



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**Manejo Forestal y Servicios Ambientales en Mineral  
del Monte, Estado de Hidalgo**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA

**ELIZABETH GONZÁLEZ MONTIEL**



DIRECTOR DE TESIS: DR. EFRAÍN ÁNGELES CERVANTES

MÉXICO D.F.

JUNIO 2013

## **QUIERO DEDICAR ESTE TRABAJO**

A El Eterno por tu amor y verdad.

A Daniel Mújica Elías, por apoyarme y entender cuán importante es este proyecto y porque me alientas a dar siempre lo mejor de mí, te amo.

A mis padres, Gonzalo González Cuellar y Flavia Montiel Aguilar, por su gran ejemplo, por su amor y apoyo incondicional, los admiro.

A mi abuelo paterno, Gonzalo González Cuellar, por vivir con nosotros y compartir tu experiencia y pensamientos, te quiero.

A mis otros abuelos, Margarita Cuellar, José Montiel y Josefina Aguilar, por su memoria.

A la Familia Pérez Montiel, por su cariño y por los momentos que he vivido con todos ustedes, los quiero.

A mis tí@s y prim@s del rancho, por dejarme vivir en sus casas durante vacaciones cuando era niña, así llegué a apreciar el campo y fue una de las razones por las que decidí estudiar Biología, los quiero.

Gracias a todos los que me brindaron su amistad y apoyo; y además me hicieron reír no quiero dejar de mencionar a alguno.

Fabiola Escobar Fierro, a las Lauras, Laura Santiago C. y Ana Laura Martínez. Miguel Correo C., Jaime Martínez T., Eduardo Aguilar M., Alexis Ortega, Javier Sansininea, Miguel Martínez A., Raúl Colín, Iván Roque, Javo.

A los del cubo, Jesús Lugo, Diana Celene, Steph, Luis Acosta, Janine Gutiérrez, Vane, Pedro Armando, Rodrigo, Norma, Frederick, Quinto, Félix.

A los fresas, Eduardo Arreola, Daniel Montiel, Nuria, Eren, Perla Germán.

A los de Laboratorio, Diana Jiménez, Sandy Aldana, Adriana Vallejo, Juan Poblano, Tania González, Mariana Zamudio, Sacnité, Manolo, Mariana Patiño, Aideé García, Valeria Ruíz, Gloria Marisol, Pedro, Diana Moreno, Johnatan, Anayelli.

A Zitlalín, Caro, y Azucena Santiago.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNAM y a los contribuyentes por la educación pública y de calidad, por la libertad de cátedra e investigación. *¿Cómo no te voy a querer?*

Al Dr. Efraín Ángeles Cervantes por permitirme elegir el trabajo de tesis, por su colaboración en la dirección de este trabajo, por el tiempo dispuesto y por su confianza.

Al M en C. Germán Calva Vázquez, al Dr. Carlos Castillejos Cruz, a la M. en C. Beatriz Martínez Rosales y al Biol. Eduardo Enhis Dunhe por el tiempo invertido en la revisión del escrito y sus acertadas recomendaciones para mejorar este trabajo.

A los ejidatarios de San Pedro Huixotitla, en especial al Comisariado José Montiel Aguilar, María Montiel Aguilar, Alberto Montiel Aguilar y Roberto Montiel, por todo el apoyo y las facilidades brindadas para realizar este trabajo.

A Jesús Lugo A., Diana Sánchez C., Stephanie Fernández G., Janine Gutiérrez S., Pedro Armando Molina G., Aidé García P., Mariana Patiño, Félix Ortega, Marisol M., Valeria Ruíz S., Pedro Rojas L., Diana Jiménez, Sandra Aldana P., Tania González, Adriana Vallejo y Juan Poblano por su ayuda en los muestreos de campo.

A la Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez por permitirme trabajar el análisis de suelo en el Laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados, donde conocí al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán quien me brindó apoyo en el laboratorio y no solo eso sino también su amistad; y a Don Luis por su ayuda y dar más de sus horas de trabajo.

Al M. en C. German Calva Vázquez del Laboratorio de Contaminación Atmosférica de la FES Zaragoza por facilitarme el uso del software y equipo WinDENDRO además de la asesoría para realizar el conteo de anillos de crecimiento de las muestras de troncos.

Al Ing. Alfredo Rodríguez del taller del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM por su apoyo en el pulido de las muestras de troncos.

A Alejandro Mújica Montoya por su apoyo, el tiempo que invirtió y sus acertadas recomendaciones en la corrección de estilo de este trabajo, lo admiro.

A la M. en C. Fabiola Rojas García, por compartir sus conocimientos conmigo, por la confianza y amistad.

## RESUMEN

Se evaluó el efecto del manejo forestal sobre el almacén de carbono y el servicio ambiental hidrológico, para ello se determinó el contenido de carbono y las propiedades hídras del suelo en plantaciones de *Pinus patula* de 1 (Pt1), 10 (Pt10), 20 (Pt20) y 30 (Pt30) años; y en un bosque conservado (BC), en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. Esta área cuenta con un plan de manejo donde se aplica el Método de Desarrollo Silvícola. El contenido de carbono en los sitios se obtuvo mediante un inventario y ecuaciones de volumen. El contenido de carbono fue de 356, 59.9, 20.6, 0.1 y 0.01 Mg C·ha<sup>-1</sup> en BC, Pt30, Pt20, Pt10 y Pt1, respectivamente. Para las propiedades hídras, en cada sitio, se determinó infiltración, conductividad hidráulica ( $K_{fs}$ ), densidad aparente, contenido de humedad e hidrofobicidad. Asimismo, se colectaron muestras de suelo para determinar pH, MOS,  $N_{tot}$ ,  $P_{disp}$ , y cationes intercambiables. Las propiedades químicas no presentaron diferencias significativas. La infiltración varió de 2790 a 240 mm·h<sup>-1</sup>; y la  $K_{fs}$  de 317.30 a 11.8 mm·h<sup>-1</sup>. Todos los sitios, incluyendo el BC, son extremadamente hidrófobos. Los resultados mostraron que el manejo forestal afecta el servicio ambiental hidrológico y el almacén de carbono. Ya que se registró una disminución significativa en la  $K_{fs}$  y la infiltración de un 47 a un 96%; así como un 84 y 94% menos de carbono almacenado en las plantaciones, comparadas con el BC.

**Palabras clave:** *manejo forestal, servicios ambientales, contenido de carbono, conductividad hidráulica, hidrofobicidad.*

# CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
MARCO TEÓRICO.....	3
Manejo forestal en México.....	3
Métodos de manejo .....	4
Método de Desarrollo Silvícola .....	5
Servicios Ambientales.....	6
Cuadro 1. Clasificación y ejemplos de servicios ambientales (MEA, 2005). .....	6
Contenido de carbono .....	7
Cuadro 2. Contenido de carbono en biomasa aérea en bosques y plantaciones de Pinus. ....	8
Estimación de la biomasa .....	8
Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono .....	10
Servicio Ambiental Hidrológico.....	10
Propiedades hídricas del suelo.....	11
Efectos del aprovechamiento forestal sobre las propiedades hídricas del suelo.....	17
PROBLEMÁTICA .....	19
HIPÓTESIS .....	20
OBJETIVO.....	20
ZONA DE ESTUDIO .....	21
MÉTODO.....	25
Elección de sitios de muestreo.....	25
Análisis estructural .....	26
Estimación de la biomasa .....	26

Estimación del contenido de carbono. ....	27
Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono. ....	27
Determinación de las propiedades hídricas del suelo.....	28
Determinación de propiedades químicas.....	30
Efecto del manejo forestal sobre el servicio ambiental hidrológico .....	30
<b>RESULTADOS</b> .....	32
Análisis estructural. ....	32
Biomasa.....	35
Contenido de carbono. ....	35
Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono. ....	36
Propiedades hídricas del suelo.....	37
Propiedades químicas.....	40
Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas.....	44
<b>DISCUSIÓN</b> .....	46
Análisis Estructural.....	46
Biomasa.....	46
Contenido de carbono. ....	47
Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono .....	48
Propiedades hídricas del suelo.....	49
Propiedades químicas.....	51
Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas.....	53
<b>CONCLUSIONES</b> .....	55
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	57

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Clasificación y ejemplos de servicios ambientales .....	6
Cuadro 2. Contenido de carbono en biomasa aérea en bosques y plantaciones de <i>Pinus</i> . ....	8
Cuadro 3. Estimación de biomasa y contenido de carbono en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. ....	35
Cuadro 4. Propiedades hídricas del suelo de un bosque sin intervención y plantaciones de <i>Pinus patula</i> de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México. ....	39
Cuadro 5. Propiedades químicas del suelo en un bosque sin intervención y plantaciones de <i>Pinus patula</i> de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México. ....	41
Cuadro 6. Contenido de carbono en bosques templados. ....	47
Cuadro 7. Contenido de carbono en bosques manejados de <i>Pinus patula</i> . ....	48



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	21
Figura 2. Plantaciones de <i>Pinus patula</i> de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte Hidalgo. ....	25
Figura 3. Inventario y medición in situ de la infiltración con el Permeámetro Guelph 2800KI.....	30
Figura 4. Estructura diamétrica de <i>Pinus patula</i> en plantaciones de diferente edad y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. ....	32
Figura 5. Altura de <i>Pinus patula</i> en plantaciones de diferente edad y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. ....	34
Figura 6. Contenido de carbono en plantaciones de <i>Pinus patula</i> y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. ....	36
Figura 7. Crecimiento diamétrico en muestras trocales de árboles de <i>Pinus patula</i> en bosques sin intervención y en plantaciones de diferente edad. ....	37
Figura 8. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 de los suelos de un bosque conservado y plantaciones de <i>Pinus patula</i> con diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México.....	42
Figura 9. Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas del suelo en un bosque conservado y plantaciones de <i>Pinus patula</i> con diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. ....	45

## INTRODUCCIÓN

En México, el 33 % del territorio está cubierto por bosques, los cuales cubren aproximadamente 65 millones de hectáreas (FAO, 2010), cerca del 80% de estos bosques se encuentran bajo régimen de propiedad social y solo el 15.1% se encuentra bajo manejo forestal (Merino, 2004). El manejo forestal comprende la ordenación y el cultivo de los ecosistemas forestales con el fin de aprovechar sus recursos y servicios ambientales, considerando siempre la ecología y funcionalidad del bosque, sin poner en riesgo su permanencia (DOF, 2012a).

Los servicios ambientales se definen como los procesos y bienes que brindan los ecosistemas para mantener la vida y el bienestar humano (MEA, 2005) y entre ellos se encuentran: la protección del suelo, la recarga de mantos acuíferos, la conservación de la biodiversidad, la provisión de hábitat para la vida silvestre, y el almacenamiento de carbono (Patterson y Coelho, 2009). Estos surgieron como una alternativa económica para aprovechar los bosques de manera sustentable.

Por otro lado, los estudios relacionados con el efecto del manejo forestal sobre los servicios ambientales son escasos (Pélissier *et al.*, 1998; Hernández-Díaz *et al.*, 2008; D'Amato *et al.*, 2011).

Existen controversias acerca del efecto del manejo forestal sobre el servicio hidrológico y la productividad de los bosques. Diversos autores muestran que al sustituir los ecosistemas naturales por plantaciones se altera el balance hídrico y la productividad (Sahin y Hall, 1996; Andreassian, 2004; Pérez-Arrarte, 2007 y Zhang *et al.*, 2011). Mientras que, Ilstedt *et al.* (2007), concluyó que las plantaciones ayudan a mantener la fertilidad y el

abastecimiento de agua. Sin embargo, la mayoría de estos estudios no han incluido el estudio de las propiedades hídricas del suelo.

El ejido San Pedro Huixotitla, Municipio de Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, presenta bosques de coníferas y áreas deforestadas, en las que se han desarrollado plantaciones de *Pinus patula* Schl. & Cham. donde se aplica el Método de Desarrollo Silvícola combinado con cortas de regeneración de árboles padre. Por lo que este trabajo pretende contestar las siguientes interrogantes: ¿El manejo forestal, practicado en esta localidad, influye en las propiedades hídricas del suelo? ¿El almacén de carbono en plantaciones es mayor que en los bosques naturales?

La respuesta a estas preguntas permitirá mejorar los métodos de manejo además del establecimiento de criterios para evaluar su sostenibilidad con el fin de mantener los servicios ambientales del bosque y evaluar el potencial de este ejido para incorporarse al programa de pago por servicios ambientales.

## MARCO TEÓRICO

### *Manejo forestal en México*

En México, el 80% los bosques se encuentran bajo régimen de propiedad social y sólo el 15.1% se encuentra bajo manejo forestal (Merino, 2004). De acuerdo con el artículo 27 de la Constitución, estos bosques tienen dos categorías determinadas por la Reforma Agraria. La primera, conocida como régimen comunal, compuesta por comunidades agrarias prehispánicas cuyos orígenes se remontan a antes de la reforma y la segunda, conocida como régimen ejidal, resultado de esta. A esta última, de acuerdo a la reforma del artículo 27 en 1992, se le permitió la adopción del dominio pleno, con la incorporación de tierras de uso común a sociedades mercantiles, donde los ejidatarios pueden vender a un valor comercial la tierra y no por su valor agrícola (DOF, 2012b).

La propiedad colectiva les confiere a las comunidades locales derechos de posesión y uso, de una extensión territorial así como de sus recursos naturales, todo bajo acuerdos establecidos por ellos mismos. Estos derechos incluyen: el derecho a suprimir el uso de la propiedad a otras personas; el derecho al acceso y uso de los recursos; el derecho de aplicar reglas de uso; el derecho a rentar, a vender o hipotecar la propiedad y el derecho de herencia. Sin embargo, el Estado mantiene un margen significativo de control sobre los recursos forestales, en función de preocupaciones ambientales (Bray y Merino, 2004).

Los bosques bajo régimen comunal conforman aproximadamente 8500 núcleos agrarios con una población aproximada de 12 millones de habitantes (Bray *et al.*, 2006), donde el manejo forestal es la opción principal de desarrollo económico.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable establece que el manejo forestal es el proceso que comprende el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto la ordenación, el cultivo, la protección, la conservación, la restauración y el aprovechamiento de los recursos y servicios ambientales forestales de un ecosistema forestal, considerando los principios ecológicos, respetando la integridad funcional e interdependencia de recursos, sin que merme la capacidad productiva de los ecosistemas y los recursos existentes (DOF, 2012a).

El aprovechamiento de los recursos forestales permite obtener productos como: madera, tablas, pilotes, morillos, leña, resina, celulosa, mejores semillas, entre otros, los cuales se utilizan directamente o se transforman (Ordóñez, 2008). De esta manera, estas comunidades venden madera en pie y diversos productos forestales no maderables (PFNM) (FAO, 2004).

### ***Métodos de manejo***

El manejo forestal en áreas de clima templado sigue procedimientos de manejo regular, para bosques con árboles de edad uniforme y preferentemente de un mismo género; e irregular para bosques con una composición de edad y especies diferentes; o mezclado (Ordóñez, 2008).

En el manejo regular se aplica el llamado “Método de Desarrollo Silvícola” (MDS); el cual consiste en estimar el volumen de cosecha en función de una serie de reglas silvícolas asumiendo un turno y recomendaciones técnicas. Para el manejo irregular se aplica el “Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares” (MMOBI); éste calcula el volumen de cosecha de acuerdo con el crecimiento temporal de la población forestal

asumiendo que la recuperación de la población sigue un patrón definido. Los métodos mezclados son muy variados y no siguen algún patrón sistemático, aunque en la mayoría de los casos resultan ser una combinación entre el MMOBI y el MDS (FAO, 2004; Hernández-Díaz *et al.*, 2008).

### ***Método de Desarrollo Silvícola***

El Método de Desarrollo Silvícola (MDS) es una alternativa de ordenación forestal para bosques de clima templado y frío con aprovechamiento maderable. Asimismo, tiene como objetivo obtener el máximo potencial productivo del suelo por medio de técnicas silvícolas para alcanzar un rendimiento sostenido en cada cosecha.

El MDS considera, para la regeneración del bosque, el método de árboles padre, el cual indica que durante la corta final se dejen en pie árboles, denominados padres. Estos deben estar sanos, ser resistentes al viento y tener edad para producir suficientes semillas fértiles para servir de semilleros y establecer una nueva masa forestal.

Una vez establecida la masa forestal, antes del aprovechamiento, se realizan tratamientos silvícolas que ayudan a mejorar el desarrollo de los árboles. Estos son: a) la corta de liberación, donde se talan los árboles padre; b) el pre aclareo, que consiste en cortar árboles para reducir la competencia entre los renuevos, se efectúa simultáneamente a la corta de liberación y c) los aclareos, los cuales son cortas que se llevan a cabo durante el crecimiento del bosque para excluir árboles dañados o mal conformados.

En el MDS, el aprovechamiento de las masas forestales está determinado por un turno y un ciclo de corta. El primero, se refiere al periodo de regeneración de los recursos forestales desde su extracción hasta el momento en que éstos son susceptibles de nuevo

aprovechamiento; y el segundo, al tiempo definido para las cortas finales programadas en un mismo rodal (SARH, 1982).

### ***Servicios Ambientales***

En las últimas dos décadas, los servicios ambientales se han convertido en una alternativa para generar incentivos económicos frente al manejo forestal tradicional (De Jong *et al.*, 2000; Klooster y Masera, 2000; Farley y Costanza, 2010).

Los servicios ambientales son los beneficios y procesos que los ecosistemas brindan para mantener la vida y el bienestar humano (Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005; Patterson y Coehlo, 2009). Este concepto comprende la producción, provisión, protección y subsistencia de gran número de bienes; y se han clasificado por los recursos que producen (Cuadro 1) (Chee, 2004).

Cuadro 1. Clasificación y ejemplos de servicios ambientales (MEA, 2005).

Servicios de Provisión	Servicios de regeneración	Servicios de regulación	Servicios culturales
Alimento	Biodiversidad	Regulación del clima	Información artística y espiritual
Materias primas	Polinización	Captura de carbono	Belleza escénica
Energía	Ciclos biogeoquímicos	Regulación del ciclo hidrológico	Ciencia
Recursos genéticos		Servicio ambiental hidrológico	Educación
		Prevención de disturbios	
		Tratamiento de desechos	
		Control biológico	

La protección del suelo, la recarga de acuíferos, la conservación de la biodiversidad, la provisión de hábitat para vida silvestre y el almacenamiento de carbono son servicios que los bosques brindan al ser humano (Patterson y Coelho, 2009).

Debido a la disminución de hábitats naturales, los servicios ambientales ofrecidos de manera gratuita por los bosques se convirtieron en sujetos potenciales de comercialización, creando la necesidad de un esquema de Pago por Servicios Ambientales (PSA). La idea central del PSA es que los beneficiarios externos de los servicios ambientales paguen (de manera directa, contractual y condicionada) a los propietarios y usuarios locales por adoptar prácticas sostenibles (Aguirre, 2007).

La diversidad de ecosistemas que caracteriza a México pone de manifiesto el potencial que posee en la producción de servicios ambientales. Sin embargo, sólo captura y almacén de carbono en suelo y vegetación, servicio ambiental hidrológico, y biodiversidad son los más viables, al ser los únicos que cuentan con subsidio por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (FAO, 2004; DOF, 2011).

### *Contenido de carbono*

La quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas producen gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos gases se encuentran de manera natural en la atmósfera, pero desde la revolución industrial han aumentado su concentración considerablemente, causando un desequilibrio notable en los patrones climatológicos del planeta, en los últimos 50 años (IPCC, 2007).

Debido a la necesidad de crear un marco internacional para disminuir el cambio climático ocasionado por GEI, generados principalmente por países industrializados, surgió el Protocolo de Kioto; donde se establecen los límites máximos permisibles de las emisiones de GEI a las naciones industrializadas y a las que están en transición (UNFCCC, 1998). Este



protocolo también representa el principio del mercado del PSA, primordialmente el de captura de carbono (De Jong *et al.*, 2000; Maser *et al.*, 2001; Aguirre, 2007).

En virtud de que los árboles tienen la capacidad de metabolizar el CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis, los bosques son idóneos para capturar (velocidad a la que el carbono se almacena) y almacenar (masa de carbono presente en un sitio) gran cantidad de CO<sub>2</sub>; e intervienen en más del 80% del flujo de carbono entre la atmósfera y la superficie terrestre (Dixon y Turner, 1991; Ordóñez *et al.*, 2001; D'Amato *et al.*, 2011), se han realizado diversos estudios determinando el contenido de carbono en estos ecosistemas (Cuadro2).

Cuadro 2. Contenido de carbono en biomasa aérea en bosques y plantaciones de *Pinus*.

Especie	Edad	Contenido de C	Autor
	años	Mg ha <sup>-1</sup>	
<i>P. patula</i>	80	92.44	Figuroa, 2010
<i>P. ponderosa</i>	ND	48.8	Finkral y Evans, 2008
<i>P. hartwegii</i>	103	145.84	Mendoza, 2008
<i>P. patula</i>	ND	183.2	Acosta <i>et al.</i> , 2007
<i>P. pseudostrobus</i>	90	112.29	Aguirre <i>et al.</i> , 2007
<i>P. teocote</i>	70	79.64	Aguirre <i>et al.</i> , 2007
<i>P. hartwegii</i>	80	101	Rojas y Villers, 2005
<i>P. banksiana</i>	79	78.2	Howard <i>et al.</i> , 2004
<i>P. banksiana</i>	40	30	Foster y Morrison, 2002
<i>P. banksiana</i>	50	75	Foster y Morrison, 2002

(ND) No determinado

### ***Estimación de la biomasa***

El carbono se acumula en la biomasa de las plantas mediante el proceso de fotosíntesis, en términos generales esta representa el 50% de su peso en seco. La biomasa se define como la cantidad total de materia orgánica viva o muerta (FAO, 2009).

La determinación de la biomasa se realiza por métodos destructivos y no destructivos. De acuerdo con Díaz-Franco (2007), la técnica más común es el método destructivo, el cual consiste en la cosecha de cierto número de árboles para separarlos por componentes (fuste, ramas, follaje, corteza y raíces) y obtener el peso fresco para después colocarlos en estufas de secado hasta conseguir el contenido de biomasa seca y relacionarla con alguna de sus variables fáciles de medir (diámetro basal, diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura) a través de ecuaciones de regresión. Esta técnica es conocida como alometría, la cual se refiere al estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo como resultado de su crecimiento (King, 2005). El método destructivo es el más preciso, pero implica gran cantidad de recursos y tiempo, además de que surgen problemas para extrapolar los datos a grandes áreas (Figuroa, 2010).

Los métodos no destructivos consisten en medir variables como la altura, el DAP, el diámetro basal, la longitud de copa, la edad y el incremento de anillos de crecimiento para obtener valores de volumen, biomasa aérea, biomasa radical a través de ecuaciones alométricas o factores de corrección (FAO, 2009).

Actualmente, el uso de sistemas de información geográfica está adquiriendo importancia en la determinación de la biomasa. Estos a través de la teledetección, miden la cantidad de microondas, radiación infrarroja que es reflejada o dispersada por la vegetación, para relacionarlas, mediante ecuaciones, con variables como el área foliar, el cierre de copas, la altura y la fracción de sombra (Aguirre, 2007, FAO, 2009). Algunos autores señalan que existen limitantes por la heterogeneidad de los bosques, pero cuando la vegetación en su mayoría es uniforme como en las plantaciones forestales; o con una baja diversidad de

especies se vuelven herramientas valiosas que ahorran tiempo y costos (Figuroa, 2010; Hall *et al.*, 2001).

### ***Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono***

La tasa de captura de carbono desciende naturalmente al incrementar la edad de las masas forestales en consecuencia a las limitaciones fisiológicas que se presentan con el aumento de la edad; y a los cambios en la estructura de las masas forestales durante su desarrollo (Pregitzer y Euskirchen, 2004; Bradford y Kastendick, 2010; D Amato *et al.*, 2011).

Sin embargo, existen controversias respecto al efecto que ejerce la gestión de las masas forestales sobre el contenido y la captura de carbono. Algunos estudios demuestran que los aclareos repetidos dentro de una rotación de larga duración aumentan el almacén de carbono; y que las ganancias en el contenido de carbono varían de acuerdo a los métodos de aclareo empleados (Harmon *et al.*, 2009; Hoover y Stout, 2007).

Otros autores señalan que cuando se realizan aclareos en lapsos menores de tiempo, el contenido de carbono aéreo disminuye; en contraste a lo que sucede en sitios sin tratamientos (Frinkal y Evans, 2008; Campbell *et al.*, 2009). Mientras que los resultados de distintos estudios manifiestan que la reducción en la tala es esencial para incrementar el almacén de carbono aéreo (Nunery y Keeton, 2010; D'Amato *et al.*, 2011).

### ***Servicio Ambiental Hidrológico***

Los principales problemas ambientales que enfrenta nuestro país, son la escasez de agua y la deforestación, poniendo en riesgo el desarrollo socioeconómico, la seguridad alimentaria y

el mantenimiento de los ecosistemas. Por ello el gobierno federal, a través de la Comisión Nacional Forestal, diseñó el Programa de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico (PSAH), el cual ofrece incentivos económicos a los dueños de los bosques por la protección de cuencas hidrográficas y la recarga de acuíferos para evitar la deforestación en donde la actividad forestal comercial, no puede competir contra la agricultura o la ganadería (Muñoz-Piña *et al.*, 2008).

El Servicio Ambiental Hidrológico está relacionado con los bosques, ya que son parte importante en el ciclo del agua; estos ayudan a moderar el escurrimiento del agua precipitada, favorecen la infiltración y la recarga de los mantos acuíferos (Torres y Guevara, 2002; FAO, 2004). Éste servicio depende principalmente de las propiedades hídricas del suelo y la variación de éstas obedece al tipo de vegetación, estacionalidad, disturbios y características del suelo (Buckzo *et al.*, 2006; Ziegler *et al.*, 2006; Ángeles, 2010).

### ***Propiedades hídricas del suelo***

*Densidad aparente.* Es la masa de suelo seco por unidad de volumen, este volumen incluye el espacio poroso además de minerales y partículas orgánicas; generalmente se expresa en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y se utiliza como un indicador de la compactación del suelo. Un aumento en la densidad aparente indica una disminución de la porosidad y reducción en el contenido de humedad, el movimiento del agua y la facilidad con que las raíces penetran el suelo, características que influyen en el uso del suelo, tipo de vegetación y la productividad (Reynolds *et al.*, 2007; Evanylo y Mc Guinn, 2009).

En Chile, Schlatter y Otero (1995) determinaron un intervalo de densidad aparente de 0.48 a 0.61  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en plantaciones de *Pinus radiata* sobre Andosoles y observaron que es mayor que la del bosque nativo. Harden y Delmas (2003) documentaron para bosques de pino de crecimiento secundario en montañas Apalaches un intervalo de 1.09-1.71  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; e indicaron que esta propiedad era afectada por la historia del uso de suelo, el espesor de la capa de mantillo y por la actividad de la fauna edáfica.

En Turquía, Yüksek y Yüksek (2011) estudiaron los cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo en plantaciones de 10 años de *Robinia pseudoacacia* y en plantaciones mixtas de *Pinus pinea* y *Robinia pseudoacacia*. Ellos encontraron una densidad aparente de 1.2 y 1.25  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a una profundidad de 0-10 y de 10-20 cm para las plantaciones mixtas, la cual está fuertemente influida por el tipo de vegetación y el manejo del suelo.

En México, Jordán *et al.* (2009) determinaron para Andosoles con bosques mixtos de *Pinus*, *Abies* y *Quercus* un intervalo de 1.14-1.23  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y el valor más alto 1.57  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  se registra en un suelo desnudo. Muñoz *et al.* (2011), en Veracruz, encontró una densidad aparente de 0.25 y 0.45  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en dos cuencas sobre Andosoles; mientras que González-Vargas (2011) calculó 0.73  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en el Parque Nacional Desierto de los Leones (PNDL) y Jiménez-Cruz (2011) registró un valor de 0.87  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA).

*Infiltración.* Es el movimiento del agua de la superficie del suelo hacia el interior del perfil, se mide en  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (Harden y Delmas, 2003). Esta variable es definitiva en la recarga de mantos acuíferos, en la erosión hídrica y en la distribución de la escorrentía al evitar inundaciones (Descroix *et al.*, 2007; Ilstedt *et al.*, 2007; Gómez-Tagle *et al.*, 2010).

En Estados Unidos, Harden y Delmas (2003), estudiaron la variabilidad espacial de las tasas de infiltración en bosques de regiones montañosas bajo condiciones geológicas, edáficas, topográficas y bióticas diferentes. Donde encontraron para bosque de pino un intervalo de 23-94 mm·h<sup>-1</sup>. Su estudio manifiesta diferencias en las tasas de infiltración en sitios que fueron talados en el pasado y resalta la importancia de los bosques en la conservación de la topografía de un sitio al evitar la erosión por el buen drenaje que presentan los suelos forestales.

En Alemania, Buckzo *et al.* (2006) caracterizaron la variación estacional de las propiedades hídricas del suelo y sus cambios en la transformación de un bosque de *Pinus sylvestris* a bosque mixto, mediante la introducción de *Fagus sylvatica*. Ellos obtuvieron una infiltración promedio de 2556 mm·h<sup>-1</sup> en el bosque de pino, la variación fue más o menos igual tanto en las etapas de transformación como en las estaciones aunque mostraron una tendencia al presentar valores mayores en verano y otoño.

En España, Neris *et al.* (2012) analizaron la influencia del suelo forestal en los procesos hidrológicos en Andosoles donde reportan 30 mm·h<sup>-1</sup> para bosque de *Pinus canariensis*, por lo que concluyeron que los Andosoles tienen gran capacidad de infiltración, la escorrentía es escasa y poseen una gran resistencia a la erosión bajo condiciones forestales.

En México, Duéñez (2007) trabajó con simuladores de lluvia en bosques de pino bajo manejo silvícola en Durango y determinó una infiltración de 1443.3-2676.4 mm·h<sup>-1</sup> bajo diferentes tratamientos silvícolas como aclareos y cortas de regeneración. La investigación manifestó que estas actividades solo modifican temporalmente la capacidad de infiltración y advierte que habría una repercusión mayor en esta propiedad si los suelos cambian de uso forestal a pecuario.

Jiménez-Cruz (2011), en el PNCA, evaluó la infiltración a diferente profundidad (0- 2.5 y 2.5-5 cm) en una reforestación de *Pinus hartwegii* registrando valores de 6160 y 2916 mm·h<sup>-1</sup> para cada profundidad, demostrando una disminución del 52% en la infiltración imputable a la disminución del espacio poroso en el suelo por efecto del fuego.

*Conductividad hidráulica saturada* ( $K_{fs}$ ). Es uno de los factores más importantes que rigen la transmisión de líquidos en suelos saturados y esta se refiere a la habilidad del suelo para absorber, conducir y drenar el agua desplazando el aire contenido en él, se expresa en mm·h<sup>-1</sup> (Sobieraj, 2003; Reynolds *et al.*, 2008).

En Estados Unidos, Johnson-Maynard *et al.* (2002) estudiaron un suelo con monocultivos de *Pinus coulteri*, *Quercus dumosa* y *Adenostoma fasciculatum* de 50 años con el propósito de determinar la influencia que tiene el tipo de vegetación y su fauna edáfica en el desarrollo de la estructura del suelo y en las propiedades hídricas. El sitio con *Pinus coulteri* registro el valor más bajo de  $K_{fs}$  con 31 mm·h<sup>-1</sup> en los primeros 7 cm de suelo, por debajo de los 25 cm la  $K_{fs}$  fue similar para todos los tipos de vegetación. Ellos atribuyeron los cambios en la  $K_{fs}$  al aumento en la porosidad relativa del material de relleno original y su incremento, probablemente, a la creación de macro poros generados por lombrices, pero no al tipo de vegetación.

En Finlandia, Heiskanen y Mäkitalo (2002), estudiaron la variación de las propiedades físicas del suelo en bosques de *Pinus sylvestris* y *Picea abies*. Ellos reportan una  $K_{fs}$  de 36.6 mm·h<sup>-1</sup> para el bosque de pino. En Japón, Hayashi *et al.* (2006) analizaron las propiedades hídricas en suelos forestales perturbados y sin perturbación; ellos registraron una  $K_{fs}$  de 9.46 y 291 mm·h<sup>-1</sup> en Andosoles bajo *Pinus thunbergii*.

En México, Oleschenko y Chapa (1989), estudiaron las propiedades físicas de un Andosol mólico bajo diferentes tipos de labranza, los valores de  $K_{fs}$  son 62, 40 y 27  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  para el suelo sin labranza, labranza mínima y labranza tradicional respectivamente. Los análisis del efecto de los tres tipos de labranza mostraron que la  $K_{fs}$  fue una de las propiedades más afectadas ya que en el suelo con labranza cero esta propiedad representa el doble que en el suelo con labranza tradicional. Aunque, la alta variabilidad de la  $K_{fs}$  la imputan a las cavidades presentes en el suelo creadas por roedores.

Castro (2009), en el Estado de México, registró en bosques de *Pinus hartwegii* sobre Andosoles una  $K_{fs}$  de 489.6  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  para un bosque conservado y 24.8  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  para un bosque con incendio superficial, mostrando una reducción del 90% causada por la compactación del suelo debido a las altas temperaturas que se alcanzan en un incendio. Asimismo, detectó que la  $K_{fs}$  aumenta durante el proceso de regeneración de los bosques de pino y se recupera cuando este alcanza 30 años de edad. Por su parte, Jiménez-Cruz (2011) evaluó la  $K_{fs}$  en una reforestación de *Pinus hartwegii* en el PNCA y registró un valor bajo de 8.88  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , este sitio también fue afectado por un incendio.

*Potencial de flujo mátrico ( $\Phi_m$ )*. Es la medida de la habilidad del suelo para atraer el agua por capilaridad en un área y unidad de tiempo determinado, se reporta en  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Sandoval *et al.*, 2007).

En Chile, Sandoval *et al.* (2007) estudiaron los parámetros hidráulicos en un Andosol bajo rotación de cultivos, incluyendo el  $\Phi_m$ , donde determinaron un intervalo de 0.00085-0.002047  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . En México, González-Vargas (2011), evaluó el efecto de los incendios en las propiedades hídricas de un Andosol en el PNDL, registrando un valor negativo en el  $\Phi_m$



de  $-0.08 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; mientras que Jiménez-Cruz (2011) y Castro (2009) reportan en bosques de *Pinus hartwegii* un valor de 0.0030 y  $0.2177 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  respectivamente.

*Hidrofobicidad.* Un suelo es repelente al agua o hidrófobo cuando es difícil de mojar (Ritsema y Decker, 1998). Esta característica está presente en muchos tipos de suelo, dependiendo de su severidad puede reducir las tasas de infiltración y favorecer el flujo superficial aumentando el riesgo de erosión (Letey *et al.*, 2000; Zavala *et al.*, 2010). La repelencia al agua es generada principalmente por compuestos orgánicos producidos por plantas vivas o en descomposición y microorganismos, por las tasas de mineralización y humificación del suelo e incendios forestales; indistintamente está asociada al uso del suelo y al tipo de vegetación (Doerr *et al.*, 2000; Jordan *et al.*, 2009).

La hidrofobicidad se determina a través del tiempo que transcurre para que una gota de agua penetre el suelo por completo (WDPT, por sus siglas en inglés). Si la gota de agua no penetra el suelo y el ángulo de contacto entre el suelo y el agua es  $\geq 90^\circ$ , el suelo es considerado hidrófobo (Doerr *et al.*, 2000; Letey *et al.*, 2000).

De acuerdo con Ritsema y Dekker (1998) un suelo es hidrófilo cuando la gota se infiltra en 5 s o menos, ligeramente hidrófobo en un rango de 5-60 s, fuertemente hidrófobo de 60-600 s, severamente hidrófobo de 600-3600 s, y extremadamente hidrófobo cuando tarda más de una hora.

En Alemania, Buckzo *et al.* (2006), evaluaron la hidrofobicidad en suelos con *Pinus sylvestris* a diferentes profundidades de 0-5 y de 5-10 cm. Ellos registraron tiempos de penetración con intervalos de 17-70 y 0-73 s para cada profundidad. En Trinidad y Tobago, Lebron *et al.* (2012) encontraron, en suelos bajo plantaciones de *Pinus caribaea*, que la hidrofobicidad fue más persistente y heterogénea que en los bosques naturales. En México,

Jordán *et al.* (2009), determinaron rangos de 2.2 a 1182 s, en suelos de cenizas volcánicas bajo bosques de coníferas y encinos.

### ***Efectos del aprovechamiento forestal sobre las propiedades hídricas del suelo***

Los cambios en la composición de una comunidad vegetal o en el uso del suelo modifican el ciclo del agua en un ecosistema. Estos cambios entorpecen el balance entre la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía, provocando la disminución o el incremento del caudal en un cuerpo de agua. Además de que rompen el equilibrio entre el agua superficial y la subterránea (Sahin y Hall, 1996; Andréassian, 2004; Buytaert *et al.*, 2007; Pérez-Arrarte, 2007; Zhang *et al.*, 2011).

Diversos autores plantean que la producción de agua en cuencas reforestadas declina al incrementar la edad de las plantaciones, basados en la tendencia de crecimiento de los árboles, concluyendo que un crecimiento más rápido requiere más agua, y que las tasas de transpiración varían en función de la edad de la vegetación (Bruijnzeel, 2004; Brown *et al.*, 2005; Pérez-Arrarte, 2007; Vanclay, 2009).

También se ha demostrado que la hidrofobicidad es frecuente en las plantaciones forestales lo que dificulta la infiltración del agua y aumenta la escorrentía siendo particularmente severa durante las condiciones de sequía de verano (Buczko *et al.* 2006, Wahl *et al.* 2003; Oyarzún *et al.*, 2011). Aparte de que acidifican y salinizan tanto el suelo como el agua de las cuencas que ocupan (Jobaggy *et al.*, 2006).

Por otro lado, en los trópicos se establecieron plantaciones con el fin de mejorar la calidad de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo para mantener la fertilidad y el abastecimiento de agua; observando un efecto benéfico sobre la infiltración (Ilstedt *et*

*al.*, 2007), mientras que Zimmermann *et al.* (2006) concluyeron que el efecto de las plantaciones sobre las propiedades hídricas del suelo depende del uso previo de la tierra.

## PROBLEMÁTICA

Los estudios relacionados con el efecto del manejo forestal sobre el servicio hidrológico y la productividad de los bosques son escasos (Pélissier et al., 1998; Hernández- Díaz et al., 2008; D'Amato et al., 2011). Asimismo, existen controversias sobre el servicio hidrológico de las plantaciones. Diversos autores mencionan que al sustituir los ecosistemas naturales por plantaciones se altera el balance hídrico y la productividad (Sahin y Hall, 1996; Andreassian, 2004; Bruijnzeel, 2004; Buytaert *et al.* 2007; Pérez-Arrarte 2007; Vanclay, 2009 y Zhang *et al.* 2011). Mientras que Ilstedt *et al.* (2007), concluye que las plantaciones ayudan a mantener la fertilidad y el abastecimiento de agua. La mayoría de estos estudios no han incluido el estudio de las propiedades hídricas del suelo, las cuales son factores importantes en la productividad e infiltración.

En el ejido San Pedro Huixotitla se presentan bosques de oyamel, oyamel-pino, encino, pino y pino-encino. Estos bosques se aprovechan, aplicando el Método de Desarrollo Silvícola, a través de las cortas de regeneración de árboles padre; además del establecimiento de plantaciones de *Pinus patula*, por lo que surgen las siguientes interrogantes:

¿El manejo forestal, practicado en esta localidad, influye en las propiedades hídricas del suelo?

¿El almacén de carbono en plantaciones es mayor que en los bosques conservados?

## **HIPÓTESIS**

Si el contenido de carbono y las propiedades hídricas del suelo (infiltración, conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico, hidrofobicidad y densidad aparente) son significativamente mayores en el bosque conservado; entonces el manejo forestal afecta el servicio ambiental hidrológico y el de almacén de carbono.

## **OBJETIVO**

Determinar el efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono y el servicio ambiental hidrológico en bosques del ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar el contenido de carbono en individuos de *Pinus patula* creciendo en bosques naturales y en plantaciones.
- Evaluar las propiedades hídricas (hidrofobicidad, infiltración, conductividad hidráulica saturada, retención de humedad, densidad aparente) de suelos bajo bosques naturales y bajo plantaciones de *Pinus patula*.

## ZONA DE ESTUDIO

El ejido San Pedro Huixotitla se encuentra en el municipio de Mineral del Monte, en la parte sur del Estado de Hidalgo, a 20 kilómetros de distancia de Pachuca. Sus coordenadas son  $20^{\circ} 6' 41''$  N y  $98^{\circ} 34' 7.1''$  O, ubicado a 2866 msnm, y con una superficie total de 1517.25 ha (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio mostrando los parches de las plantaciones de diferentes edades y el bosque mixto en el ejido San Pedro Huixotitla, Municipio Mineral del Monte, Hidalgo; (Pt1=Plantación de 1 año; Pt10=Plantación de 10 años; Pt20=Plantación de 20 años; Pt30=Plantación de 30 años).

En el ejido San Pedro Huixotitla se otorgó la autorización para el aprovechamiento forestal desde 1980, donde se aplica el MDS con cortas de regeneración natural de árboles padre, combinado con regeneración artificial a través de plantaciones con el fin de asegurar la producción y la homogeneidad de la plantación. La superficie de producción forestal es de 785.5 ha. Las plantaciones están señaladas con la anualidad en las que se ha aplicado la corta de regeneración, estas cuentan con una superficie de 4 a 6 ha cada una. Esta zona está bajo la administración de 122 ejidatarios, representados por un comisariado ejidal, el cual está constituido por un presidente, un secretario y un tesorero.

Antes de la producción forestal el ejido era un área de libre paso, se practicaba el pastoreo, se extraía leña y algunos productos no maderables, como hongos y herbáceas. Dentro de la zona de estudio, se pueden encontrar zonas de pastizal, generadas a causa de incendios, quemas controladas así como de las cortas de regeneración y aclareos realizados como parte del manejo forestal. Después de las cortas de regeneración o de un incendio se acostumbra reforestar con *P. ayachauite*, *P. montezumae* y *P. patula*, especie originaria del sitio.

Actualmente, también funciona como rancho cinegético y eco turístico, donde se introdujeron *Odocoileus virginianus* y *Cervus elaphus*, su población aproximada es de 170 ejemplares.

*Clima.* La zona de estudio presenta, de acuerdo con García (1988), un clima Cw (x'), templado-subhúmedo con régimen de lluvias de verano con precipitación anual de entre 1200 y 1400 mm; temperatura media anual entre 12 y 18°C; temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C, y la del mes más caliente superior a 26.5°C.

*Geología.* La zona pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. En el sitio se encuentran formaciones, como Las Navajas y Guajolotes, compuestas por una secuencia de edad Plio-cuaternario, constituida en su mayor parte de basalto de olivino con tezontle y algunas variantes a traquiandecita con interestratificación de riolita. Específicamente, se puede percibir un nivel de riolita donde se encuentra obsidiana color verde, negra y dorada (Azpeitia, 2007).

*Edafología.* El suelo que predomina en la zona de estudio es el Andosol el cual se caracteriza por ser profundo, con frecuencia está estratificado como resultado de acumulaciones periódicas de materiales piroclásticos; la textura es predominantemente limosa; con estructuras miga-josas o granulares en la superficie y de bloques subangulares en el subsuelo (Luna *et al.*, 2007).

*Hidrología.* Esta zona corresponde a la región hidrológica No. 26 Alto Pánuco. Tiene una superficie de 7,933.830 Km<sup>2</sup>. La corriente más importante es el afluente del río Pánuco, teniendo como origen al río San Juan y al río Tula, el cual después de un recorrido de 174 km. cambia de nombre a río Moctezuma. El sitio pertenece a la subcuenca Pachuca Ciudad de México, la cual tiene una superficie de 2494 Km<sup>2</sup> en 20 municipios del Estado de Hidalgo (Lafragua *et al.*, 2003).

*Tipo de vegetación.* En el bosque conservado se presentan bosques de *Pinus-Quercus* y *Abies-Quercus* con especies como *P. patula*, *P. teocote*, *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Q. crassifolia*, *Q. affinis*, *Q. glabrescens* y *A. religiosa*; además de *Cupressus lusitánica*, *Arbutus glandulosa*, *A. xalapensis*, *Buddleia cordata*, *Litsea glaucescens*, *Prunus serotina* y *Taxus globosa*. Entre las especies del estrato arbustivo se encuentra *Baccharis conferta*, *Senecio albonervius*, *Juniperus monticola* y *J. deppeana*; y herbáceas como *Conopholis*



*alpina*, *Sigesbeckia jorullensis*, *Fragaria mexicana* y *Cirsium ehrenbergii*. Existen otros elementos de vegetación crassicaule y rupícola como *Echeveria secunda*, *E. coccinea*, *Berberis moranensis* y de la familia Cactaceae *Mammillaria rhodantha* (Rzedowski *et al.*, 2001). Mientras que en las plantaciones se encuentra principalmente *Pinus patula*, *P. ayacahuite*, y *P. montezumae*, con alturas que fluctúan entre los 12 y 20 metros.

Características de *Pinus patula* Schlecht. & Cham. Es una especie de rápido crecimiento, lo que la hace común en plantaciones comerciales. Está presente de manera natural en los estados de Querétaro, Hidalgo, México, Puebla y Veracruz. Su madera es apropiada para pulpa de papel, por el bajo contenido de resina y de madera de corazón. También se utiliza para la fabricación de cajas de empaque, postes para la conducción de energía eléctrica, pilotes y puntales para minas y en carpintería (Vela-Gálvez, 1976).

*Descripción botánica.* Árbol de 10 a 25 m de altura; con corteza escamosa y rojiza; hojas reunidas en número de 3 en cada fascículo, variando de 3 a 5 aún en el mismo individuo, miden de 15 a 30 cm de largo, son delgadas y colgantes, de color verde claro brillante, la vaina es persistente; estróbilos masculinos de 8 a 10 mm de largo, de color amarillento; los conos femeninos son algo piramidales, de color café-rojizo y algo pedunculados; conos sésiles, agrupados en conjuntos de 3 a 6; semillas pequeñas, de 3 a 4 mm de largo, casi triangulares, de color café, con el ala también café de 8 a 10 mm de largo (Rzedowski *et al.*, 2001).

## MÉTODO

### *Elección de sitios de muestreo*

El ejido San Pedro Huixotitla, cuenta con un plan de manejo forestal en donde se aplica el MDS con el método de regeneración de árboles padre combinado con métodos de regeneración artificial con plantaciones. Las plantaciones están señaladas con la anualidad en la que se ha aplicado la corta de regeneración. De esta manera se eligieron plantaciones de 1 (Pt1), 10 (Pt10), 20 (Pt20) y 30 (Pt30) años y un bosque conservado (BC) con dominancia de *P. patula* (70%).

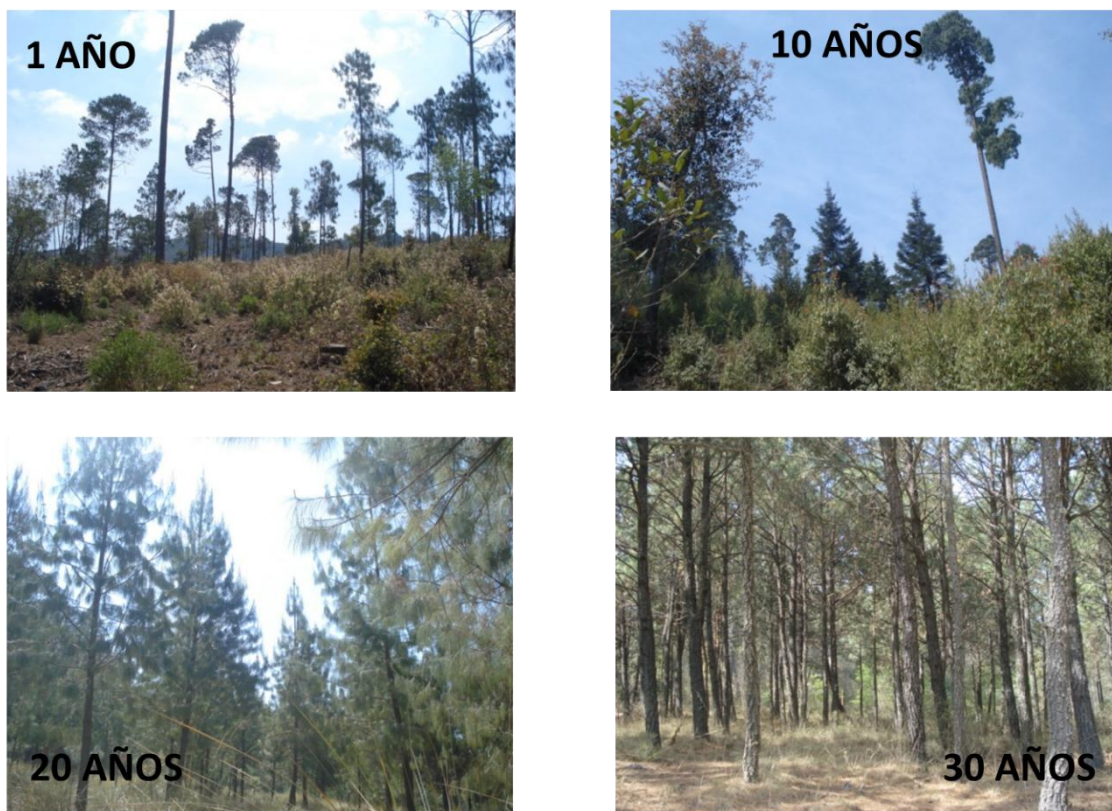


Figura 2. Plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte Hidalgo.

En la figura 2 se observa que la plantación de 10 años no es mono específica. En este sitio se registró una alta mortalidad de árboles de *P. patula* y surgió *Litsea glaucescences*. Asimismo se distinguen individuos de *P. ayacahuite*.

La Pt1, Pt10, Pt20 y Pt30 cubren una superficie de 1 y 4 ha, respectivamente, mientras que Pt20 y Pt30 ocupan 6 ha.

### ***Análisis estructural***

Para definir, las clases diamétricas, la distribución de alturas y la densidad de individuos de las plantaciones y del bosque conservado; en cada sitio se establecieron parcelas de muestreo de 0.1 ha. en las que se inventariaron sólo los árboles de *P. patula* (Figura 3a). Se registró el diámetro a la altura del pecho (DAP) para los individuos que tuvieran una altura mayor a 1.3 m y diámetro basal en individuos de la plantación de un año; este se midió con una cinta métrica de 1.5m de largo (Imaña-Encinas, 1998). Asimismo, se registró la altura total de cada individuo con un DendroFlexómetro©.

### ***Estimación de la biomasa***

La biomasa se estimó con un método no destructivo, utilizando los datos de diámetro y altura para determinar el volumen. Éste dato se multiplicó por el coeficiente mórfico forestal, con el fin de corregir las formas irregulares que los árboles presentan, además de tomar en cuenta todos los componentes del árbol como ramas, follaje y corteza; y no solo el fuste (Rojas y Villers, 2005). Tenorio-Galindo (2003) mencionó que las ecuaciones que utilizan el

coeficiente mórfico son sensiblemente iguales a los que se obtiene con ecuaciones estimadas por regresión. La fórmula de volumen que se aplicó fue la siguiente:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot CM$$

donde  $V$  es el volumen ( $m^3$ ),  $r$  el radio,  $h$  la altura (m) y  $CM$  es el coeficiente mórfico.

De acuerdo con Rojas y Villers (2008) y López- Telles *et al.* (2007), la biomasa se puede obtener a través de la relación entre el volumen del árbol y la densidad básica de la madera. Ésta última se obtuvo de la literatura (Goche-Télles *et al.*, 2003). Para estimar la biomasa se empleó la siguiente fórmula:

$$B = V \cdot D_m$$

donde  $B$  es la biomasa (Kg),  $V$  es el volumen del árbol ( $m^3$ ) y  $D_m$  es la densidad de la madera ( $Kg \cdot m^3$ ).

#### ***Estimación del contenido de carbono.***

Una vez calculada la biomasa de cada árbol, ésta se multiplicó por la concentración de carbono determinada por Figueroa (2010) para *P. patula*, aplicando esta fórmula:

$$CA = B \cdot cC$$

donde  $CA$  es el carbono almacenado (Kg),  $B$  es la biomasa (Kg) y  $cC$  es la concentración de carbono.

#### ***Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono.***

Se colectaron cuatro muestras de troncos en el bosque conservado, tomando en cuenta que el DAP fuese mayor de 30 cm y que estuviera libre de plagas y enfermedades; con el fin de

evaluar el crecimiento diamétrico por año de los árboles. Para poder observar de manera clara los anillos de crecimiento, las muestras se lijaron con lija de papel del grano mayor al menor (medidas 150, 360 y 600). Finalmente, se contó el número de los anillos de crecimiento y se midió su anchura con la ayuda del software WINDENDRO 2003.

Para conocer el efecto del manejo forestal sobre el almacén de carbono, se realizó un análisis de varianza a través de una prueba “t” de student, con un nivel de significancia ( $p < 0.05$ ) para detectar diferencias significativas entre el crecimiento diamétrico de las muestras de troncos y el de las plantaciones.

#### ***Determinación de las propiedades hídricas del suelo.***

Dentro de las parcelas de muestreo (0.1 ha) se ubicaron tres puntos de muestreo donde se realizaron mediciones *in situ* con el Permeámetro Guelph 2800k1 (Figura 3b), el cual determina la cantidad de agua que puede absorber el suelo por unidad de tiempo.

Se utilizaron dos cargas hidráulicas de 5 y 10 cm, para evaluar la infiltración, conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) y el potencial de flujo mátrico ( $\Phi_m$ ); en cada una se registró la velocidad a la que disminuye el agua del reservorio, hasta obtener un valor constante.

Posteriormente, se estandarizaron los valores en  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , con las siguientes formulas:

$$R1' = R1/60$$

$$R2' = R2/60$$

donde  $R1'$  es la lectura constante a nivel de 5 cm ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $R2'$  es la lectura constante a nivel de 10 cm ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

La determinación de la *conductividad hidráulica saturada* se realizó con la siguiente fórmula:

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

donde  $K_{fs}$  es la conductividad hidráulica saturada,  $a$  es igual a 0.0041,  $b$  es igual a 0.0054,  $R1'$  es la lectura constante a nivel de 5 cm y  $R2'$  es la lectura constante a nivel de 10 cm.

La fórmula que se utilizó para evaluar *el potencial de flujo mátrico* fue:

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

donde  $c$  es igual a 0.0572,  $d$  es igual a 0.0237,  $R1'$  es la lectura constante a nivel de 5 cm y  $R2'$  es la lectura constante a nivel de 10 cm.

La *densidad aparente* se obtuvo por el método del cilindro (González-Vargas, 2011), el cual consiste en la toma de una muestra inalterada de suelo con un cilindro de cobre con volumen conocido. La muestra se trasladó al laboratorio para ser secada en una estufa a 105° C, hasta obtener un peso constante con el propósito de conocer el peso del suelo seco y relacionarlo con el volumen de la muestra de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Da=M_{ss}*V_s-1$$

donde  $Da$  es la densidad aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $M_{ss}$  es la masa de suelo seco (g), y  $V_s$  es el volumen del suelo ( $\text{cm}^3$ ).

El *Contenido de humedad del suelo* se determinó con el método del cilindro, igual que la densidad aparente, para establecer una relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una masa determinada de suelo y el peso del suelo seco:

$$CH= (Ma/M_{ss}) * 100$$

donde  $CH$  es el contenido de humedad (%),  $Ma$  peso del agua existente en la masa del suelo (g),  $M_{ss}$  es peso del suelo seco (g).

Finalmente, la *hidrofobicidad* se evaluó por el método WDPT. Se colocaron tres gotas de agua en la superficie del suelo para después registrar el tiempo que le toma a la gota penetrar completamente el suelo (Bisdorn *et al.*, 1993; Zavala *et al.*, 2010).

### ***Determinación de propiedades químicas***

En todos los sitios, dentro de las parcelas de muestreo, se recolectaran dos muestras alteradas, a profundidades de 0-2.5 y 2.5-5 cm, ya que es donde las propiedades hídricas y químicas del suelo son afectadas por cambios de uso de suelo (Buckzo *et al.*, 2006).

Las muestras se secaron en el laboratorio a temperatura ambiente, se tamizaron en una malla de 2 mm y se realizaron las determinaciones siguientes: pH, por medio del método electrométrico, en una mezcla de suelo y agua con relación 1:2; materia orgánica a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkey y Black; nitrógeno total con el método semimicro-kjeldahl; fósforo disponible por el método de Bray y Kurtz para suelos ácidos y neutros; así como cationes intercambiables con el método de extracción con acetato de amonio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>)1N pH 7 y cuantificación por absorción atómica y fotometría de llama; hierro y aluminio por el método Merha y Jackson (DOF, 2002).

### ***Efecto del manejo forestal sobre el servicio ambiental hidrológico.***

Para conocer el efecto del manejo forestal sobre el servicio ambiental hidrológico, se realizó un análisis de varianza, mediante una prueba “t” de student, con un nivel de significancia (p<0.05) para detectar diferencias significativas en las propiedades hídricas y químicas del suelo entre las plantaciones de diferente edad y el bosque conservado.

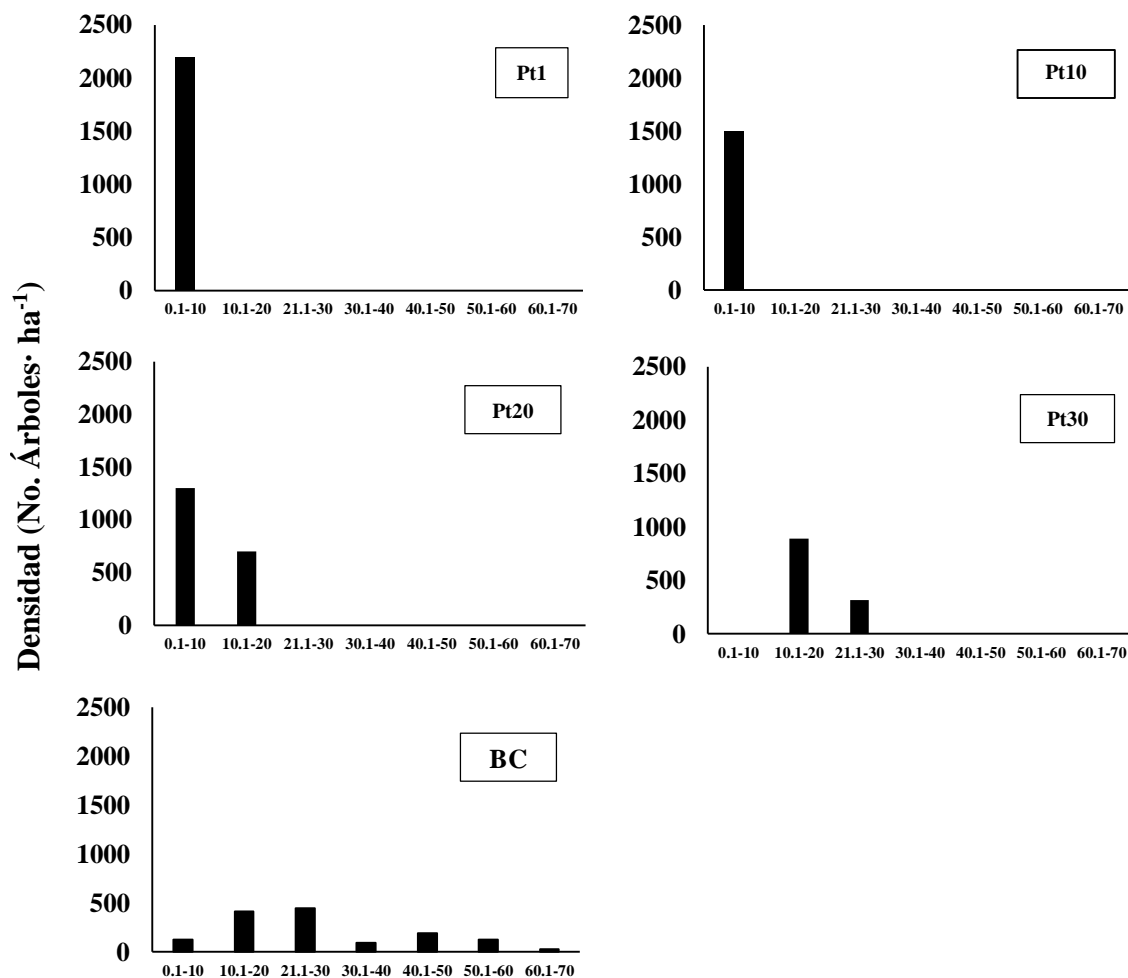


Figura 3. Inventario y medición *in situ* de la infiltración con el Permeámetro Guelph 2800K.



## RESULTADOS

### Análisis estructural.



### Clases diamétricas (cm)

Figura 4. Estructura diamétrica de *Pinus patula* en plantaciones de diferente edad y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo; (Pt1=Plantación de 1 año; Pt10=Plantación de 10 años; Pt20=Plantación de 20 años; Pt30=Plantación de 30 años y BC=Bosque conservado).

### ***Clases diamétricas.***

La Figura 4 muestra que *P. patula* tarda aproximadamente 20 años en presentar un diámetro mayor de 10 cm. Los diámetros promedio, en Pt1 y Pt10, fueron 0.43 ( $\pm 0.13$ ) y 1.5 ( $\pm 0.71$ ) cm; y presentaron una densidad de 2196 y 1496 árboles·ha<sup>-1</sup>. En Pt20, se presentaron dos clases diamétricas cuyos promedios fueron 7.5 ( $\pm 2.11$ ) y 13 ( $\pm 1.27$ ) cm, respectivamente, con densidades de 1305 (65%) y 700 (35%) árboles·ha<sup>-1</sup>. En Pt30 se registraron dos categorías diamétricas con promedios de 15.6 ( $\pm 2.44$ ) y 22.8 ( $\pm 1.73$ ) cm, con una densidad de 891 (74%) y 318 (26%) árboles·ha<sup>-1</sup> respectivamente. En el BC se registraron todas las categorías diamétricas y presentó una densidad de 1432 árboles·ha<sup>-1</sup>. Se observaron 446 árboles (31%) con DAP promedio de 24.4 ( $\pm 2.40$ ) cm; 414 árboles (28.9%) con 16.8 ( $\pm 3.34$ ) cm; 191 árboles (13.3%) con 45.5 ( $\pm 3.81$ ) cm; 127 árboles (8.9%) con 54 ( $\pm 0.64$ ) cm; 127 árboles (8.9%) con 70 ( $\pm 1.00$ ) cm.

### ***Distribución de alturas de plantas.***

La Figura 5 muestra que *P. patula* tarda 20 años en alcanzar una altura mayor de 10 m. En Pt1 y Pt10, se registró un intervalo de altura; la altura promedio fue de 0.24 ( $\pm 0.09$ ) y 1.7 ( $\pm 0.88$ ) m, respectivamente. En Pt20 se registraron tres intervalos de altura: 5 ( $\pm 0.81$ ), 9 ( $\pm 1.02$ ) y 12 ( $\pm 0.83$ ) m; distribuidas de la siguiente manera 32 (1%), 859 (43%), y 1114 (56%) individuos·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En la Pt30 se presentaron dos intervalos de altura: 637 árboles (53%) con altura de 13.2 ( $\pm 1.25$ ) m y 573 árboles (47%) con altura de 17.3 ( $\pm 1.20$ ) m. Mientras que el BC registro siete intervalos: 10 ( $\pm 0.64$ ), 13.2 ( $\pm 1.37$ ), 17.6 ( $\pm 1.46$ ),

21.75 ( $\pm 0.95$ ), 27.7 ( $\pm 1.25$ ), 31.5 ( $\pm 1.00$ ) y 39 ( $\pm 0.64$ ) m, con densidades de 159 (11%), 191 (13%), 573 (40%), 127 (9%), 223 (16%), 127 (9%) y 32 (2%) árboles·ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

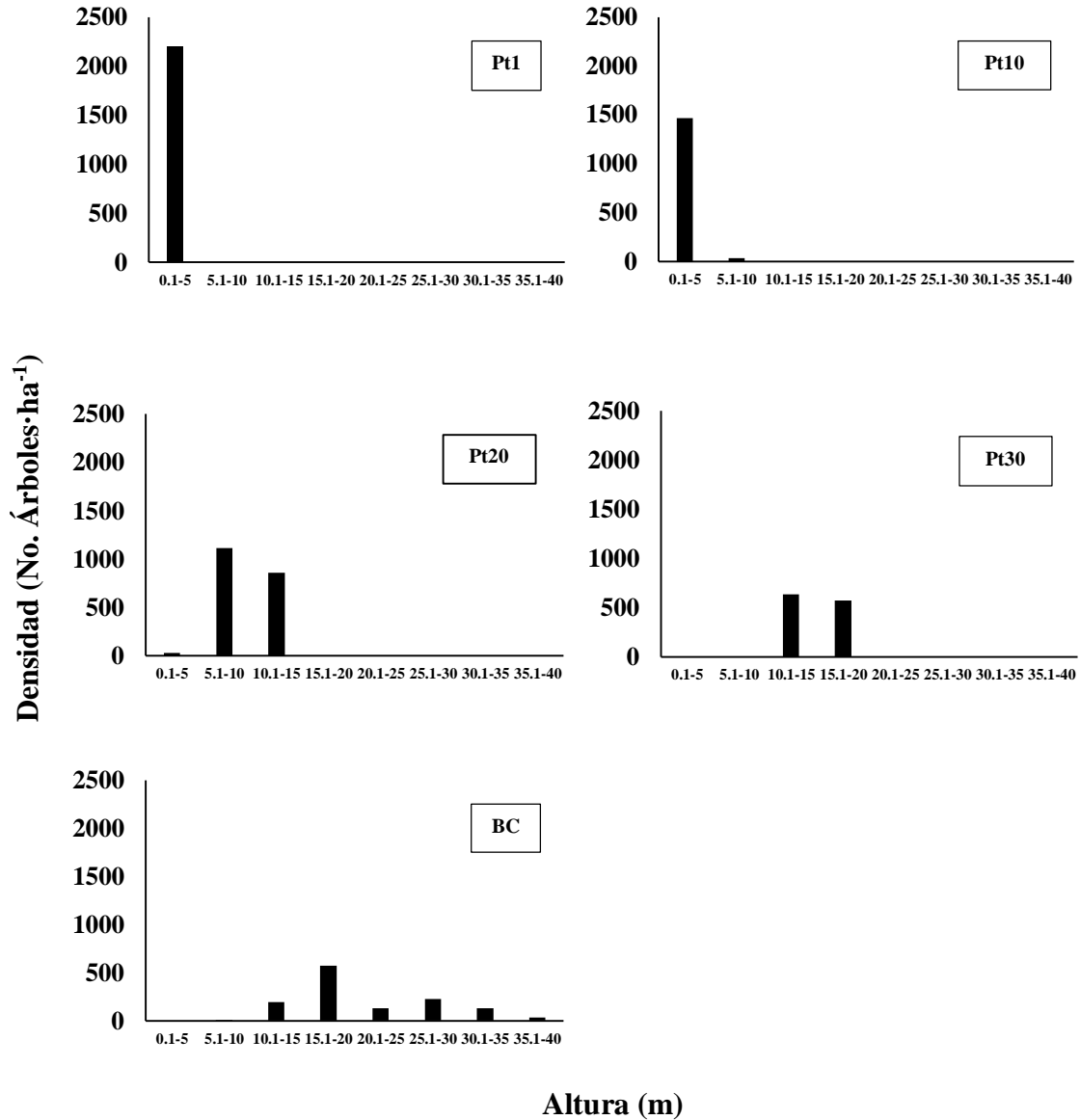


Figura 5. Altura de *Pinus patula* en plantaciones de diferente edad y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo; (Pt1=Plantación de 1 año; Pt10=Plantación de 10 años; Pt20=Plantación de 20 años; Pt30=Plantación de 30 años; BC=Bosque conservado).

## ***Biomasa***

La biomasa fue de 0.002, 0.20, 41.23 y 119.85 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El BC fue el sitio con el valor más alto de biomasa, se estimaron 712.96 Mg·ha<sup>-1</sup> en árboles de *P. patula* (Cuadro 3), en esta porción del ejido es donde están los árboles con los diámetros y alturas más grandes (>25 cm de DAP y >20 m de altura). En Pt1, Pt10, Pt20 y Pt30 se registró una densidad de 2196, 1496, 2005 y 1210 individuos·ha<sup>-1</sup>; y el bosque sin intervención presentó 1432 individuos·ha<sup>-1</sup>. La densidad en Pt10 disminuye debido a la presencia de otras especies como *Litsea glauscences* (80%) y *Abies religiosa* (5%).

Cuadro 3. Estimación de biomasa y contenido de carbono en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo.

Sitio	Densidad	Volumen	D <sub>m</sub>	Biomasa	Contenido de C
	Arboles·ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup>	Kg·m <sup>-3</sup>		Mg·ha <sup>-1</sup>
BC	1432	1425.92	500	712.96	356.48
Pt1	2196	0.005	500	0.002	0.001
Pt10	1496	0.40	500	0.20	0.10
Pt20	2005	82.46	500	41.23	20.62
Pt30	1210	239.71	500	119.85	59.93

D<sub>m</sub>=Densidad de la madera; BC=Bosque sin intervención, Pt1=Plantación de 1 año, Pt10=Plantación de 10 años, Pt20=Plantación de 20 años y Pt30=Plantación de 30 años.

## ***Contenido de carbono.***

En la Figura 6 y el Cuadro 3 se observa que el contenido de carbono aumenta gradualmente conforme a la edad de las plantaciones. Así mismo, que el mayor contenido de carbono se presenta en el BC con 356 Mg C·ha<sup>-1</sup>, seguido de Pt30 con 59.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>, después Pt20 con 20.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>, Pt 10 registró 0.1 Mg C·ha<sup>-1</sup> y Pt1 presentó 0.001 Mg C·ha<sup>-1</sup>.

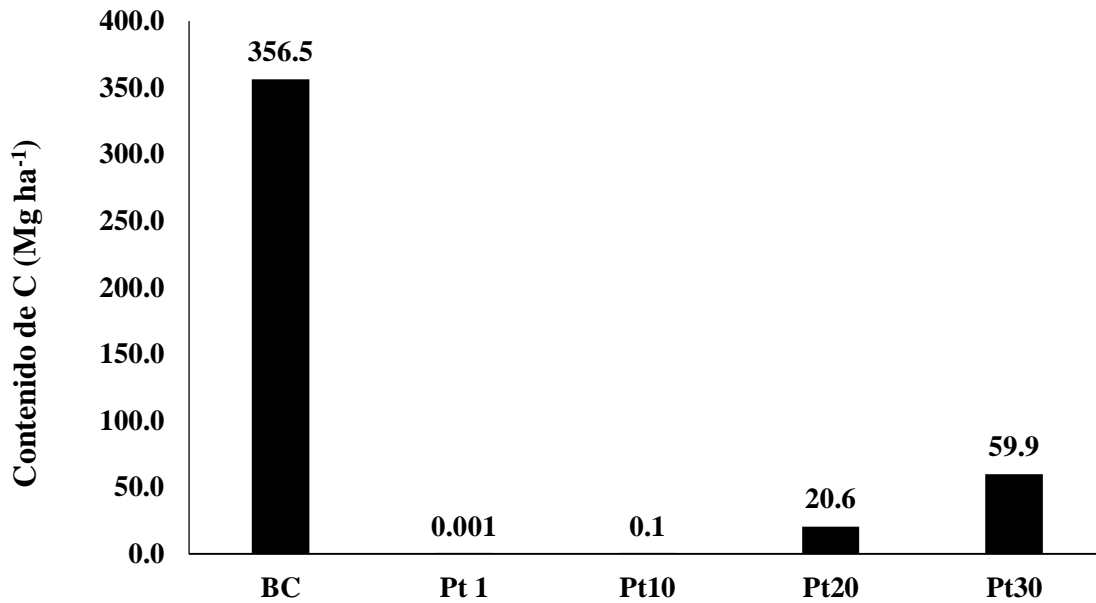


Figura 6. Contenido de carbono en plantaciones de *Pinus patula* y un bosque conservado en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo; (BC=Bosque conservado; Pt1=Plantación de 1 año; Pt10=Plantación de 10 años; Pt20=Plantación de 20 años; Pt30=Plantación de 30 años).

***Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono.***

La Figura 7 muestra el crecimiento anual de diámetro del fuste en árboles de *P. patula* del bosque conservado y de las plantaciones. Aunque se aprecia que las curvas y los puntos son similares en el crecimiento diamétrico. Sin embargo, hay una reducción significativa ( $P \leq 0.05$ ) al comparar el crecimiento diamétrico de las muestras de troncos del BC con el de las plantaciones (Figura 7).

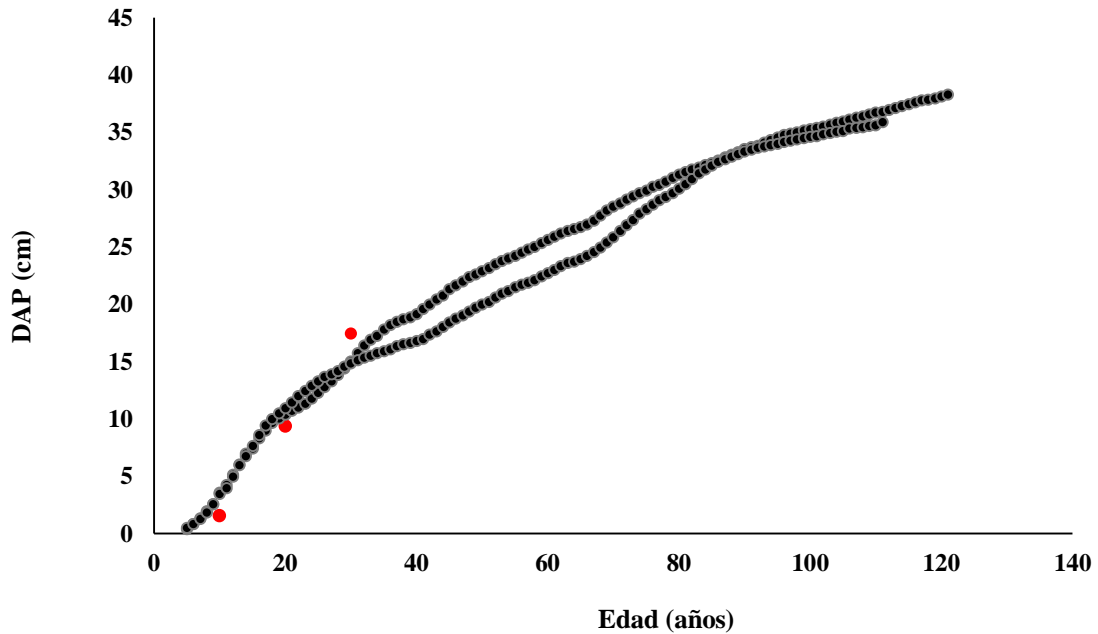


Figura 7. Crecimiento diamétrico en muestras de troncos de árboles de *Pinus patula* en bosques sin intervención (negro) y en plantaciones de diferente edad (rojo).

La forma de la curva de crecimiento es típica de los bosques (Figura 7). Inicialmente, la tasa de crecimiento aumenta con el tiempo hasta alcanzar un desarrollo máximo para después comportarse de manera constante (West, 2006).

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

*Tasa de infiltración.* Se registró una tasa de infiltración altamente variable. En el BC la tasa de infiltración se incrementa con la profundidad, de  $444 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  en la parte superficial, a  $677.14$  y  $2790 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  en los 5 y 10 cm de profundidad, respectivamente (Cuadro 4).

La infiltración superficial (0 a 2.5 cm) tiende a disminuir drásticamente de 444 mm·h<sup>-1</sup> en el BC a 50.29 mm·h<sup>-1</sup> en Pt20. Mientras que la infiltración a los 5 cm de profundidad varió de 677.14 (±393.83) a 176.5 (±28.63) mm·h<sup>-1</sup>.

La infiltración a 10 cm de profundidad presentó valores menores en las plantaciones, con respecto al BC y son estadísticamente significativos: 2790 (±127.27), 1509.6 (±751.02), 250 (±98.99), 240 (±133.63) y 394.20 (±223.17) mm·h<sup>-1</sup> para BC, Pt1, Pt10, Pt20 y Pt30, respectivamente.

*Conductividad hidráulica (K<sub>fs</sub>).* El sitio con el valor más alto fue el BC con 317.30 (±23.2) mm·h<sup>-1</sup>. Está se reduce en las plantaciones. En Pt30, Pt20, Pt10 y Pt1 se registraron 139.96 (±101.58), 31.28 (±23.69), 11.80 (±11.3) y 33.01 (±24.36) mm·h<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 4).

El *potencial de flujo mátrico* varió de -0.04 a 0.0024 cm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> presentes en Pt1 y Pt10.

*Densidad aparente.* El valor más alto fue 0.59 g·cm<sup>-3</sup> presente en la Pt20 y el valor más bajo con 0.28 g·cm<sup>-3</sup> en la Pt1 (Cuadro 4).

*Contenido de humedad del suelo.* El BC presentó 21.43% de humedad. El valor más alto se registró en Pt10 con 32.73% y el más bajo en Pt1 con 8.92% (Cuadro 4).

*Hidrofobicidad.* Todos los sitios, incluido el BC, resultaron ser extremadamente repelentes al agua de acuerdo a la clasificación utilizada por Bisdom *et al.* (1993) y Zavala *et al.* (2010), ya que el tiempo de absorción de una gota fue mayor a 3600 s (Cuadro 4).

Cuadro 4. Propiedades hídricas del suelo (media  $\pm$  desviación estándar) de un bosque sin intervención y plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México.

Sitio	Infiltración			$K_f$ mm h <sup>-1</sup>	Densidad aparente g cm <sup>-3</sup>	Contenido de humedad %	Hidrofobicidad	
	mm h <sup>-1</sup>						s	
	Profundidad						profundidad	
2.5 cm	5 cm	10cm	0-2.5 cm	2.5-5 cm				
<b>BC</b>	444.00 $\pm$ 473.36	677.14 $\pm$ 393.83	2790.00 $\pm$ 127.27	317.30 $\pm$ 23.22	0.44 $\pm$ 0.01	21.43	>3600	>3600
<b>Pt1</b>	885.25 $\pm$ 465.05	410.29 $\pm$ 110.52	1509.60 $\pm$ 751.02	139.96 $\pm$ 101.58	0.28 $\pm$ 0.08	8.92	>3600	>3600
<b>Pt10</b>	ND	224.00 $\pm$ 235.69	250.00 $\pm$ 98.99	31.28 $\pm$ 23.69	0.43 $\pm$ 0.06	32.73	60	>3600
<b>Pt20</b>	50.29 $\pm$ 51.46	176.50 $\pm$ 28.63	240.00 $\pm$ 133.63	11.80 $\pm$ 11.3	0.59 $\pm$ 0.26	22.51	>3600	>3600
<b>Pt30</b>	502.71 $\pm$ 1.81	199.93 $\pm$ 111.25	394.20 $\pm$ 223.17	33.01 $\pm$ 24.36	0.44 $\pm$ 0.01	21.43	>3600	<5

BC=Bosque sin intervención, Pt1=Plantación de 1 año, Pt10=Plantación de 10 años, Pt20=Plantación de 20 años, Pt30=Plantación de 30 años.



### ***Propiedades químicas.***

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de las propiedades químicas y en la Figura 8a y 8b, el nivel en que se encuentran de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

El *pH* de todos los sitios es catalogado como fuertemente ácido ( $\text{pH} < 5$ ).

*Materia orgánica del suelo.* En el BC, Pt1, Pt10 y Pt20 se registraron valores considerados muy altos (17.71 a 42.65%). Sin embargo, en Pt30 disminuye a un nivel medio (9.76%) (DOF, 2002).

*Nitrógeno total.* El porcentaje de nitrógeno varió de 0.02 a 0.09 %. Todos los sitios presentaron un nivel bajo (DOF, 2002).

*Fosforo disponible.* El valor más alto se registró en Pt1 con  $3.46 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  y el más bajo en Pt10 con  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ . Tanto el BC como las plantaciones tienen un nivel bajo (DOF, 2002).

*Cationes intercambiables.* El  $\text{Ca}^{2+}$  presentó un nivel medio, en BC y Pt10, al registrar  $0.46$  y  $5.38 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ , respectivamente. En Pt1, Pt20 y Pt30 se encontró un nivel bajo al presentar  $3.33$ ,  $3.92$  y  $3.12 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ , cada una (DOF, 2002). El  $\text{Mg}^{2+}$  obtuvo un nivel medio en BC, Pt20 y Pt30 con  $2.32$ ,  $1.44$  y  $2.09 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ , respectivamente; mientras que en Pt1 y Pt10 presentó un nivel bajo con  $1.11$  y  $1.08 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ . El  $\text{K}^{+}$  se encuentra en un nivel medio en la mayoría de los sitios con  $0.55$ ,  $0.54$ ,  $0.47$  y  $0.40 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$  presentes en Pt1, BC, Pt20 y Pt10 respectivamente; excepto en Pt30, donde el nivel es alto al registrar  $1.14 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ . (DOF, 2002). El  $\text{Na}^{+}$ , registró valores ( $0.21$  a  $0.31 \text{ cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$ ) similares a los encontrados en otros suelos bajo pino (Ávila, 2011 y Jiménez-Cruz, 2011).

Cuadro 5. Propiedades químicas del suelo en un bosque sin intervención y plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México.

Sitio	pH	CO	MOS	N <sub>tot</sub>	P <sub>disp</sub>	Cationes intercambiables				Al	Fe
						Ca	Mg	K	Na		
		%		mg Kg <sup>-1</sup>		cmol Kg <sup>-1</sup>			%		
<b>BC</b>	4.25 (±0.35)	17.89 (±9.68)	30.84 (±16.70)	0.07 (±0.06)	0.46 (±0.14)	7.57 (±10.1)	2.32 (±2.23)	0.54 (±0.40)	0.31 (±0.09)	0.76 (±0.25)	0.78 (±0.93)
<b>Pt1</b>	3.7 (±0.70)	24.48 (±3.94)	42.21 (±6.80)	0.07 (±0.04)	3.46 (±4.09)	3.33 (±4.02)	1.11 (±1.02)	0.55 (±0.59)	0.26 (±0.06)	0.74 (±0.18)	0.31 (±0.26)
<b>Pt10</b>	5 (±0.42)	10.27 (±8.61)	17.71 (±14.84)	0.09 (±0.03)	0.49 (±0.39)	5.38 (±3.22)	1.08 (±0.34)	0.47 (±0.33)	0.24 (±0.03)	0.67 (±0.03)	0.27 (±0.13)
<b>Pt20</b>	4 (±0.00)	24.74 (±7.17)	42.65 (±12.37)	0.08 (±0.06)	1.16 (±0.54)	3.92 (±1.67)	1.44 (±0.62)	0.40 (±0.26)	0.21 (±0.01)	0.76 (±0.00)	0.22 (±0.00)
<b>Pt30</b>	4.7 (±0.28)	5.66 (±1.00)	9.76 (±1.74)	0.02 (±0.00)	2.90 (±1.03)	3.12 (±0.66)	2.09 (±0.12)	1.14 (±0.03)	0.28 (±0.00)	0.59 (±0.20)	0.63 (±0.19)

BC= Bosque sin intervención, Pt1=Plantación 1 año, Pt10=Plantación 10 años, Pt20=Plantación 20 años, Pt30=Plantación 30 años.

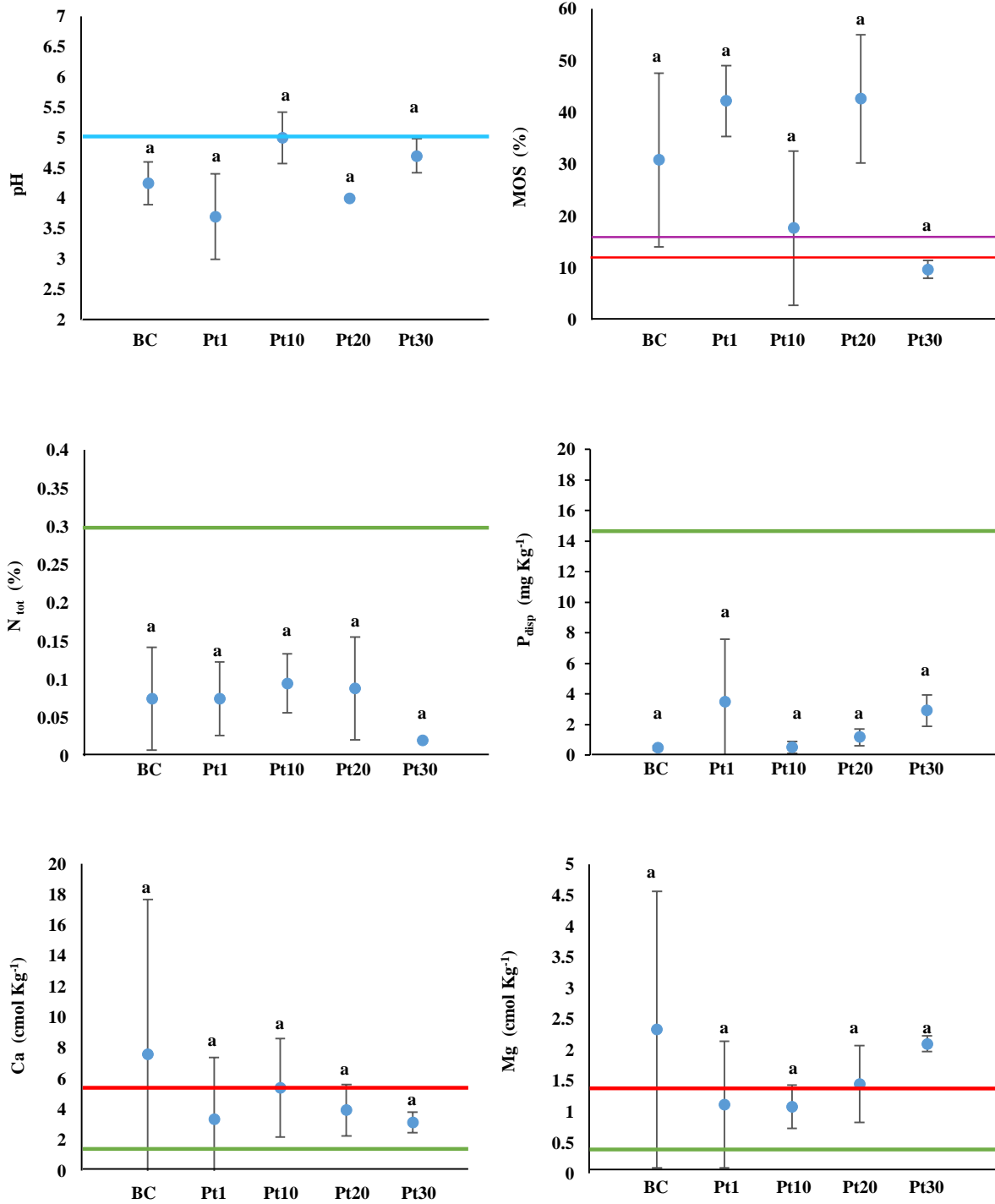


Figura 8a. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 de los suelos de un bosque conservado (BC) y plantaciones de *Pinus patula* con diferente edad (Ptaños) en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México; (azul=fuertemente ácido; Morado=Muy alto; Rojo=Media; Verde=Bajo).

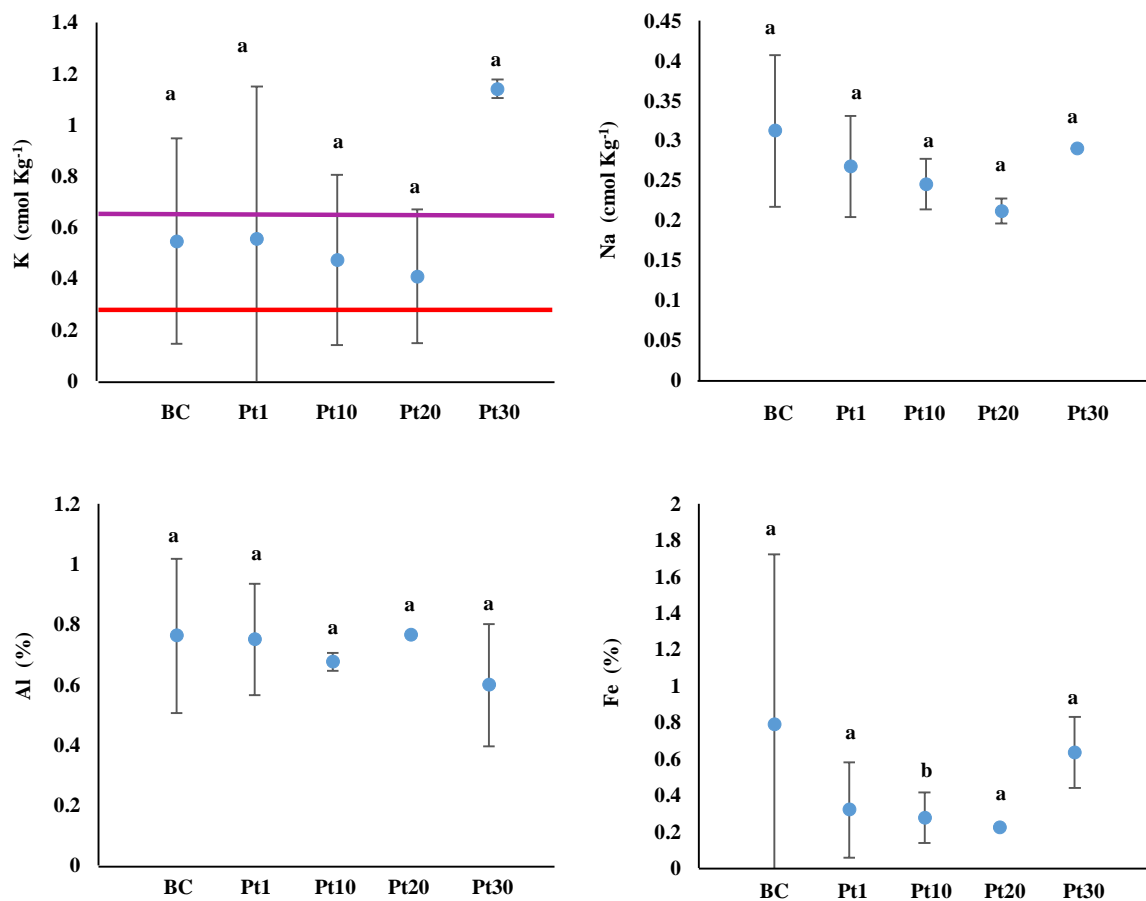


Figura 8b. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 de los suelos de un bosque conservado (BC) y plantaciones de *Pinus patula* con diferente edad (Ptaños) en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo, México; (Morado=Alto y Rojo=Media).

### ***Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas.***

*Tasa de infiltración.* Esta propiedad tiende a disminuir en las plantaciones con respecto al BC en todos los casos. Sin embargo, a nivel superficial (0-2.5 cm) y a los 5 cm de profundidad no presenta diferencias significativas. Aunque, a los 10 cm se observa una reducción significativa del 47 al 96 % con relación al BC (Figura 9).

La  $K_{fs}$  se redujo significativamente en un 47, 90, 96 y 90 % en Pt1, Pt10, Pt20 y Pt30 respectivamente, comparadas con el BC ( $P \leq 0.05$ ) (Figura 9).

El aprovechamiento forestal no afecta la *densidad aparente* y el *contenido de humedad* ya que no se presentaron diferencias significativas al comparar la muestra de las plantaciones con el BC.

Las propiedades químicas del suelo, pH, materia orgánica, nitrógeno total, fosforo disponible y cationes intercambiables ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ ), no son afectadas por el manejo forestal, ya que no hubo diferencias significativas entre los sitios (Figuras 8a y 8b).

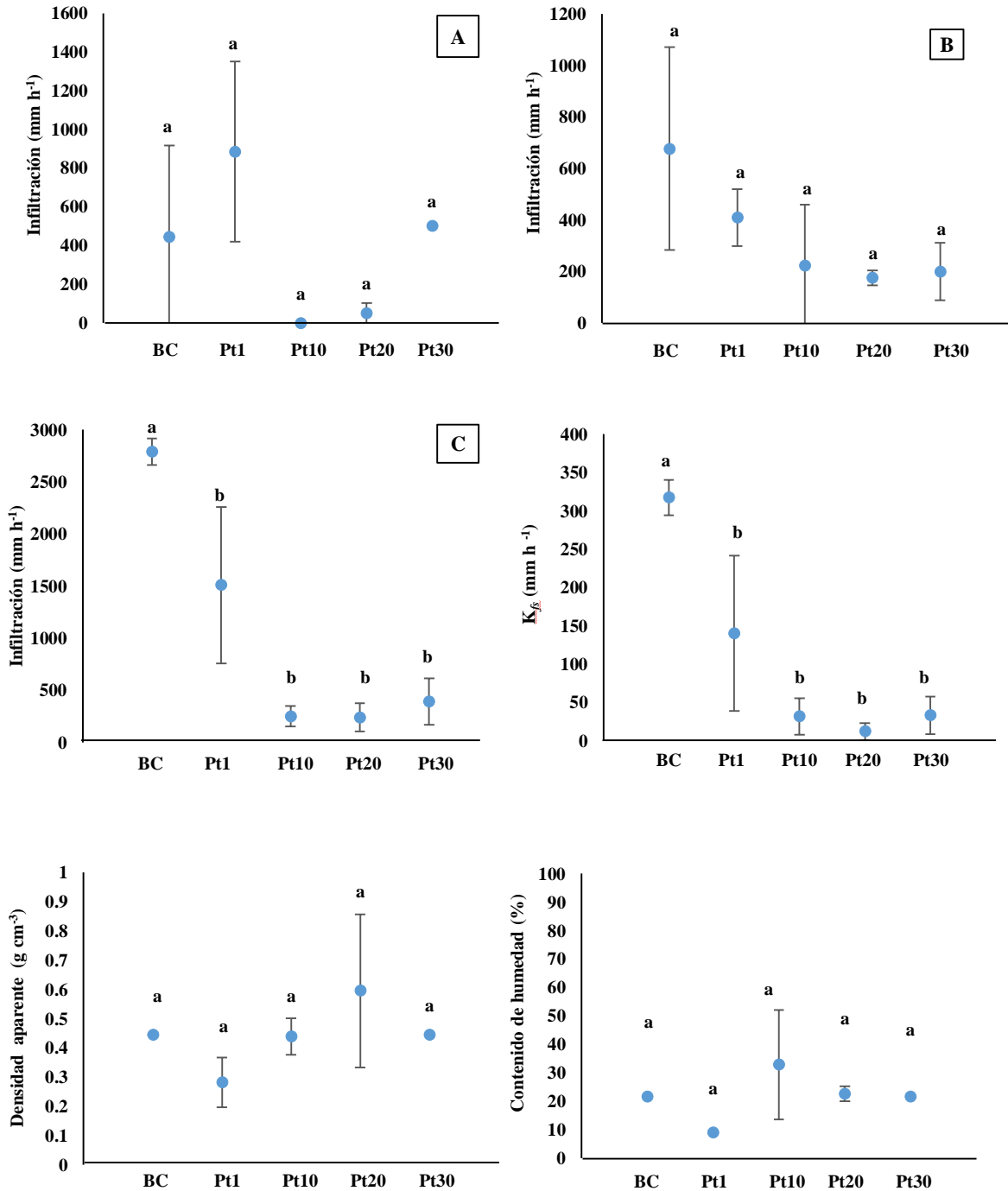


Figura 9. Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas del suelo en un bosque conservado (BC) y plantaciones de *Pinus patula* con diferente edad (Pt años) en el ejido San Pedro Huixotitla, Mineral del Monte, Estado de Hidalgo; (A=Infiltración a los 2.5 cm, B=Infiltración a los 5 cm y C=Infiltración a los 10 cm de profundidad).

## DISCUSIÓN

### *Análisis Estructural.*

En el bosque conservado los árboles de *P. patula* mostraron una distribución de clases diamétricas desde < 10 cm hasta 70 cm de diámetro; y es predominante la clase de 20 a 30 cm. La presencia de individuos de 70 cm de DAP indica que este bosque tiene una edad aproximada de 120 años con una altura máxima de 40 m. Esto coincide con Gillespie (1992) quien señala que esta especie alcanza un diámetro máximo de 1 m y hasta 40 m de altura.

En las plantaciones la estructura diamétrica, indica que estos bosques requieren de al menos 20 años para alcanzar DAP mayores de 10 cm; y de 30 años para alcanzar los 15 cm de DAP y una altura de 20 m. Lo mismo ocurre en los bosques sin manejo forestal.

### *Biomasa*

En este estudio se estimó la biomasa de los árboles en pie utilizando ecuaciones volumétricas, la densidad de la madera para determinar el peso seco y un coeficiente mórfico para determinar la biomasa total del árbol. La acumulación de biomasa siguió un patrón creciente con relación a la edad de las masas forestales.

La biomasa del BC está por encima de lo registrado para otros bosques de pino sin manejo forestal. Moreno-Cano (2010) estimó 414.1 Mg·ha<sup>-1</sup> en bosques de *P. hartwegii*. Ordóñez *et al.* (2008) obtuvieron 445.8 Mg·ha<sup>-1</sup> en bosques de pino. Sin embargo, en las plantaciones es menor que en otros sitios con producción forestal de *P. patula*. Figueroa

(2011) registró 65.42, 87.35 y 184.03 Mg·ha<sup>-1</sup> en rodales de 12, 20 y 28 años, respectivamente, en Zacualtipán, Hidalgo. Gutiérrez y Lopera (2001) midieron 87.2 y 446 Mg·ha<sup>-1</sup> en plantaciones comerciales de 6 y 29 años, en Chile.

Estas variaciones dependen principalmente de la adaptación de los árboles a condiciones ambientales tales como la disponibilidad de agua en la estación de crecimiento y temperatura del mes más frío, a la exposición solar y a las condiciones del suelo, las cuales varían de una localidad a otra; así como, a las prácticas silvícolas y a la metodología empleada para estimar esta variable (Figueroa, 2011; West, 2006; Harold y Hocker, 1984).

### ***Contenido de carbono.***

El carbono almacenado en árboles de *P. patula* en el BC fue de 356.5 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Esta cantidad de carbono es similar a la determinada por De Jong (2001), en los Altos de Chiapas, donde registró 463.4, 340.7 y 318.3 Mg C·ha<sup>-1</sup> en bosques de Encino, Pino-Encino y Pino, respectivamente.

Cuadro 6. Contenido de carbono en bosques templados.

Bosques	Densidad	Contenido de C	Autor
	árboles·ha <sup>-1</sup>	Mg·ha <sup>-1</sup>	
<i>Pinus patula</i>	1492	356.5	Presente estudio
<i>Pinus hartwegii</i>	900	207.05	Moreno-Cano, 2010
Pino	ND	222.9	Ordoñez <i>et al.</i> , 2008
Pino-Encino	ND	220.7	
<i>Cedrus deodora</i>	850	245.31	Sharma <i>et al.</i> , 2010



En contraste, el Cuadro 6 muestra que el contenido de carbono del BC es superior a lo estimado en otros bosques templados. Esto se atribuye a que *Pinus patula* es una especie de rápido crecimiento y de mayor tamaño. El incremento anual promedio de esta especie alcanza su máximo entre los 14 y 18 años de edad (Gillespie, 1992); mientras que *P. hartwegii* tiene un potencial de crecimiento reducido (Viveros-Viveros *et al.*, 2007). Además, los otros estudios presentan menor densidad arbórea.

Con respecto a las plantaciones de *P. patula*, la productividad y el contenido de carbono es menor comparado con los registrados por Figueroa (2010) en plantaciones en Zacualtipán, Hidalgo (Cuadro7). La baja productividad no se puede atribuir al clima porque la temperatura media anual, la precipitación y la evaporación son similares (CNA, 2013).

Cuadro 7. Contenido de carbono ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en bosques manejados de *Pinus patula*.

Edad	Presente estudio	Densidad	Figueroa , 2010	Densidad
años	Mineral del Monte, Hgo.	Arboles·ha <sup>-1</sup>	Zacualtipán, Hgo.	Arboles·ha <sup>-1</sup>
10	0.1	1496	35.05	4575
20	20.62	2005	46.67	3242
24	ND	ND	86.4	1632
30	59.93	1210	ND	ND

### ***Efecto del manejo forestal sobre el contenido de carbono***

El contenido de carbono en las plantaciones es menor que en el BC. De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la baja productividad se atribuye a la hidrofobicidad presente en San Pedro Huixotitla, esta condición impide la humectación del suelo, provocando menor disponibilidad de agua para los árboles, afectando su crecimiento. Al

respecto, Holland y Rolfe (1997) mencionan que de todos los factores ambientales que influyen en el crecimiento de los árboles, la humedad es el factor más limitante.

Otro factor que disminuye el crecimiento y por tanto la cantidad de carbono en los árboles es el contenido de nutrimentos presentes en el suelo. Las plantaciones de San Pedro Huixotitla, en su mayoría resultaron ser deficientes de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Figura 8a y 8b y Cuadro 5), lo que explica el bajo crecimiento de las plantaciones. De acuerdo con Gillespie (1992) *P. patula* no tiene buen crecimiento en suelos poco profundos y deficientes en nutrimentos.

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

La infiltración en este estudio (50.29-1509.6 mm·h<sup>-1</sup>) es menor que lo registrado en otras plantaciones. Jiménez-Cruz (2011) determinó en plantaciones de *P. hartwegii* 6160 y 2916 mm·h<sup>-1</sup> a los 0 y 2.5 cm de profundidad. En tanto, Dueñez (2007) registró 1443.3-2676.4 mm·h<sup>-1</sup> en sitios con manejo forestal.

Asimismo, los valores registrados de  $K_{fs}$  (11.8-317.3 mm·h<sup>-1</sup>), son menores que los reportados por Castro (2009) en un bosque conservado de *P. hartwegii*, donde registró 489.6 mm·h<sup>-1</sup> y 684 mm·h<sup>-1</sup> en un bosque de *Abies-Quercus* con indicios de tala, en el Parque Nacional Izta-Popo; y que los de González-Vargas (2011), quien obtuvo 426 mm·h<sup>-1</sup> en un bosque de *Abies* en Parque Nacional Desierto de los Leones. Sin embargo, son similares a los reportados por Jiménez-Cruz (2011), quien reporta 8.88 mm·h<sup>-1</sup>, para suelos con una reforestación de *P. hartwegii* con problemas de crecimiento en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco.

La disminución de la  $K_{fs}$  e infiltración se atribuye al tipo de vegetación presente en los sitios. Sandoval *et al.* (2007) señalan que una óptima densidad y distribución espacial de las raíces, mejora la capacidad de extracción de agua y solutos por parte de las plantas; mientras que una alta concentración provoca una disminución en el movimiento vertical del agua dentro del perfil del suelo. Por otra parte, algunos autores determinaron que los disturbios ocurridos en el suelo como incendios o el cambio de uso llegan a provocar variabilidad en estas propiedades debido a la disminución del espacio poroso (Castro, 2009; Gómez-Tagle, 2009 y Jiménez-Cruz, 2011).

Otro factor importante y evaluado en este trabajo es la hidrofobicidad. Esta condición afecta los procesos hidrológicos y las propiedades hídricas del suelo, ya que reduce las tasas de infiltración, produce un flujo preferencial y heterogeneidad espacial en la infiltración; además disminuye la disponibilidad de agua en la zona de las raíces, y la función de la  $K_{fs}$  (Buckzo *et al.*, 2006).

La hidrofobicidad ha sido reportada en diferentes regiones, climas, tipos y usos de suelo por diversos investigadores (DeBano, 2000). En los bosques la hidrofobicidad está influida por el tipo de especies presentes en el sitio, la edad del bosque, la estación del año, el contenido de agua en el suelo, el contenido y tipo de materia orgánica, contenido de arcilla, historia de mojado y secado del suelo, temperatura, y de la humedad relativa del ambiente (Ritsema y Dekker, 1998; Doerr *et al.*, 2000; Zavala *et al.*, 2010; Lebron *et al.*, 2012).

La densidad aparente registro valores menores de  $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , propio de los Andosoles. Esto concuerda con lo encontrado en otros estudios realizados bajo bosques de coníferas

(Schlatter y Otero 1995; Ángeles, 2010; González-Vargas, 2011; Jiménez-Cruz, 2011; Muñoz-Villers *et al.* 2011).

### ***Propiedades químicas***

La acidez de estos suelos, *pH* menor de 5, es común en suelos bajo pinos. Al respecto, Pritchett (1991) menciona que la mayoría de los suelos forestales se encuentran en una escala de 3.5 a 6.5. De acuerdo con Zhang *et al.* (2010) la presencia de pinos incrementa la acidez del suelo y asociada a ésta se alteran procesos edáficos como: hidrólisis ácida, lixiviación de cationes básicos, nitrificación y actividad fúngica. Lo que coincide con Jiménez-Cruz (2011) al señalar que la acidez del suelo limita la disponibilidad de nutrimentos afectando el crecimiento de las plantas y favoreciendo la disponibilidad de aluminio, el cual es tóxico para las plantas. Además, Lebron *et al.* (2012) señala que la disminución del *pH* está relacionada con la severidad de la hidrofobicidad, ya que tanto las hojas de pino al descomponerse, como también los exudados de las raíces, producen sustancias ácidas e hidrófobas.

Los valores altos de *materia orgánica del suelo* corresponden al material relativamente inalterado, derivado de tejidos vegetales y animales, que se presenta en la superficie (FitzPatrick, 1980). Los altos contenidos de materia orgánica también están relacionados con la repelencia del suelo al agua. Al respecto, Becerra (2006) encontró en sitios bajo bosque nativo o en suelos poco intervenidos hidrofobicidad relacionada a altos contenidos de materia orgánica, señalando que el uso del suelo influye en las propiedades de la materia orgánica en diferentes formas: alterando el aporte anual que procede de la muerte de plantas y animales; y transformando el tiempo con que ésta se mineraliza.

El porcentaje de *nitrógeno total*, en todos los casos fue bajo. Las deficiencias de N son las que más se reportan en los bosques de coníferas, sobretudo en sitios de clima frío, ya que estas condiciones favorecen la acumulación de un manto espeso y ácido de humus (Pritchett, 1991).

El *fósforo* en suelos orgánicos es particularmente bajo, generalmente menos de una ppm, en el horizonte superficial. Este se pierde por percolación hacia horizontes inferiores, dejando solo una pequeña cantidad en los compuestos orgánicos. La cantidad disponible para las plantas resulta influida por varios factores, entre ellos la acidez; la presencia de hierro y aluminio solubles; el tipo de humus y su tasa de descomposición; así como las cantidades totales y formas de fósforo mineral en el suelo (Pritchett, 1991).

*Cationes intercambiables.* El  $\text{Ca}^{2+}$  es similar a lo reportado por Jiménez-Cruz (2011) en suelos bajo reforestaciones de *P. hartwegii* ( $5.06 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ); pero es inferior a lo registrado por Ávila (2011) en suelos bajo *P. montezumae* y *P. teocote* (34.73 y  $34.31 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ). Este elemento existe en los suelos en una forma inorgánica, y puede haber de 50 a 1000 ppm. Participa en el desarrollo de los tejidos meristemáticos, en el desarrollo de la raíz y del vástago y en la formación de proteínas (Pritchett, 1991).

El  $\text{Mg}^{2+}$  presento un nivel medio ( $1.08\text{-}2.32 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ), aunque por lo general se encuentra en cantidades elevadas en suelos forestales. Tal es el caso de Ávila (2011), quien registró  $6.77$  y  $6.37 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$  en suelos bajo pino. El  $\text{Mg}^{2+}$  es el único constituyente mineral de la molécula de clorofila, por lo que se convierte en un elemento esencial para la fotosíntesis (Pritchett, 1991).

El  $K^+$  presente en este estudio ( $0.4-1.14 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) es similar a lo registrado en suelos bajo reforestaciones de *P. montezumae* y *P. teocote* presentando  $1.01$  y  $0.77 \text{ cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , respectivamente (Ávila, 2011). El potasio se deriva de los feldespatos y las micas, existe en los suelos formando compuestos inorgánicos. Éste es básico para muchas actividades fisiológicas, entre ellas figura el metabolismo de los carbohidratos, la síntesis de proteínas, la activación de varias enzimas y la actividad de los tejidos meristemáticos.

La determinación de óxidos de *Al* y *Fe* se realiza para establecer los cambios químicos predominantes que se han llevado a cabo en la formación del suelo. Se ha indicado que en las etapas tempranas de la hidrólisis se pueden formar materiales amorfos que luego cristalizan gradualmente para producir sustancias nuevas o pueden ser translocadas dentro del suelo. Por tanto, el tipo, la cantidad y distribución de estos materiales se puede usar como criterio para medir el grado y tipo de formación del suelo (FitzPatrick, 1980).

### ***Efecto del manejo forestal sobre las propiedades hídricas.***

La infiltración a los 10 cm de profundidad y la  $K_{fs}$  disminuyeron en las plantaciones. Ambas mostraron una reducción significativa de un 47, 91, 96 y 90 % en Pt1, Pt10, Pt20 y Pt30, con relación al BC (Figuras 7 y Cuadro 4). Esto indica que en las plantaciones el agua presenta baja infiltración y baja conducción vertical, revelando problemas de erosión hídrica, poniendo en riesgo el servicio ambiental hidrológico.

La baja infiltración y la  $K_{fs}$  de los suelos en las plantaciones puede explicarse de la siguiente manera: Originalmente, estos sitios eran bosques de coníferas, los cuales fueron desmontados, exponiendo el suelo a deshidratación. De acuerdo con Ángeles (2010), los

Andosoles contienen minerales como imogolita, ferrihidrita, alófono y ópalo, que al ser expuestos a deshidratación por sequía o incendios pierden su capacidad para retener la humedad.

Asimismo, dentro de las prácticas forestales, se realizan quemas controladas que destruyen la materia orgánica del suelo, modificando la estabilidad de los agregados lo que afecta la infiltración y provoca erosión. Además, éstas prácticas inciden en la generación de pastizales. De acuerdo con Aldana (2012), los exudados de sus raíces también contribuyen a la hidrofobicidad y a la disminución del pH, con lo que se incrementa la disponibilidad  $Al^{3+}$  favoreciendo la formación de complejos con la materia orgánica, los cuales flocculan en el agua provocando la generación de escurrimientos superficiales. Al respecto, Doerr *et al.* (2000) señala que la hidrofobicidad puede reducir la infiltración, especialmente cuando está asociada con el fuego, ocasionando escorrentía superficial y la erosión de las laderas.

Por lo anterior, se recomienda incluir el diagnóstico de las propiedades hídricas del suelo con el fin de mejorar las prácticas silvícolas e incidir en la productividad forestal así como en los servicios ambientales. Además, conocer la cantidad de carbono almacenada, tanto en el BC como en las plantaciones, les ayudara a los ejidatarios a integrarse al mercado de bonos de carbono, con el que se beneficiaran económicamente, al aumentar sus ingresos anuales en un 53 %.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir:

- El contenido de carbono almacenado en el bosque conservado es significativamente mayor que el de las plantaciones, ya que en estas el almacén se redujo de 84 a 94%. Al presentar 59.9 y 20.6 Mg C·ha<sup>-1</sup> en Pt30 y Pt20, mientras que en el BC se registraron 356 Mg C·ha<sup>-1</sup> sólo en la fracción de *P. patula*.
- Las propiedades hídricas, infiltración y  $K_{fs}$ , son significativamente mayores en el bosque conservado que en las plantaciones. Éstas presentaron una disminución de un 47 hasta un 96%, indicando problemas de erosión hídrica. La  $K_{fs}$  y la infiltración en el BC fue 317.30 y 2790 mm·h<sup>-1</sup>, respectivamente. En tanto que en las plantaciones la  $K_{fs}$  varió de 139.96 a 11.8 mm·h<sup>-1</sup>; y la infiltración de 150.6 a 240 mm·h<sup>-1</sup>.
- La densidad aparente, el contenido de humedad, la hidrofobicidad y los nutrientes en las plantaciones presentaron valores similares a los del bosque conservado. Por lo que se concluye que el manejo forestal no afecta estas propiedades. Sin embargo, es evidente la persistencia de la hidrofobicidad en todos los sitios, condición que afecta los procesos hidrológicos y las demás propiedades hídricas.
- El manejo forestal afecta el servicio ambiental hidrológico y el de captura de carbono.



## RECOMENDACIONES

- Es necesario incluir el diagnóstico de las propiedades hídricas del suelo para mejorar las prácticas de manejo forestal e incidir en la productividad forestal así como en los servicios ambientales tanto de captura de carbono como en el servicio ambiental hidrológico.
- Debido a que la hidrofobicidad es un problema persistente en la zona de estudio se recomienda un estudio más detallado de esta condición, ya que tener una mejor comprensión del problema ayudara a encontrar una alternativa para corregirla y así mejorar las propiedades hídricas del suelo y el crecimiento de los árboles.
- Fomentar el manejo y aprovechamiento de los productos forestales no maderables con potencial de uso medicinal y culinario, como el laurel (*Litsea glauscences*).
- Promover el servicio ambiental de mantenimiento de la biodiversidad ya que en la zona existen especies amenazadas y sujetas a protección especial de acuerdo con la NOM-059SEMARNAT-2010.

## LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., Carrillo, A. F. y Díaz L. M., 2007. Carbono total en bosques de *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Tlaxco, Tlaxcala. En: Memorias en extenso del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales de la Sociedad Mexicana de Recursos Forestales. Morelia, Michoacán, 10 p.
- Aguirre, S.C., 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestro en Ciencias. Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 116 p.
- Aldana, P.S.E., 2012. Ecohidrología de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de Licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM. México, D.F., 69 p.
- Andréassian, V., 2004. Water and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291, 1–27.
- Ángeles, C.E., 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el Bosque de Oyamel. Tesis de Doctor en Ciencias. Postgrado de Botánica, Colegio de Postgraduados. Estado de México, México. 120 p.
- Azpeitia, C. A., 2007. Minerales de los distritos mineros metálicos Zimapán, Pachuca-Real del Monte, Molango y su aplicación didáctica. Monografía. Ingeniería Minero Metalúrgica, UAEH. Hidalgo, México. 99 p.
- Ávila, C.G., 2011. La reforestación en la formación del suelo a partir de tepetates. Tesis de Maestro en ciencias. Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados. Estado de México, México. 90 p.
- Becerra, J.C., 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos.
- Bisdorf, E.B.A., Dekker, L.W., and Schoube, J.F.Th., 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56, 105-118.
- Bradford, J.B., Kastendick, D.N., 2010. Age-related patterns of forest complexity and carbon storage in pine and aspen-birch ecosystems of northern Minnesota, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 401–409.

- Bray, D.B., Antinori, C., Torres-Rojo, J.M., 2006. The Mexican model of community forest management: The role of agrarian policy, forest policy and entrepreneurial organization. *Forest Policy and Economics* 8, 470–484.
- Bray, D.B., Merino, L., 2004. La experiencia de las comunidades forestales en México. 1ª ed. Instituto Nacional de Ecología. México, 271p.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310, 28–61.
- Bruijnzeel, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 185–228.
- Buczko, U., Bens, O., Hüttl R.F., 2006. Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine–beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology* 331, 383–395.
- Buytaert, W., Iniguez, V., Bièvre B.D., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management* 251, 22–30.
- Campbell, J., Alberti, G., Martin, J., Law, B.E., 2009. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management* 257, 453–463.
- Castro, A.A., 2009. Conductividad hidráulica en bosques y pradera de alta montaña de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM. México, D.F., 53 p.
- Chee, Y.E., 2004. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services. *Biological Conservation* 120, 549–565.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2013. Servicio Meteorológico Nacional. Normales climatológicas 1971-2000. Consultado en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estación/hgo/NORMAL13112.TXT>
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., Van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- D'Amato, A.W., Bradford, J.B., Fraver, S., Palik, B.J., 2011. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management* 262, 803–816.

- DeBano, L.F., 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231–232, 4–32.
- De Jong, B.H.J., 2001. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *Forest Ecology and Management* 154, 85-104.
- De Jong, B., Tipper, R., Montoya-Gómez, G., 2000. An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico. *Ecological Economics* 33, 313–327.
- Descroix, L., Viramontes, D., Estrada J., González-Barrios, J.L., Asseline, J., 2007. Investigating the spatial and temporal boundaries of Hortonian and Hewlettian runoff in Northern Mexico. *Journal of Hydrology* 346, 144– 158.
- Díaz-Franco, R., Acosta, M.M., Carrillo, A.F., Buendía, R.E., Flores, A.E., Etchevers, J.D., 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schtl. & Cham. *Madera y bosques* 13 (1), 25-34.
- Dixon, R.K. and Turner, D.P., 1991. The Global Carbon Cycle and Climate Change: Responses and Feedbacks from Below-ground Systems. *Environmental Pollution* 73, 245-262.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT, 2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, 85 p.
- DOF, 2011. Reglas de Operación del Programa ProÁrbol 2012. Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales. México, 89 p.
- DOF, 2012a. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México, 76 p.
- DOF, 2012b. Ley Agraria. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México, 46 p.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews* 51, 33–65.
- Duñez, A.J., 2007. Estudios hidrológicos en ecosistemas del Norte México. Tesis de Doctor en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Nuevo León, México, 91 p.

- Evanylo, G. and McGuinn, R., 2009. Management Practices and Soil Quality: Measuring, assessing, and comparing laboratory and field test kit indicators of soil quality attributes. Virginia Cooperative Extension 450-400, 9 p.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional, México. Roma, 98 p.
- FAO, 2009. Biomass. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. Roma, 30 p.
- FAO, 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina Documento de Trabajo, Informe Nacional México. Roma, 174 p.
- Farley, J., Costanza, R., 2010. Payments for ecosystem services: From local to global. *Ecological Economics* 69, 2060–2068.
- Figueroa, N.C., Ángeles, P.G., Velázquez, M.A., De los Santos P.M., 2011. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo *Pinus patula* Scheltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana Ciencia Forestal* 1(1), 105-112.
- Figueroa, N.C., 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestro en Ciencias. Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados. Monticello, México. 72 p.
- FitzPratrik, E.A., 1980. Suelos. Su formación, Clasificación y Distribución. Compañía Editorial Continental, México, D.F., 430 p.
- Foster y Morrison, 2002. Carbon sequestration by a jack pine stand following urea application. *Forest Ecology and Management* 169, 45-52.
- Finkral, A.J., Evans, A.M., 2008. The effects of a thinning treatment on carbon stocks in a northern Arizona ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management* 255, 2743–2750.
- García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM. México. 217 p.
- Gillespie, J.R., 1992. *Pinus patula* Schiede and Deppe. Patula pine. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. U.S.A., 5 p.
- Goche-Télles, R., Velázquez, M.A., Borja, R.A., Terrazas, T., Cervantes, M.C., Trinidad, S.A., 2003. Densidad básica y ancho de los anillos de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. *Interciencia* 28 (12), 705-709.

- Gómez-Tagle, C.A., Gutiérrez, G.J.A. y Zepeda, C.H., 2010. Dispositivo de Automatización para un Infiltrómetro de Campo con Funcionamiento de Mariotte. *Terra Latinoamericana* 28 (3), 193-202.
- Gómez-Tagle, A., 2009. Linking hydrogeology and ecosystem services: differential controls of surface field saturated hydraulic conductivity in a volcanic setting in central Mexico. *Hydrogeology Earth System Sciences Discussion*. 6, 2499–2536.
- González-Vargas, T., 2011. Ecohidrología de un Bosque de Oyamel: Diagnóstico y rehabilitación. Tesis de Licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM. México, D.F., 73 p.
- Gutiérrez, V. y Lopera, G.A., 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. *In: Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. CD.
- Hall, G. M. J., Wiser, S. K., Allen, R. B., Beets, P. N., Goulding, C.J., 2001. Strategies to estimate national carbon stocks from inventory data: the 1990 New Zealand baseline. *Global Change Biology* 7, 389–403.
- Harden, C.P. y Delmas, S.P., 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* 55, 5–24.
- Harmon, M.E., Moreno, A., Domingo, J.B., 2009. Effects of partial harvest on the carbon stores in Douglas-fir/western hemlock forests: a simulation study. *Ecosystems* 12, 777–791.
- Harold y Hocker, 1984. Introducción a la Biología Forestal. A. G. T. Editor, México, D. F., 446 p.
- Hayashi, Y., Ken'ichirou, K., Mizuyama, T., 2006. Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. *Journal of Hydrology* 331, 85–102.
- Heiskanen, J., Mäkitalo, K., 2002. Soil water-retention characteristics of Scots pine and Norway spruce forest sites in Finnish Lapland. *Forest Ecology and Management* 162, 137–152.
- Hernández-Díaz, J.C., Corral-Rivas, J.J., Quiñones-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J.R., Vargas-Larreta, B., 2008. Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques* 14(3), 25-41.

- Holland, I.I., Rolfe, G. L., 1997. *Forests and Forestry*. 5<sup>th</sup> Edition. Interstate Publishers, Inc. U.S.A. 558 p.
- Hoover, C., Stout, S., 2007. The carbon consequences of thinning techniques: stand structure makes a difference. *Journal of Forestry* 105, 266–270.
- Howard, E.A., Gower, S., Foley, J.A. y Kucharik, C.J., 2004. Effects of logging on carbon dynamics of a jack pine forest in Saskatchewan, Canada. *Global Change Biology* 10, 1267–1284.
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., Murdiyarso, D., 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 251, 45–51.
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Jiménez-Cruz, D., 2011. Restauración del servicio ambiental hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D. F. México. Tesis de Licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM. México, D.F., 60 p.
- Jobbágy, E.G., Vasallo, M., Farley, K.A., Piñeiro, G., Garbulsky, M.F., Noretto, M.D., Jackson, R.B., Paruelo, J.M., 2006. Forestación en pastizales: Hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia* 10 (2), 109 – 124.
- Johnson-Maynard J.L, Graham R.C., Wub, L., Shouse, P.J., 2002. Modification of soil structural and hydraulic properties after 50 years of imposed chaparral and pine vegetation. *Geoderma* 110, 227– 240.
- Jordán, A., Zavala, L.M., Nava, A.L., Alanís, N., 2009. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena* 79, 60–71.
- King, D.A., 2005. Linking tree form, allocation and growth with an allometrically explicit model. *Ecological Modelling* 185, 77–91.
- Klooster, D., y Masera, O., 2000. Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change* 10, 259-272.
- Lebron, I., Robinson, D.A., Oatham, M., Wuddivira, M.N., 2012. Soil water repellency and pH soil change under tropical pine plantations compared with native tropical forest. *Journal of Hydrology* 414–415, 194–200.

- Letey, J., Carrillo, M.L.K., Pang, X.P., 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology* 231–232, 61–65.
- López-Télles, A., Návar, C.J., Flores, L.J., Cantú, A.C., Jiménez, P.J., 2007. Estimación de biomasa y factor de expansión de biomasa en ecosistemas forestales en Chihuahua, México. En: Memorias en extenso del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Morelia, Michoacán, 10 p.
- Luna, I., Morrone J.J., Espinosa, D., 2007. Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. FES Zaragoza e Instituto de Biología, UNAM. México, 78-79 pp.
- Masera, O.R., Cerón, A.D., and Ordóñez, A., 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6, 291–312.
- Mendoza, P.A., 2008. Estimación de biomasa aérea y almacenamiento de carbono en paisajes de bosques templados en Cofre de Perote, Veracruz. Tesis de Maestra en Ciencias Biológicas. Posgrado en Ciencias Biológicas. Instituto de Geología, UNAM. México D.F., 92 p.
- Merino, L., 2004. Conservación o deterioro. El impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en las prácticas de uso de los recursos forestales. Instituto Nacional de Ecología. México, 339 p.
- Millenium Ecosystem Assesment (MEA), 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. 137 p.
- Moreno-Cano, N.V., 2010. Estimación de Captura de Carbono en Bosques Comunales de *Pinus hartwegii* LINDL. en la zona de Amecameca, Estado de México.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J.M., Braña, J., 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics* 65, 725-736.
- Muñoz-Villers, L.E., Holwerda, F., Gómez-Cárdenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L.A., Marín-Castro B.E., Tobón, C., 2011. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.062
- Neris, J., Tejedor, M., Rodríguez, M., Fuentes, J., Jiménez, C., 2012. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena* doi:10.1016/j.catena.2012.04.011



- Nunery, J.S., Keeton, W.S., 2010. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management* 259, 1363–1375.
- Oleschko, K. y Chapa, G. J., 1989. Structural Dynamics of a Mollic Andosol of Mexico under Tillage. *Soil and Tillage Research* 15, 25-40.
- Ordóñez, J.A., De Jong, B., Maser, M., 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2), 27-47.
- Ordóñez, A., 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias* 90, 37-42.
- Ordóñez, J.A.B., De Jong, B.H.J., García-Oliva, F., Aviña, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., Martínez, R., Maser, O., 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255, 2074–2084.
- Oyarzún, C.E., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., Hervé, P., 2011. Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosques* 32(1), 10-19.
- Patterson, T.M, and Coelho, D.L., 2009. Ecosystem services: Foundations, opportunities, and challenges for the forest products sector. *Forest Ecology and Management* 257, 1637–1646.
- Peichl, M., Altaf, A., 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 140, 51–63.
- Péllissier, R., Pascal, J.P., Houllier, F., Laborde, H., 1998. Impact of selective logging on the dynamics of a low elevation dense moist evergreen forest in the Western Ghats (South India). *Forest Ecology and Management* 105, 107–119.
- Pérez-Arrarte, C., 2007. Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua, Un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay. Grupo Guayubira. Uruguay, 56 p.
- Pritchett, W.L., 1991. Suelos Forestales Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Limusa, México, D.F., 634 p.

- Pregitzer, K.S., Euskirchen, E.S., 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10, 2052–2077.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., Zhang, T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research* 96, 316–330.
- Ritsema, C.J., y Dekker, L.W., 1998. Three-dimensional patterns of moisture, water repellency, bromide and pH in a sandy soil. *Journal of Contaminant Hydrology* 31, 295-313.
- Rojas, G.F. y Villers, R.M., 2005. Captura de carbono en el bosque *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala. *Revista Ciencia Forestal en México*, 1-15.
- Rojas, G.F. y Villers, R.M., 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México* 33 (104), 59-86.
- Rzedowski J., Rzedowski G.C. de, y colaboradores., 2001. Flora Fanerogámica del Valle de México. 2a ed. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán, México, 1405 p.
- Sahin, V. and Hall M.J., 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology* 178, 293-309.
- Sandoval M.E., Castillo C.S., Zagal E.V., Stolpe N.L., Undurraga P.D., 2007. Parámetros hidráulicos determinados en un andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *Revista Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7 (2), 32-45.
- Schlatter, J. E., Otero, L., 1995. Efecto de *Pinus radiata* sobre las características químico-nutritivas del suelo mineral superficial. *Bosques* 16(1), 29-46.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1982. Manual de Aplicación del Método de Desarrollo Silvícola. Dirección General para el Desarrollo Forestal. México, D. F., 305 p.

- Sharma, C.M., Baduni, N.P., Gairola, S., Ghildiyal, SK., Suyal, S., 2010. Tree diversity and carbon stocks of some major forest types of Garhwal Himalaya, India. *Forest Ecology and Management* 260, 2170–2179.
- Sobieraj, J. A. 2003. Spatial patterns of saturated hydraulic conductivity and its controlling factors for forested soils. University of Cincinnati. 237 p.
- Torres, R.J.M. y Guevara, S.A., 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbón y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63, 40-59.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations. New York, 21 p.
- Vanclay, J.K., 2009. Managing water use from forest plantations. *Forest Ecology and Management* 257, 385–389.
- Vela-Gálvez, L., 1976. Contribución a la Ecología de *Pinus patula* Schlecht. et Cham. Tesis Profesional. Biología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN. México, D.F. 171 p.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J., 2007. Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *Forest Ecology and Management* 253, 81–88.
- Wahl, N.A., Bens, O., Schäfer, B., Hüttl, R.F., 2003. Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 1377–1387.
- West, P.W., 2006. Growing Plantation Forests. Springer, Germany, 304p.
- Yüksek, T., y Yüksek, F., 2011. The effects of restoration on soil properties in degraded land in the semi-arid region of Turkey. *Catena* 84, 47–53.
- Zavala, L.M., Granged, A.J.P., Jordán, A., Bárcenas-Moreno, G., 2010. Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma* 158, 366–374.

- Zhang, W., An, S., Xu, Z., Cui, J., Xu, Q., 2011. The impact of vegetation and soil on runoff regulation in headwater streams on the east Qinghai–Tibet Plateau, China. *Catena* 87, 182–189.
- Ziegler, A.D., Negishi, J.N., Sidle, R.C., Noguchi, S., Nik, A.R., 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena* 67, 89 – 104.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H., De Moraes, J.M., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222, 29–38.