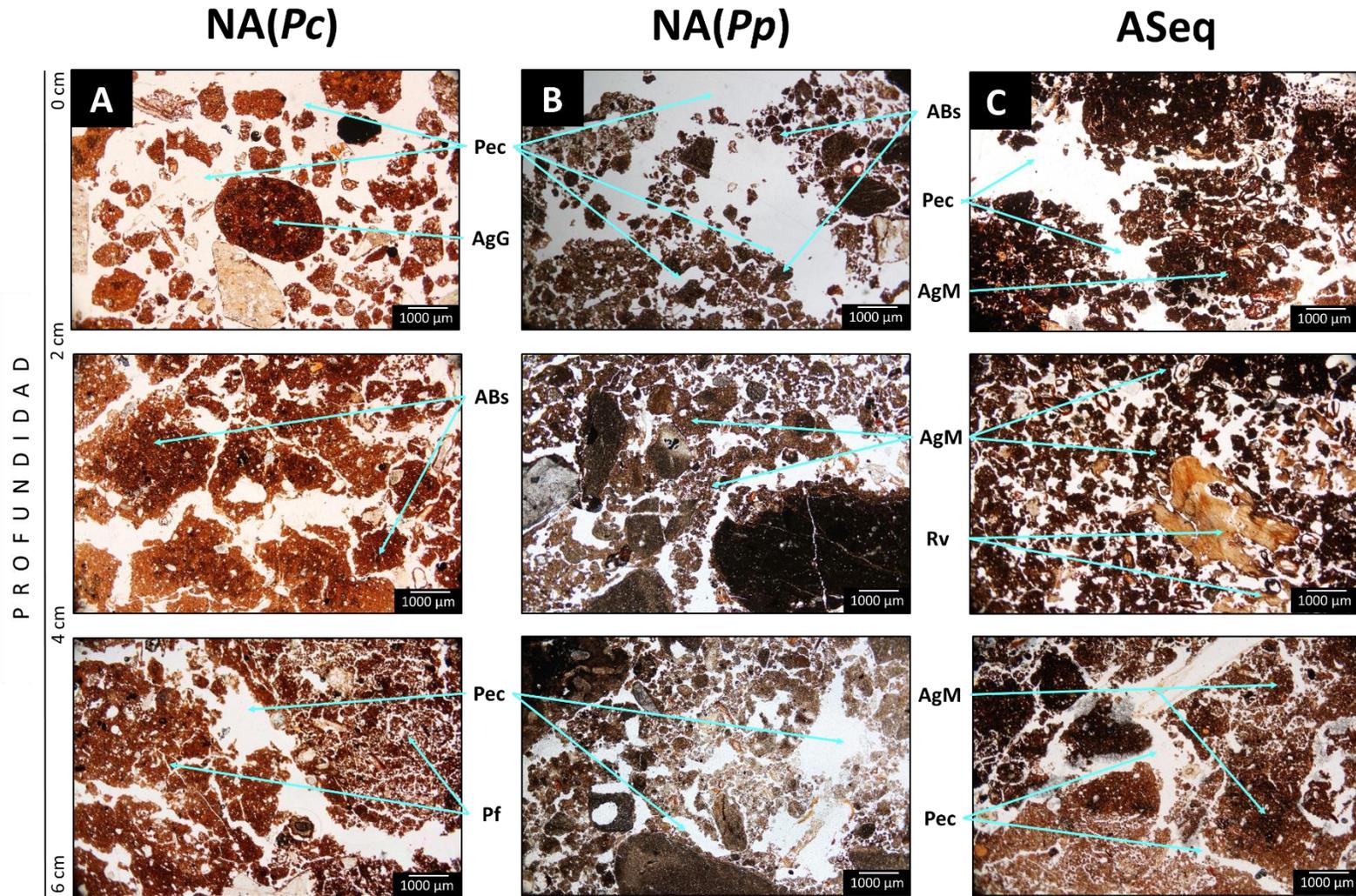


Figura 13. Fotomicrografías de secciones delgadas a diferentes profundidades de A= bosque no afectado de *Pinus cembroides*, B= bosque no afectado de *Pinus pinceana* y C= bosque afectado por sequía. Se muestran poros de empaquetamiento compuesto (Pec) y fisura (Pf). Agregados de tipo granular (AgG), bloques subangulares (ABs), migajosos (AgM) y restos vegetales (Rv) en suelos del cerro de "La Soledad" del Municipio de Cardonal, Hidalgo.

## FOTOMICROGRAFIAS DE SUELOS POST-INCENDIO (*Pc* vs AIS)

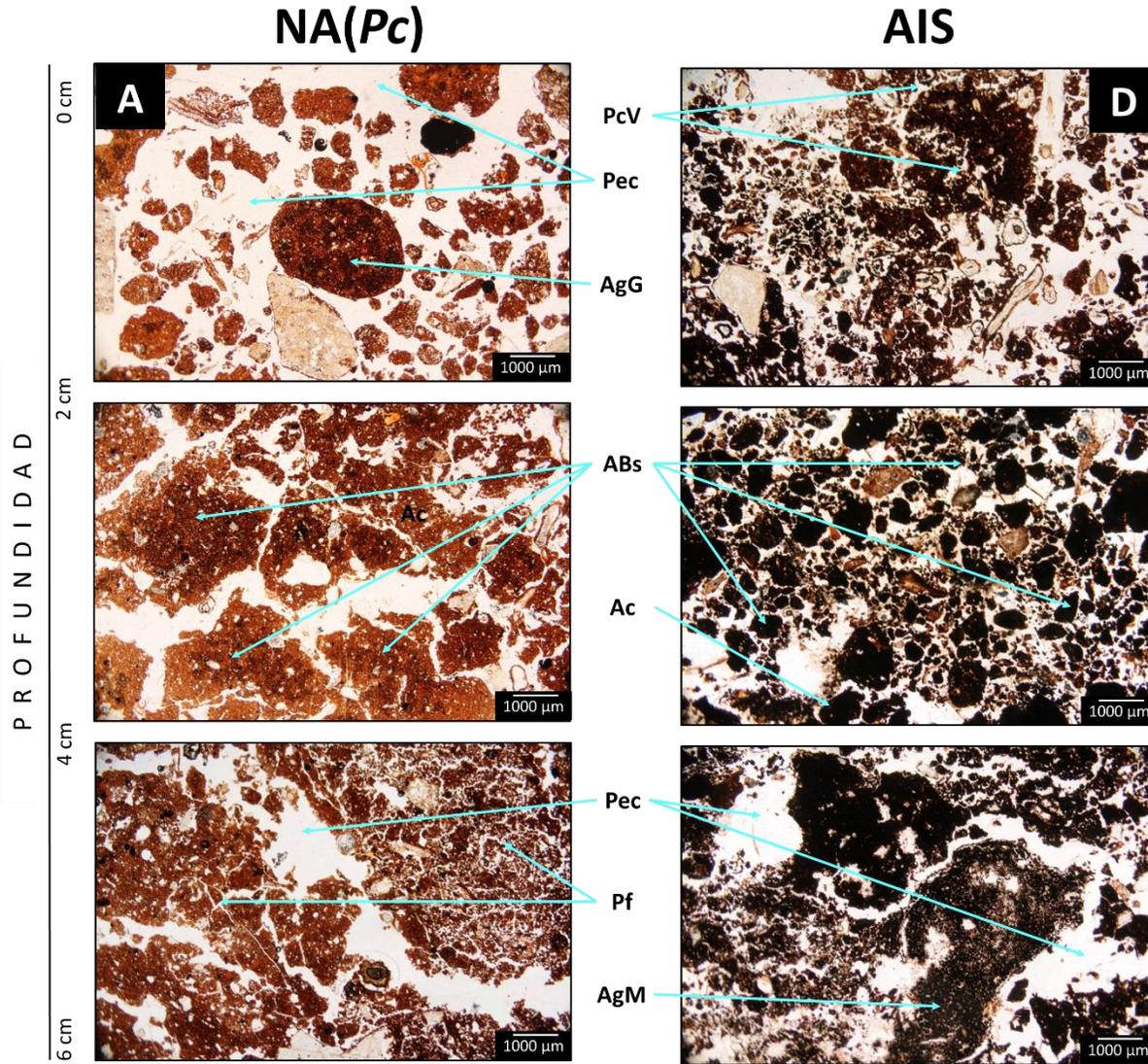


Figura 14. Fotomicrografías de secciones delgadas a diferentes profundidades de A= bosque no afectado de *Pinus cembroides* y D= bosque afectado por incendio superficial. Se muestran poros de empaquetamiento compuesto (Pec), cavidad (PcV) y fisura (Pf). Agregados de tipo bloques subangulares (ABs), migajosos (AgM), granulares (AgG) y agregados carbonizados (Ac) en suelos del cerro “La Soledad” del Municipio de Cardonal, Hidalgo.

## FOTOMICROGRAFIAS DE SUELOS POST-INCENDIO (*Pc* vs AIC)

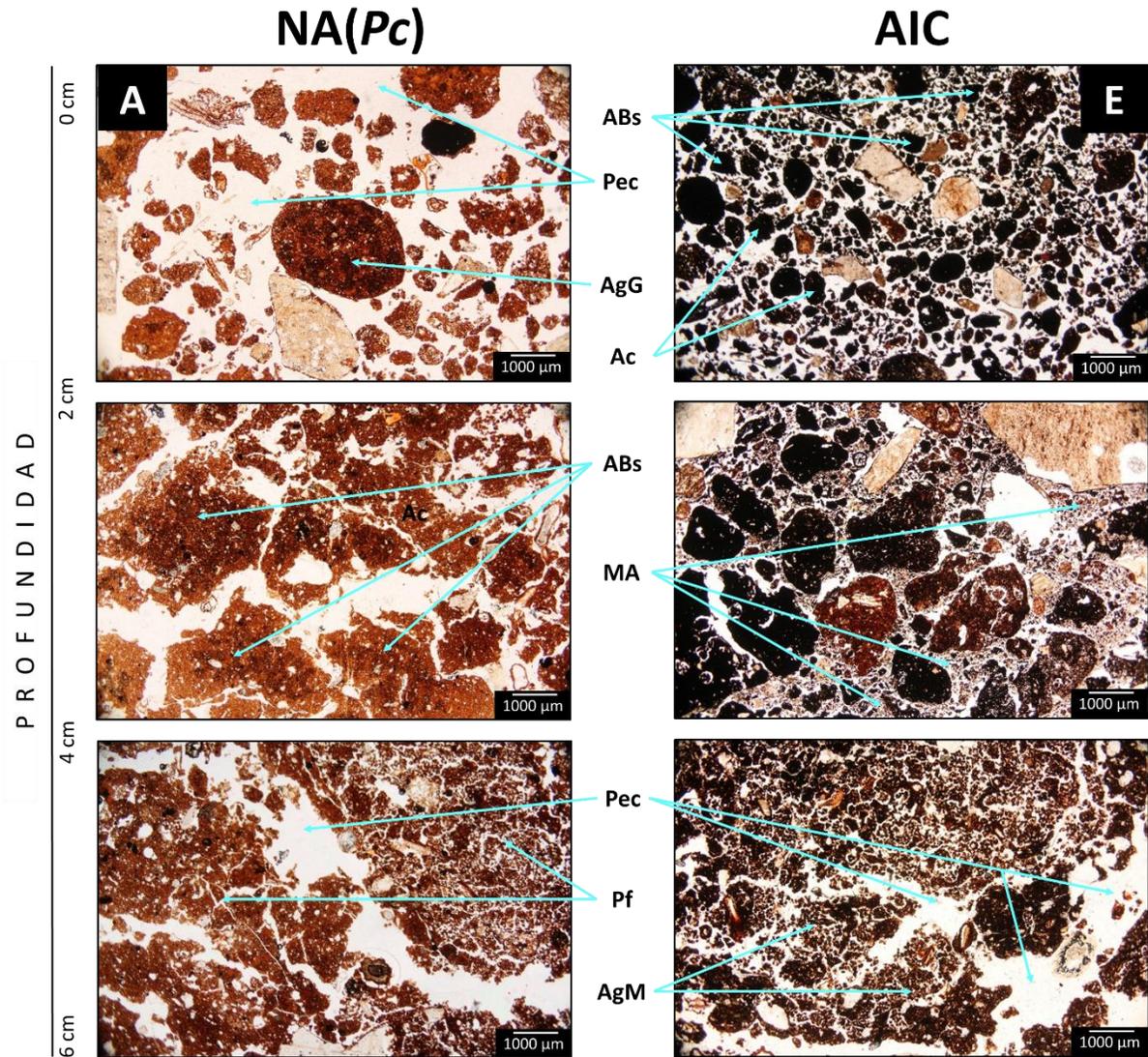


Figura 15. Fotomicrografías de secciones delgadas a diferentes profundidades de A= bosque no afectado de *Pinus cembroides* y E= bosque afectado por incendio de copa. Se muestran poros de empaquetamiento compuesto (Pec) y fisura (Pf). Agregados de tipo bloques subangulares (ABs), migajosos (AgM), granulares (AgG), microagregados (MA) y agregados carbonizados (Ac) en suelos del cerro "La Soledad" del Municipio de Cardonal, Hidalgo.

## FOTOMICROGRAFIAS DE SUELOS POST-INCENDIO (*Pc* vs AICS)

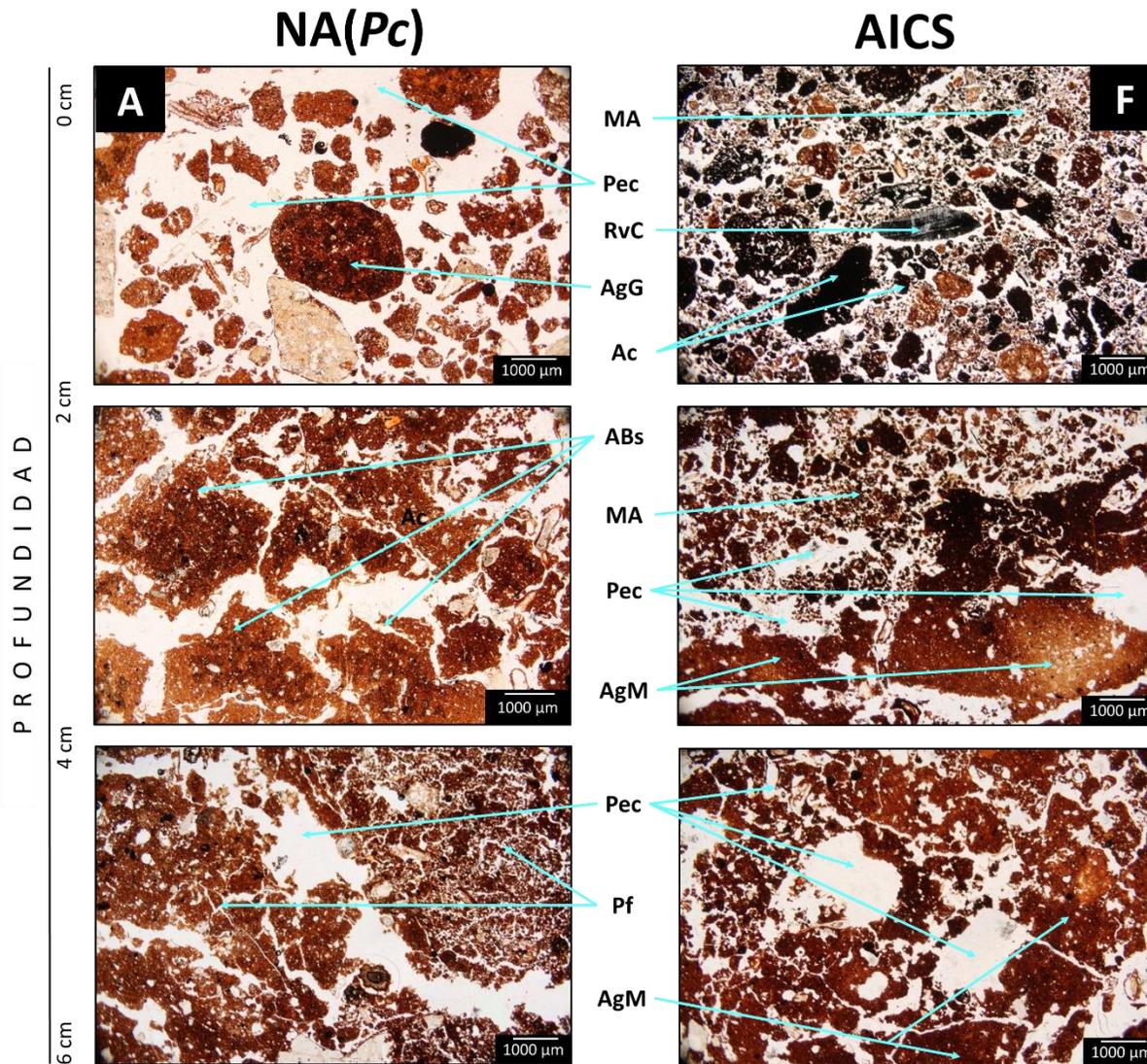


Figura 16. Fotomicrografías de secciones delgadas a diferentes profundidades de A= bosque no afectado de *Pinus cembroides* y F= bosque afectado por incendio de copa severo. Se muestran poros de empaquetamiento compuesto (Pec) y fisura (Pf). Agregados de tipo bloques subangulares (ABs), migajosos (AgM), microagregados (MA), agregados carbonizados (Ac) y restos vegetales carbonizados (RvC) en suelos del cerro "La Soledad" del Municipio de Cardonal, Hidalgo.

## FOTOMICROGRAFIAS DE SUELOS POST-INCENDIO (*Pc* vs AICS 54 años)

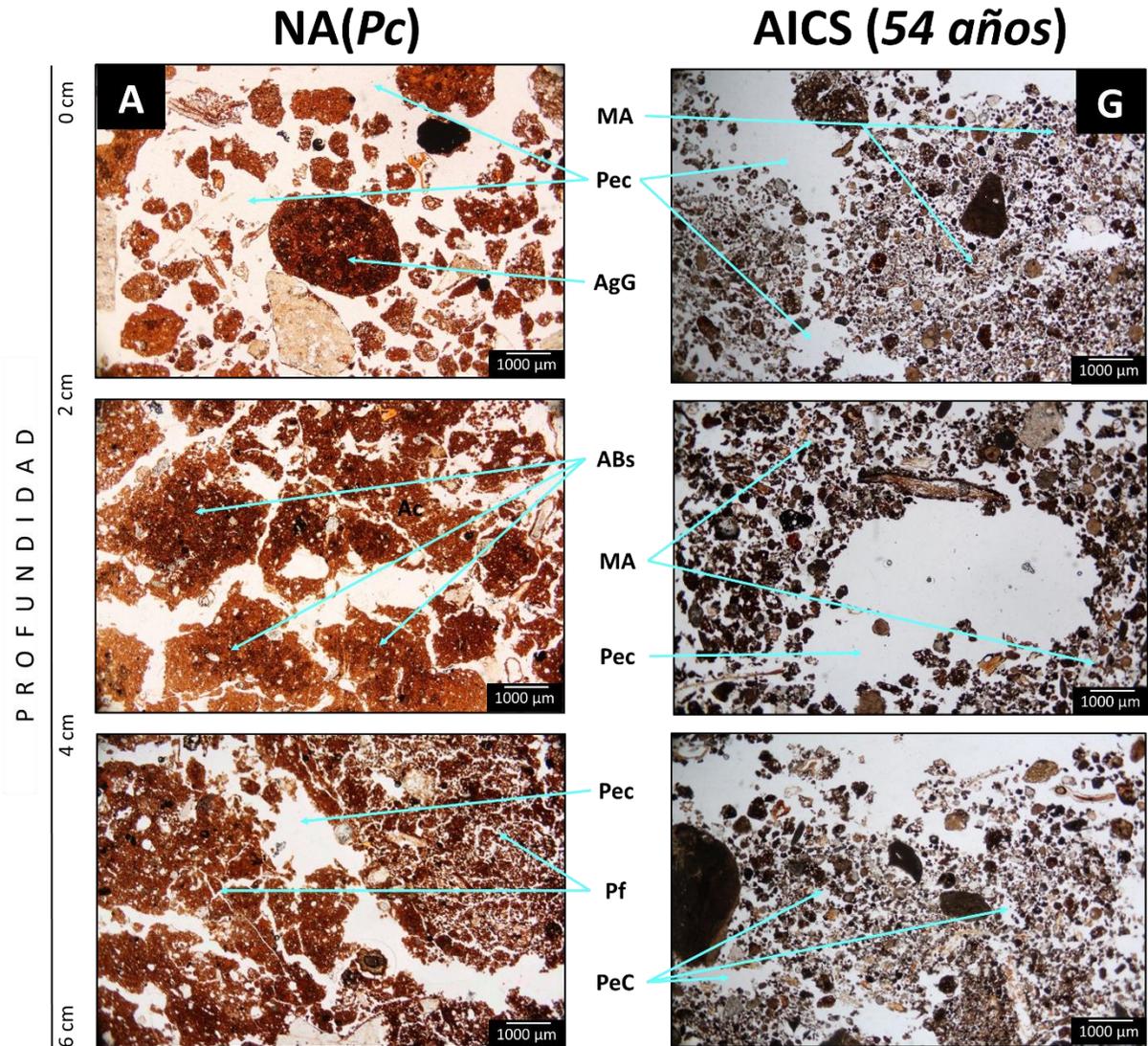


Figura 17 Fotomicrografías de secciones delgadas a diferentes profundidades de A= bosque no afectado de *Pinus cembroides* y G= bosque afectado por incendio de copa severo desde hace 54 años. Se muestran poros de empaquetamiento compuesto (Pec) y empaquetamiento complejo (PeC) y fisuras (Pf). Agregados de tipo granular (AgG), bloques subangulares (ABs) y microagregados (MA) en suelos del cerro "La Soledad" del Municipio de Cardonal, Hidalgo.

## 8. DISCUSION

### 8.1 Repoblamiento en sitios no afectados

El repoblamiento en *Pinus cembroides* en el área de estudio es altamente variable pero continuo en los dos años analizados. El mayor repoblamiento en otoño de 2015 se debió a que en verano de ese mismo año se presentó un año semillero el cual ocasionó un abundante número de plántulas. Ángeles-Cervantes (1984) indica que para que exista repoblamiento de *Pinus cembroides* se necesitan que ocurran heladas en verano (específicamente en la segunda semana de agosto) para comenzar la formación de primordios florales y foliares y así generar nuevas semillas. De esa forma podrán ser consumidas y dispersadas por las aves y a su vez darán vida a nuevas plántulas y por ende habrá un mejor repoblamiento del bosque.

Los bosques *Pinus cembroides* generan entre 2 667 y 6 333 ind·ha<sup>-1</sup>, cifras que se encuentran por encima de lo señalado para otros piñonero. No existen reportes sobre repoblamientos de este tipo de pinos. Los informes que se encontraron están relacionados con otras especies. Díaz *et al.* (2000) registraron para *Pinus lagunae* densidades en tres años distintos, 574, 2 318 y 294 ind·ha<sup>-1</sup> (en 1989, 1993 y 1997 respectivamente); mientras que Christopoulos *et al.* (2014) para *Pinus nigra* registro una densidad media de 0.406 ind·m<sup>-2</sup> (4 060 ind·ha<sup>-1</sup>). En otras especies de pino, Estrada (1997) encontró una densidad promedio de 4 208 ind·ha<sup>-1</sup>.

En el caso del repoblamiento de *Pinus pinceana* presentó un comportamiento irregular de un año a otro. Hampe y Arroyo (2002) mencionan que la densidad de la regeneración puede ser el resultado de la dispersión de semillas la cual está regulada por factores abióticos como el flujo elevado de las lluvias de invierno. En el área de estudio se presentan condiciones microclimáticas por la ocurrencia de barrancas y ríos que modifican la humedad del ambiente, aparte de pendientes pronunciada y lluvias torrenciales que arrastran las semillas a las partes bajas. Además, la fuerte hidrofobicidad del suelo puede ser otro factor que contribuya a la pérdida de las semillas que fueron dispersadas.

En bosques que tienen una sequía prolongada (ASeq), la fuente proveedora de semillas está muerta, por lo que el repoblamiento depende de la dispersión de semillas por aves. Al respecto se han identificado cuatro especies de córvidos que las dispersan *Nucifraga columbiana*, *Gymnorhinus cyanocephala*, *Aphelocoma coerulescens* y *Cyanocitta stelleri* (Gottfried, 1986). De estas Ángeles-Cervantes, (1984). Registró a *A. ultramarina* y *C. stelleri* en la zona de estudio.

Después de la dispersión, las aves se alimentan de estas semillas y las que escapan a la depredación son las que logran germinar y por esta razón el repoblamiento se mantiene relativamente constante y es similar al de los bosques NA(*Pc*). Esto quiere decir que los bosques de *Pc* son capaces de soportar sequías, lo que coincide con lo reportado por la CONABIO (2000) donde menciona que estos pinos son resistentes a heladas y sequías. En Sudáfrica esta especie ha probado su extrema resistencia a la sequía llegando a tolerar hasta 7 u 8 meses de sequía. (Goor y Barney, 1968).

## **8.2 Repoblamiento en sitios post-incendio**

De acuerdo con la literatura, los incendios juegan un papel dual, es decir pueden ser perjudiciales o destructivos para el desarrollo y permanencia de bosques de pino pues impiden su regeneración, o bien pueden ser constructivos cuando los incendios favorecen la reproducción y el repoblamiento del bosque en general (Shvidenko y Nilsson, 2000). Sin embargo, no explican los factores que determinan la ocurrencia de uno u otro.

Este estudio muestra que la intensidad de los incendios está relacionado con el efecto dual y por lo tanto con el repoblamiento de los bosques de *Pc*. Los incendios constructivos son de baja intensidad (bosques AIS), ya que generan el mayor repoblamiento de plántulas (con 4 667 ind·ha<sup>-1</sup>); mientras que los incendios de mayor intensidad (AIC, AICS y AICS-54 años) generan un impacto negativo.

Este comportamiento está relacionado a que *Pc* son poco tolerantes a los incendios de baja intensidad (Brown y Smith, 2000). Se ha mencionado que en incendios de intensidades muy altas matan a las plántulas y a los árboles jóvenes de piñón (Covington y DeBano, 1990) generando un bajo o nulo repoblamiento.

*P. cembroides* no registro repoblamiento en zonas afectadas por incendios de alta intensidad, lo cual es semejante a *Pinus nigra*, al respecto Christopoulos *et al.* (2014) registraron en incendios de alta intensidad una regeneración nula con una densidad media de 0.007 individuos·m<sup>2</sup> (70 ind·ha<sup>-1</sup>). En otras especies, ocurre lo contrario; por ejemplo, en *Pinus yunnan* el incendio moderado activa la regeneración hasta de ~10<sup>5</sup> ind·ha<sup>-1</sup> (Han *et al.*, 2015) y en *Pinus yunnanensis* bajo incendios de alta severidad se genera un gran número de plántulas 7 431 plántulas·ha<sup>-1</sup> (Tang *et al.*, 2013).

Esto significa que cada especie presenta una tolerancia distinta y en el caso de *Pc* se debe de generar estrategias para limitar los incendios o bien generar prácticas para que el bosque se re-establezca como las planteadas por Aviña-Hernández (2015). Esta autora plantea la formación de agregados que a su vez modificarán el contenido de humedad a través del uso de hidróxidos de K y Al.

Cabe mencionar que *Pc* no posee conos serotinos que les permita soportar altas temperaturas para alcanzar una regeneración natural post-incendio y son especies muy resinosas y por lo tanto muy flamables (Teobaldo, 1997).

### **8.3 Propiedades hídricas y físicas del suelo**

#### **8.3.1 Tasa de infiltración**

En los sitios NA (*Pc* y *Pp*) la tasa de infiltración registrada es mayor a los sitios afectados post-incendio; esto se debe a la presencia de macroporos, los cuales son poros de transmisión (Vandenbygaard, *et.al.*, 1999); es decir, poros que se encargan de drenar el agua al subsuelo. Además de la textura arcilla arenosa de estos suelos que permite que el agua se infiltre más rápidamente porque poseen mayor espacio poroso (Pape y Lager, 1995).

Esto coincide con lo reportado por Ángeles-Cervantes (2010), quien menciona que los bosques no afectados y que poseen grandes cantidad de árboles tienen las tasas de infiltración más altas, ya que las raíces de los arboles ayudan a crear un mayor espacio porosos en el suelo. Aviña-Hernández (2015), reporta que en bosques de coníferas la tasa de infiltración superficial puede ser hasta de 504 mm·h<sup>-1</sup>, la cual es considerada como muy rápida.

Con incendios de diferentes intensidades (AIC, AICS y AICS 54años), la tasa de infiltración disminuye significativamente. Cerda *et al.* (2009) mencionan que este fenómeno se debe tanto al efecto del calentamiento del suelo como a la pérdida de cubierta vegetal, lo cual a su vez puede generar procesos de erosión y cambian las condiciones edáficas. En secciones delgadas se observó que el porcentaje de macroporos disminuye (un 5 %), lo que genera una mayor escorrentía. Lo cual coincide con lo reportado por Ángeles-Cervantes (2010) quien encontró tasas de infiltración bajas para los incendios de baja, moderada y alta intensidad debido a que aumentan los macroporos.

### **8.3.2 Nivel de hidrofobicidad o repelencia al agua**

La hidrofobicidad en los bosques NA(*Pc*) es FR en los primeros centímetros del suelo, esto se debe a que estos bosques, además de presentar materia orgánica muerta o en descomposición, producen sustancias cerosas como resinas de los mismos pinos (Zavala *et al.*, 2014; Tesler *et al.*, 2008), mientras que a mayor profundidad del suelo la hidrofobicidad disminuyó (LR), lo que se atribuye a que los componentes de las resinas se encuentran más degradados. Este comportamiento, ha sido reportado también por Tesler *et al.* (2008) en suelo con vegetación de *Pc*. En otros bosques de coníferas en Alemania se reporta una repelencia promedio de 230 s (clasificada como FR) (Butzen *et al.*, 2015) y en España Zavala *et al.* (2014) de 3 777 s, esto significa una repelencia extrema (ER).

Sin embargo, en bosques NA(*Pp*) esta propiedad tiene un comportamiento inverso; es decir, es LR en la superficie y aumenta con la profundidad del suelo a FR, esto puede deberse a que la pendiente es mayor (65°) y hay menor acumulación de hojarasca (5 cm) que la de los bosques de *Pc*.

En el caso de los bosques ASeq son suelo que van de LR a NR, lo cual ayuda a que el repoblamiento en estos sitios sea variable y no disminuya anualmente. La hidrofobicidad disminuyó en este sitio porque al perder hojas se genera mayor T° en el suelo durante el día y menor T° en la noche, este proceso

ocasiona una mayor degradación de las resinas y por lo tanto una menor hidrofobicidad.

En bosques afectados post-incendio, la hidrofobicidad superficial disminuyó drásticamente en bosques AIS y AIC, al cambiar de FR a NR y LR respectivamente, estos incendios son capaces de registrar temperaturas superficiales de 250° para incendios de baja intensidad y de 400° para incendios de intensidad moderada (Neary *et.al.*, 1999): estas temperaturas son capaces de destruir sustancias responsables de la hidrofobicidad, ya que según lo reportado por DeBano (2000) se necesitan temperaturas entre 280 y 400°C y Doerr y Thomas (2000) reporta entre 260 y 340°C.

### **8.3.3 Densidad aparente (DA) y porcentaje de humedad**

La densidad aparente no se ve modificada en los bosques NA (*Pc* y *Pp*) (0.90 y 0.98 g·cm<sup>-3</sup>), sin embargo, otros autores registran en bosques de pino una DA de 0.67 g·cm<sup>-3</sup> en zona no afectada por incendio, menor que las registradas en este estudio. Esto indica que los bosques de *Pc* y *Pp* tienen suelos con un buen espacio porosos (ya que generan 38 y 40 % de porosidad total respectivamente), están bien aireados, presentan un buen drenaje y una buena penetración de raíces de acuerdo a lo mencionado por Rubio (2010). Aparte estos bosques muestran los más altos % de humedad (35 y 30 %) que favorecen el repoblamiento al tener suficiente agua disponible. Mientras que en los bosques ASeq la DA se incrementa significativamente (1.22 g·cm<sup>-3</sup>), esto debido a que las raíces muertas de los arboles generan un mayor espacio poroso. El fuego tampoco afecta esta propiedad ya que generan valores similares de espacio poroso.

Las DA registradas en este estudio se encuentran por encima de los reportados por Thomas *et al.* (1999) quienes reportaron en Leptosoles úmbrico, bajo bosque de pino una DA de 0.63 g·cm<sup>-3</sup> en zonas afectadas por incendio. En otros suelos, la DA si está relacionada con la intensidad de los incendios. Al respecto, Ángeles-Cervantes (2010) encontró que la DA se incrementa en

bosques AIS y se reduce en bosques AIC (0.81 y 0.52 g·cm<sup>-3</sup>, respectivamente) presentando diferencias significativas entre ellos.

#### **8.3.4 Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), agua disponible (AD) y capacidad de retención de humedad (CRH)**

Los bosques NA (*Pc* y *Pp*) presentan la misma capacidad de retención de agua (hasta 50 %); sin embargo, hay mayor agua disponible en los bosques de *Pp* (13 %) debido a la presencia de microporos y mesoporos. Los mesoporos favorecen el repoblamiento de las plantas, ya que estos poros sirven para almacenar agua (Pagliai *et al.*, 1987).

En el caso de los bosques ASeq, la capacidad de la retención de agua es menor (31 %) así como el agua el agua disponible (9 %) para las plantas y está relacionada a la granulometría del suelo ya que dominan una textura areno arcilloso. Además, hay poca hojarasca y los colores son claros que indican que tienen bajo contenido de materia orgánica.

Los bosques afectados post-incendio aumentan el porcentaje de agua disponible para las plantas sobretodos en los AIS (16 %) y AICS (14 %). Esto se debe al incremento de mesoporos (17 %) o bien a una alta heterogeneidad de tipos y tamaños de poros (10 % de macro, 11 % de meso y 11% de microporosidad).

### **8.4 Diagnóstico de las propiedades micromorfológicas**

#### **8.4.1 Tipo de poros y agregados**

En la actualidad, esta técnica no es muy conocida en nuestro país; sin embargo, provee de grandes conocimientos sobre la formación y estructuración del suelo. Los datos encontrados en esta investigación, muestran que los bosques NA (*Pc* y *Pp*) así como los ASeq son suelo que presenta una misma estructura. Los agregados dominantes son migajosos y bloques subangulares que están relacionados directamente con la actividad biología y a su vez estos permiten un buen movimiento y penetración del agua (Pape y Lagger, 1995; Brady y Weil, 2010). En menor cantidad se presentan los agregados granulares los cuales de

igual manera están asociados con la actividad biológica, las raíces de las plantas y las madrigueras de los animales, y estos permiten que haya una buena entrada y circulación del agua y del aire (Vandenbygaard *et al.*, 1999), esta estructura es considerada como la ideal en suelos de bosque de coníferas.

En cuanto a la porosidad de los boques NA (*Pc* y *Pp*) predominan los poros de empaquetamiento compuesto. Estos son poros permanentes que almacenan el agua y la retienen con más fuerza (Bronick y Lal, 2005). Además se observaron fisuras las cuales son huecos intercomunicados que no son estables ni continuos por lo que son poros no permeables (Bullock *et al.*, 1999)

Los boques NA (*Pc* y *Pp*) son suelos que están fuertemente desarrollados, es decir, los agregados se encuentran bien formados, bien diferenciados, son duraderos y están completamente rodeados por poros, mientras que los ASeq van de moderados a fuertemente desarrollados, lo que significa que, de igual manera son agregados que si están bien formado y se pueden diferenciar pero su duración es moderada (Bullock *et al.*, 1999).

En el caso de los bosques afectados post-incendio, la estructura del suelo cambian completamente, ya que al ser sometido a tan altas temperatura explotan y se genera una gran cantidad de microagregados. Estos permitirán que haya un buen flujo de agua y generaran aumento en los mesoporos que ayudaran a almacenaran el agua necesaria para las plantas (Pagliai *et al.*, 1987). Lo anterior coincide con lo reportado por Velasco y Úbeda, (2014) quienes mencionan que los incendios muy intensos, llegan a destruir o fraccionar los agregados. Asimismo, esto coincide con lo mencionado por Stoops (2007) quien reporta que los incendios al incrementar su temperatura, generan abundancia de fragmentos de agregados, es decir, el aire atrapado en los poros dentro de los macroagregados se expande, crea micro-explosiones y los fragmenta incrementan el espacio poroso total.

Los tipos de poros predominantes son los de empaquetamiento compuesto mismo que se presentan en los bosques no afectados, sin embargo, en los bosques AIS y AIC se presentan en menor cantidad poros de tipo cavidad, los cuales son poros que no separan a los agregados, más bien estos se encuentran

unidos y son irregulares, son poros que normalmente no se conectan entre sí, no son estables (Bullock *et al.*, 1999), y son formados por microorganismos, hormigas, termitas etc (Bronick y Lal, 2005).

Los incendios de hace 54 años generaran microagregados entre granos (en un 50 %), los cuales ayudan a la estabilidad de la estructura del suelo, ya que estos son más estables al humedecimiento (Tisdall y Oades, 1982). Por otra parte Pérez *et.al.* (2009) consideran que el fuego disminuye la formación de macroagregados y como consecuencia se incrementa el número de microagregados, los cuales se disgregan debido a que se produce una pérdida de materiales agregantes de origen orgánico, por la combustión (De Bano, 2000), generando a su vez una gran cantidad de mesoporos (Ubeda, 2001). El incremento de los mesoporos significa que estos bosques, después de más de 54 años del incendio, poseen una buena estructura del suelo ya que sus poros de empaquetamiento compuesto y complejo almacenan bien el agua y puede ser usada por las plantas. Sin embargo, no ha podido recuperar su vegetación, ya que actualmente domina la vegetación de *Florenxia resinosa* y *Dalea bicolor* (Pompa-Castillo, 2015).

#### **8.4.2 Tipos de poros (macro, meso y microporosidad)**

Los bosques NA(*Pc*) generan mayor número de macro y microporosidad esto significa que permiten drenar el agua al suelo y otros retiene el agua pero las plantas no la pueden extraer (Pagliai *et al.*, 1987). En el caso de los NA(*Pp*) presentan más mesoporos, es decir, poros que les permitían retener una buena cantidad y por ende habrá agua necesaria para las plantas. Los bosque ASeq presentan la misma cantidad de macro, meso y microporosidad lo que significa que existe la misma probabilidad de que el agua se retenga o se infiltre debido a esto el repoblamiento en estos bosques es similar en los dos años de muestreo.

En los sitios afectados post-incendios se incrementen los mesoporos, en los cuales se almacena el agua aprovechable, que no es otra cosa que la solución nutritiva del suelo, la cual es absorbida por las raíces de las plantas para cumplir sus funciones de transpiración y de nutrición (Amézquita, 1994 y Orozco, 1991).

## 9. CONCLUSIONES

- Los bosques no afectados de *Pinus cembroides* presentan un repoblamiento continuo.
- Los bosques de *Pinus cembroides* afectados por sequías presentan repoblamiento y por lo tanto pueden renovarse.
- Los incendios de copa, copa severo presentan capas altamente hidrófobas, mientras que la tasas de infiltración y la retención de humedad son reducidas y no favorecen la supervivencia de plántulas de *P. cembroides*.
- El sitio afectado por incendio hace 54 años no registró repoblamiento.
- Los incendios superficiales favorecen el repoblamiento y no afectan las propiedades hídricas pero modifican la estructura del suelo.

## 10. LITERATURA CITADA

- Amézquita. E. (1981). A study of the water regime of a soil during approach to field capacity and permanent wilting point. University of Reading. U.K. 244p. (Ph. D. Thesis).
- Ángeles-Cervantes E. (1984). Producción de semillas en un piñonar del Estado de Hidalgo. México. Tesis de Licenciatura. UNAM. FES- Zaragoza. 60 pp.
- Ángeles-Cervantes E. (2010). Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de Oyamel. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Aviña-Hernández R. J. (2015). Tratamientos mineralógicos para incrementar el éxito de reforestación con *Pinus cembroides* y otras coníferas. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. D.F. México.
- Beghin R., E. Lingua, M. Garbarino, M. Lonati, G. Bovio, R. Motta y R. Marzano. (2010). *Pinus sylvestris* forest regeneration under different post-fire restoration practices in the northwestern Italian Alps. *Ecological Engineering*. 36:1365-1372.
- Brady N. C y Weil R. R. (2010). Elements of the nature and properties of soil. 3rd Edition. Pearson AG. Cornell University Raymond R. Weil.
- Bronick C.J. y Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124 (2005) 3 – 22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- Brown, J. K. y Smith J. K. (2000). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 2. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 257 p.
- Bullock P., A. Jongerius, T. Tursina, N. Fedoroff, y G. Stoops. (1985). Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad, al español (1999) por Ma. C. Gutiérrez C. y C.A. Ortiz S. 1ª edición. Colegio de Posgraduados. Texcoco, Estado de México. 154 pp.
- Butzen V., Seeger M., Marruedo A., De Jonge L., Wengel R., Ries J. y Casper M. (2015). Water repellency under coniferous and deciduous forest— Experimental assessment and impact on overland flow, *Catena*. 133: 255-265.
- Carballas F. T. (2003). Los incendios forestales. En T. Carballas Fernandez (Ed. 1ª). Los incendios forestales en Galicia (pp 365-415). España. Editorial, Xunta de Galicia.
- Castro S.S., M. Cooper, M.C. Santos y V. P. Torrado. (2003). Micromorfología do Solo: Bases e Aplicações. *Típicos Ci. Solo*, 3:107-164.
- Cerda A. B. Bodí M., Lasanta T., Mataix-Solera J. y H. Doerr S. (2009). Infiltración, estabilidad de agregados y erosión de suelos afectados por incendios forestales. Una visión a escala de pedón Soil Erosion and Degradation Research Group – SEDER, Valencia.

- Christopoulos A., M. Nikolaos, A. Pavlos, K. Nikos, G. Panayiotis, Dimitrakopoulos y A. Margarita. (2014). Post-fire regeneration patterns of *Pinus nigra* in a recently burned area in Mount Taygetos, Southern Greece: The role of unburned forest patches. *Forest Ecology and Management* 327:148–156.
- CONABIO. (2000). *Pinus cembroides*. Por Goor, A. y Barney C. W. (1968).
- CONAFOR. (2008). 3ª Edición. Incendios Forestales. Ed. Violeta Ramos Radilla. Comisión Nacional Forestal. 47 pp.
- CONAFOR. (2010). Incendios forestales guía práctica para comunicadores. México. Comisión Nacional Forestal. México. Pp. 56.
- CONAFOR. (2015). Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2015.
- Covington, W. W., y DeBano, L. F. (1990). Effects of fire on pinyon-juniper soils. In *General Technical Report - US Department of Agriculture, Forest Service*. (RM-191 ed., pp. 78-86).
- Crotteau J. S., J. Varner III, Morgan y M. W. Ritchie. (2012). Post-fire regeneration across a fire severity gradient in the southern Cascades. *Forest Ecology and Management*. 287:103-112.
- De León-Morales E. (2010). Factores que influyen en la producción de piñon de *Pinus cembroides* Zucc. Título de Ingeniería Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, Mexico.
- DeBano L. F. (1981). Water repellent soil: a state of the art. USDA. Forest Service Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. *General Technical Report PSW California*. Vol, 46. 21 pp.
- DeBano L. F. (1989). Effects of fire on Chaparral soils in Arizona and California and postfire management implications. En: Berg N. Coord. Proceedings of the symposium on fire and watershed management. USDA forest Service Pacific Southwest. Forest and Range Experimental Station. General Technical Report PSW. Vol, 109. pp 55-62.
- DeBano, L. F. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. En: *Journal of Hydrology*. Vol. 31, No. 232. p. 4-32.
- Díaz D., R. F. Lloret, y F. X. Pons. (2004). Temporal patterns of fire regime in Catalonia (NE Spain) along the last quarter of century (1975-98). *International Journal Wildland Fire*. 13: 89-99.
- Díaz S., C. Mercado y S. A. Cardenas. (2000). Structure and population dynamics of *Pinus lagunae* M.-F. Passini. *Forest Ecology and Management*. 134:249-256.

- Dodson E. K. y Root H. T. (2013). Conifer regeneration following stand-replacing wildfire varies along an elevation gradient in a *Pine Ponderosa* forest, Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*. 302:163-170.
- Doerr, S. H. y Thomas, A. D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. En: *Journal of Hydrology*. Nos. 231/232; p. 134-147.
- Duque Z. J. R., M. S. P Arbeláez, J. D. F. Jaramillo y P. J.D León. (2004). Hidrofobicidad en Andisoles bajo roble ( *Quercus humboldtii* ) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada piedra blancas (Medellín, Colombia). Facultad de Ciencias Agropecuarias de Colombia.
- Estarada-Márquez C. (1997). Evaluación de la regeneración natural en bosques de pino de la UCODEFO No. 4 de Durango, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León.
- Fady B., S. Fineschi y G.G. Vendramin. (2008). EUFORGEN, Guía técnica para la conservación genética y utilización del pino piñonero (*Pinus pinea*). 8 pp.
- Fitzpatrick E. A. (1993). Suelos: su formación, clasificación y distribución. Ed. Continental. México.
- Flores L. y J. Alcalá. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de suelos, Instituto de Geología. UNAM. México. 56 pp.
- Fox D. M., R. B. Bryan y C. A. Fox. (2004). Changes on pore characteristics with depth for structural crusts. *Geoderma*. Núm, 120. 109-120 pp.
- González P. O., Andreu V., Campo J., Gimeno G. E. y Rubio J. L. (2006). Hydrological properties of a Mediterranean soil burned with different fire intensities. *Catena*. 68: 186-193.
- González-Romero O. G. 2005. Variación morfológica de conos y semillas de cinco procedencias de *Pinus cembroides* Zucc en Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Agropecuarias.
- Gottfried G. J. (1986). Regeneration of pinyon. Paper presented at the pinyon-juniper conference, Reno, NV, January 13-16.
- Guerra H. E y Cruz F. G. (2014). Métodos de evaluación y diagnóstico para agua y suelo, FES Zaragoza, UNAM. México.
- Gutiérrez C. Ma. C. y Ortiz S. C. A. (traductores). (1999). Manual para la Descripción Micromorfológica de Suelos. Primera edición en español. Colegio de Posgraduados Montecillo. México.
- Hampe, A. y J. Arroyo. (2002). Recruitment and regeneration in populations of an endangered South Iberian Tertiary relict tree. *Biological Conservation* 107: 263-271.

- Han J., S. Zehao, Y. Lingxiao, L. Guixiang y C. Anping. (2015). Early post-fire regeneration of a fire-prone subtropical mixed *Yunnan Pine* forest in Southwest China: Effects of pre-fire vegetation, fire severity and topographic factors. *Forest Ecology and Management*. 356:31-40.
- Harden C. y P. Scruggs. (2003) Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*. Núm, 55. 5-24 pp.
- Hardy C. C., Bunnell D. L., Menakis J. P., Schmidt K. M. y Hann W. J. (2002). Development of Coarse-scale spatial data for wildland fire and fuel management. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fire Sciences Laboratory. 41 pp.
- INEGI. (1983). Carta edafológica de Pachuca. Escala 1:250 000. México.
- INEGI. (1983). Carta geológica de Pachuca. Escala 1:250 000. México.
- INEGI. (1985). Carta climática Mayo a Octubre de Pachuca. Escala 1:250 000. México.
- INEGI. (1985). Carta climática Noviembre a Abril de Pachuca. Escala 1:250 000. México.
- INEGI. (2001). Carta topográfica de Tasquillo. Escala 1:50 000. México.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Johstone J. y Chapin III S. (2006). Effects of Soil Burn Severity on Post-Fire Tree Recruitment in Boreal Forest. *Ecosystems*. 9: 14–31.
- Jordán A., L. M Zavala, A. L Nava, N. Alanís. (2009). Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*. Núm, 79. 60-71 pp.
- Kasischke E. (2000). Processes influencing carbón cycling in the north american boreal forest. En: Kasisch E. y Stocks B. Eds. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*, 103-110 pp, Springer. Verlag, New York.
- Kayes L. J. y D. B Tinker. (2012). Forest structure and regeneration following a mountains pine beetle epidemic in southeastern Wyoming. *Forest Ecology and Management*. 263:57-66.
- Lamont B. y N. J. Enright. (2000). Adaptive advantages of aerial seed bank. *Plant species biology*: 157-166.
- Leone V., A. Saracino y N. Logiurato. (1997). Serotiny and its anatomic structure in *Pinus halepensis* Mill. Proceeding of International workshop: Fire. Landscape and Dynamics in the Mediterranean area. Banyuls-sur-mer. September, 1997.
- Letey J., A. Wójciga y R. Horn. (2009). Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil y Tillage Research*. Núm, 103. 170-177 pp.

- Lipiec J., Wójciga A. y Horn R. (2009). Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compactation. *Soil y Tillage Research*. Núm 103. 170-177 pp.
- Maderey R. L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudios del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Textos Universitarios 1, México.
- Mallik A. U., C. H. Gimingham y A. A. Rahman. (1984). Ecological effects of heather burning: 1. Water infiltration, moisture retention and porosity of Surface soil. *Journal of Ecology*. 72:767-776.
- Mayorga-Vela A. (2001). Desarrollo de un modelo de balance de agua en los suelos de Castilla-La Mancha sobre un Sistema de información geográfica: condiciones de aplicación y limitaciones. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid. 300 pp.
- Müller K., M. Deurerb y P. Newton. (2010). Is there a link between elevated atmospheric carbon dioxide concentration, soil water repellency and soil carbon mineralization. *Agriculture Ecosystems and Environment*. Vol, 193. 98-109 pp.
- Neary, D. G., Klopatek C. C., DeBano L. F., y Ffolliott P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 122: 51-71.
- Orozco. O. L. (1991). Caracterización física y dinámica del agua bajo tres sistemas de labranza en un Andisol de la antigua serie Tibaitatá. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá. 122p. (Tesis de M.Sc.)
- Orozco-Méndez M. G. (2015). Incendios y su efecto en los minerales del suelo en un bosque de pino-piñonero. 11° Congreso de Investigación en la FES Zaragoza.
- Ortiz-Solorio C. A. (2010). Edafología. 8<sup>va</sup> edición. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, México. 327 pp.
- Pagliai M., M. La Marca y G. Lucamane. (1987). Change in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. *Soil Science*. 144:124-140.
- Pape Th. y Lager. (1994). Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageninggen Agricultural University. 1-19 pp.
- Parks D. S y T. W Cundy. (1989). Soil hydraulic characteristics of a small southwest Oregon watershed following high intensity wildfire. En: Berg N. Coord. (1989). Proceedings of the symposium on fire and watershed management USDA Forest Service Pacific Southwest *Forest and Range Experimental Station*. General Technical Report PSW-1209, 63-67 pp.

- Pérez G. C. A., López B. J y Vela C. G. (2009). Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*
- Pompa-Castillo E. (2015). Efecto de los incendios sobre la diversidad florística en el Bosque de pino piñonero en Cardonal, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. D.F. México.
- Rab M.A. (1996). Soil physical and hydrological properties following logging and flash burning in the *Eucalyptus regnans* foreston Southern Australian. *Forest Ecology and Management.* 84:159-176.
- Ressl R. y I. Cruz. (2012). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. CONABIO. *Biodiversitas.* 100:12-13.
- Rodríguez G. E., Juez B. L., Guerra B. y Bravo F. (2006). Análisis de la regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. En los arenales de Almazán-Bayubas (Soria, España). *Invest Agrar: Sist Recur For* (2007) 16(1), 25-38.
- Rodríguez T. D. A. (1994). La lucha contra el fuego. UACH-DICIFO. SARH.171 pp.
- Rubio G. A. M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Instituto de recursos naturales y agrobiología de Sevilla. Proyecto de investigación INTERBOS (CGL2008T04503TC03T01). 88 pp.
- Sánchez D. M., R. A. Gallegos, C. A. G. González, G. J. C. Castañeda y O. R. G. Cabrera. (2014). Fire effect upon the regeneration of *Pinus Oocarpa* schiede ex schltld. For: *Rev. Mex. Cien.* Vol, 5. Núm, 24.
- Shukla. M. K., R. Lal, M. Ebinger y C. Meyer. (2006). Physical and chemical properties of soil under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments.* Vol, 66. 673-685 pp.
- Shvidenko y Nilsson (2000). Extent, Distribution, and Ecological Role of Fire in Russian Forests. En Kasischke S. Eric y Stocks J. Brian (Ed) 2000. Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Environmental Research Institute of Michigan. USA. 461 pp.
- Soil Survey Staff. (1996). Soil survey laboratory methods manual. United States Department of Agriculture. Version 3.0. Natural Resources Conservation Service.
- Spurr H. S. y V. B. Barnes. (1982). Ecología Forestal. Ed. AGT. México. 275-294, 426-429 pp.
- Stoopd G. (2007). Micromorphology in soil derived from volcanic ash in Europe. A review and synthesis. *European Journal of Soil Science* 58:356-377.
- Tang C. Q., H. Long-Yuan, S. Wen-Hua, Z. Guang-Fei, W. Huan-Chong, P. Ming-Chun, W. Zhao-Lu y W. Chong-Yun. (2013). Regeneration, recovery and succession of a *Pinus*

- yunnanensis* community five years after a mega-fire in central Yunnan, China. *Forest Ecology and Management*. 294:188-196.
- Teobaldo E. P. (1977). Los pinos del mundo. Publicaciones especiales 1. Ed. Escuela Nacional de Agricultura, 74 p.
- Tessler N., Wittenberg L., Malkinson D., Greenbaum N. (2008). Fire effects and short-term changes in soil water repellency-Mt. Carmel, Israel. *Catena*. 74: 185-191.
- Thomas A.L., D. King, E. Dambrine, A. Countries y A. Roque. (1999). Predicting soil classes with parameters derived from relief geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma*. Vol, 90. 291-295 pp.
- Tisdall, J. M. y Oades. M. J. (1982). Organic matter and water-stables-aggregates in soils. *J. Soil Sci*. 33: 141-163.
- Úbeda, X. (2001), Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal, *Revista Edafología*, núm. 8, pp. 41–49.
- USDA. (2001). Soil Quality Test Guide. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service Natural Resources Conservation Service Soil Quality Institute. 82 pp.
- Valladares F. L. (2004). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 101-126. Capítulo 4. Regimen de incendios y regeneración. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.
- Vandenbygaard, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D. (1999). Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, Southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science* 79, 149–160.
- William L. B y Douglas J. S. (2004). Fire and restoration of piñon–juniper woodlands in the western United States: a review. *Forest Ecology and Management*. 189 - 1–21.
- Zavala L. M., A. J. P. Granded, A. Jórdan y G. M. Bárcenas. (2010). Effects of burning temperatura on water repellency and aggregate stability in forest soil under laboratory conditions. *Geoderma*. Núm, 158. 366-374 pp.
- Zavala L., García J., Gordillo A., Jordán A. y Mataix-Solera J. (2014). Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma* 226–227: 170–178.
- Zehether F. y W. Miller. (2006). Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena* Núm, 65. 201-213 pp.
- Zendejas E. J. A. (1971). Efecto de las altas temperaturas originadas por el fuego en los conos y semillas de *Pinus montezumae* y *Pinus oocarpa*. Tesis profesional. Departamento de bosques, ENA, Chapingo, Méx.

Zwolinski J. B., (1990). The pine woolly aphid, *Pineus pini* (L.), a pest of pines in South Africa. South African. *Forestry Journal*. 151:52-57.