



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CONTENIDO Y CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO
EN EL BOSQUE DE *Pinus hartwegii*
DEL PARQUE NACIONAL LA MALINCHE:
TLAXCALA-PUEBLA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A
P R E S E N T A
FABIOLA ROJAS GARCÍA



DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARIA DE LOURDES VILLERS RUÍZ.
CO-DIRECTOR DE TESIS: BIOL. JOSE ANTONIO BENJAMÍN ORDÓÑEZ DÍAZ.

MÉXICO, D.F.



2004

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autoriza a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a donar en beneficio de la biblioteca a ingreso el contenido de mi trabajo profesional.
 NOMBRE: Rojas García Fabiola
 FECHA: 24-11-2009
 FIRMA: [Firma]

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de Pinus hartwegii del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla"

realizado por Fabiola Rojas García

con número de cuenta 9711405-7 , quien cubrió los créditos de la carrera de:

Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Dra. María de Lourdes Villers Ruíz

[Firma]

Co-Director de Tesis
Propietario

Biól. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz

[Firma]

Propietario

Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez

[Firma]

Suplente

M. en C. Rosa María Fonseca Juárez

[Firma]

Suplente

Dra. Lucía Almeida Leñero

Consejo Departamental de Biología

FACULTAD DE CIENCIAS

[Firma]
 M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez



UNIDAD DE ENSEÑANZA
DE BIOLOGÍA

DEDICATORIA

A Dios

Padre por darme amor, discernimiento, familia y amigos
Jesucristo por ser perdón, reconciliación y fuerza de mi corazón
Espíritu Santo por darme el carisma de conocer la libertad con amor

A mi Familia

A Juan Luís Rojas y Carmen García por formar una bonita familia y demostrarme con creces que hay amor para siempre; a mi papá que me ha enseñado a nunca claudicar a mis sentimientos e ideales y que hay tiempo para todo, a mi mamá por ser la columna vertebral de mi familia, por comprenderme y porque diariamente me encomienda a Dios

A mi hermana y mejor amiga Lety, por cada momento que pasamos juntas, por las risas, los juegos, los secretos, los bailes, los conciertos, las fiestas, los amigos compartidos, la experiencia en Pastoral y todos los relajos que armamos.

A mi hermana Lupita, porque eres mi ejemplo a seguir, por todos tus consejos, por tu apoyo absoluto, por las pláticas nocturnas, por tu forma de quererme y por ser tan extraordinaria siempre te he admirado.

A mi hermano Vicente, porque eres genial, porque me ayudaste en momentos difíciles, por ser buen consejero y al mismo tiempo el aliado incondicional, por tu espíritu siempre entusiasta y tu alegría contagiosa.

A mi cuñada Lucy, ahora otra de mis hermanas, por convertirte en mi amiga en tan poco tiempo, porque entraste en mi familia para mejorarla, por tu cordialidad para todos nosotros y por amar a mi hermano.

A mis sobrinos Alejandra y Juan Luís a los dos por existir, por cambiarme la vida, por hacerme sonreír cada que los veo, por dejarme crecer con ustedes, darme el amor más sincero, ser inspiración y una poderosa razón para mejorar como persona.

A mis amigos

A mis viejos amigos: Carlos Omar Rangel, Lety Serrano, Jaquelin Garay, Sara Luz García, Gloria Guerrero, Montse Carmona, Cecilia Lozano, Mario Martínez, Daniel Ortiz, Ivan Montoya (Bam-Bam), Mayla Romero (mi madrinita) y Eduardo González; a todos porque pase momentos especiales con cada uno de ustedes y porque influyeron en sobremanera para que eligiera a la Biología como mi profesión.

A todos los amigos que hice en Pastoral Juvenil, sobre todo a Los Amigos de Cristo de la Parroquia San Vicente de Paúl, por las oraciones, las platicas, los encuentros, los juegos, las fiestas, y porque me ayudaron a acercarme a Jesucristo, especialmente a Gaby Castillo, Darío Guadarrama, Fernando Miranda, y Toño Jiménez.

A mis amigas las Amazonas: Mónica Espinosa, Edén Rodríguez, Rocío Montiel, Valentina López, Erika Arroyo y Erika Sánchez, que son como mi familia en la Facultad de Ciencias, por cada clase, las tareas sin fin, la practica de Ecología, las salidas de campo, las comidas, la angustia de cada examen, las platicas, los chismecillos, sus críticas, su apoyo, su cariño y porque siempre estuvieron conmigo.

A mis amigos de la carrera: mi compadre y mejor amigo Ivan Chirino, Natalia Cárdenas, Paulina Arias, Fabiola Villela, Ale Uribe, Gustavo Valdez, Yasser Cantón, Lorena Alamilla, Dulce Moreno, José Luís Reyes, Ruth Torres, Citlalli Manjarrez, Imuris Urbina, Chayo Aguirre y Jorge Ordóñez; porque hicieron más interesante cada clase, más divertida cada practica de campo, más entretenidas las horas libres y los encuentros en los pasillos, menos estresantes lo exámenes, y por hacer feliz mí estancia en la Facultad.

A los amigos que hice durante la realización de esta tesis Julio Wong, Ariadna Flores, Charly Ángeles y Julio Romero.

¡GRACIAS A TODOS!

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Lourdes Villers, porque durante el desarrollo de este trabajo me brindaste apoyo en las etapas: bibliográfica, campo, laboratorio, gabinete y redacción; por cada revisión exhaustiva a los n documentos que te entregue y porque siempre me alentaste a mejorar el trabajo.

Al Biól. Antonio Ordóñez, por todas las revisiones, consejos a larga distancia, préstamo de bibliografía y de algunos documentos inéditos incluso, porque desde la 1ª conferencia de captura de carbono despertaste mi interés en conocer sobre el tema.

A la M. en G. Ana Elisa Peña del Valle por enseñarme a hacer levantamientos de campo para estudios de carbono, por el interés en que conociera de mapas y tú ayuda para aprender a fotointerpretar durante muchas mañanas y tardes en el Instituto de Geografía, sobre todo por tu cordialidad para conmigo en todo momento.

A la Dra. Irma Trejo por el tiempo invertido en la revisión detallada de este trabajo y recomendaciones.

A la M. en C. Rosa María Fonseca con quien curse Biología de Plantas I donde me inicio en el estudio de los Pinos, por tu tiempo y revisiones.

A la Dra. Lucía Almeida por el apoyo en el laboratorio, por todas las revisiones y tu preocupación constante en que trabajara.

A la Dra. Beatriz Ludlow, por tu amabilidad, por tu apoyo en campo y en la identificación de material botánico y porque fuiste mi amiga secreta en la navidad del 2002.

A la Biól. Verónica Aguilar por todos los favores en el laboratorio, por ayudarme a salir de los errores en ILWIS, sobre todo por tu amistad.

A mis compañeros del laboratorio de Biogeografía y Sinecología que me brindaron ayuda técnica y su amistad Víctor Ávila, José Hernández, Sinue Ferreira y del Instituto de Geografía a Pedro Montes y Gonzalo Valdivia.

Agradezco de manera especial al Dr. Zenón Cano-Santana quien fue la pauta en mi carrera para inclinación ecológica y la Dra. María Engracia Hernández por enseñarme la importancia de la caracterización climática en los estudios de Biología.

INDICE

I.	RESUMEN.....	1
II.	INTRODUCCIÓN.....	2
III.	OBJETIVOS.....	7
IV.	ANTECEDENTES.....	8
V.	SITIO DE ESTUDIO.....	10
	Volcán La Malinche.....	10
	Bosque de Pinus hartwegii.....	13
VI.	MÉTODOS.....	14
	Parámetros básicos.....	15
	Estimación del contenido de carbono.....	23
	Estimación de la captura potencial de carbono.....	24
VII.	RESULTADOS.....	26
	Parámetros básicos.....	26
	Mapa base.....	26
	Análisis estructural.....	29
	Densidad de la madera.....	31
	Biomasa.....	34
	Incremento corriente anual.....	35
	Calidad de sitio.....	36
	Edad del bosque.....	39
	Contenido de carbono.....	41
	Captura potencial de carbono.....	43
VIII.	DISCUSIÓN.....	48
IX.	CONCLUSIONES.....	54
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	55
XI.	ANEXOS.....	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Gases de Efecto Invernadero	2
Tabla 2. Cumbres y conferencias internacionales ante el Cambio Climático Global	4
Tabla 3. Emisiones de México por sector para 1990.....	6
Tabla 4. Uso de suelo y vegetación del volcán La Malinche, Tlaxcala-Puebla.	26
Tabla 5. Densidad, promedio de DN, promedio de alturas y cobertura del área basal por círculos en el sitio N	29
Tabla 6. Densidad, promedio de DN, promedio de alturas y cobertura del área basal por círculos en el sitio SE.	29
Tabla 7. Densidad de la madera de <i>Pinus hartwegii</i>	32
Tabla 8. Volumen y Biomasa de los árboles en los círculos del sitio N	34
Tabla 9. Volumen y Biomasa de los árboles en los círculos del sitio SE.....	35
Tabla 10. Calidad de sitio de acuerdo con el ICA para bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	36
Tabla 11. Contenido de carbono del sitio N.....	41
Tabla 12. Contenido de carbono del sitio SE	41
Tabla 14. Biomasa en bosques de pino, con valores mínimo y máximo en 0.1ha.....	50
Tabla 15. Comparación de estudios de contenido de carbono en bosques templado-frío	51
Tabla 16. Comparación con otro estudio de captura de carbono por décadas.	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo global del carbono.....	3
Figura 2. Vista panorámica del volcán La Malinche, 2004.....	10
Figura 3. Pisos climáticos en el volcán La Malinche.....	12
Figura 4. Distribución de <i>Pinus hartwegii</i>	13
Figura 6. Diagrama del muestreo.....	17
Figura 7. Mapa de superficie forestal del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala-Puebla.....	27
Figura 8. Distribución del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> del Parque Nacional La Malinche, y localización de sitios de muestreo.....	28
Figura 9. Estructura diamétrica, por clases, sitios Norte y Sureste.....	30
Figura 10. Estructura vertical, por clases, de los sitios N y SE.....	31
Figura 11. Correlación de la Densidad de la madera <i>Pinus hartwegii</i> , por dos métodos.....	33
Figura 12. Incremento corriente anual de los sitios N y SE.....	35
Figura 13. Círculos con calidad de sitio I.....	37
Figura 14. Círculos con calidad de sitio II.....	37
Figura 15. Círculos con calidad de sitio III.....	38
Figura 16. Círculos con calidad de sitio IV.....	38
Figura 17. Círculos con calidad de sitio V.....	39
Figura 18. Promedio de edad del arbolado de <i>Pinus hartwegii</i> , por círculo.....	40
Figura 19. Contenido de carbono y biomasa, densidad y edad del arbolado por círculo.....	42
Figura 20. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2008.....	43
Figura 21. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2013.....	44
Figura 22. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2018.....	44
Figura 23. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2023.....	45
Figura 24. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2028.....	45
Figura 25. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2043.....	46
Figura 26. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2053.....	46
Figura 27. Proyección de la captura de carbono por sitios.....	47

I. RESUMEN

Los bosques capturan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, por lo que su evaluación como medio para mitigar las emisiones de carbono resulta de gran importancia. Con el objetivo de conocer el contenido y la captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche se cuantificó la superficie que cubre el bosque y para estimar estos aspectos se levantó un inventario en 2003, apegado a las exigencias del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

Se evaluó la estructura del bosque, se especificó la densidad de la madera, se estimó el incremento corriente anual de la especie. Así mismo en los resultados se presenta una escala para determinar la calidad de sitio de los rodales y estimar la edad de *Pinus hartwegii*.

Se aplicaron algunos factores estándares para la valoración total de contenido de carbono expresado en tC, y la captura potencial de carbono expresado en tC/ha/año.

Los resultados demuestran que este bosque tiene una superficie de 546 ha, en la cuál estructuralmente los árboles tienen un diámetro normalizado promedio de 0.368 m y una altura promedio de 17.8 m, la densidad de la madera es 0.496 ton/m³ y almacena 55,104.5 tC.

Se proyectó la captura de carbono, generando escenarios a 5, 10, 15, 20, 25, 40, y 50 años a partir de la realización del inventario, encontrando diferencias en el potencial de captura de carbono, en función de la densidad de arbolado, calidad de sitio y edad del rodal presentada en 2003.

Finalmente se proponen 3 intervenciones de manejo forestal de bajo impacto, para aumentar el incremento corriente anual del bosque y con ello la captura potencial de carbono.

II. INTRODUCCIÓN

El aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera es una preocupación mundial. Entre los GEI se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x), clorofluorocarburos (CFC), el vapor de agua (H₂O), entre otros. Dichos gases reciben su nombre debido a que capturan el calor que irradia la superficie terrestre, a este fenómeno que se conoce como efecto de invernadero¹. En la Tabla 1 se menciona la fuente principal de algunos GEI así como su tiempo de vida en la atmósfera.

Tabla 1. Gases de Efecto Invernadero

GEI	Fuente principal	Concentraciones Preindustriales ppmv *	Concentraciones Actuales ppmv	Vida Atmosférica (años)
CO ₂	Quema de combustibles fósiles, producción de cemento, cambios en uso de suelo tropical.	280	370	50-200
CH ₄	Cultivo de arroz bajo agua, ganadería, rellenos sanitarios, producción y consumo de combustibles fósiles	700	1745	12
NO _x	Agricultura (pastoreo en regiones tropicales), quema de biomasa, procesos industriales	275	1745	150-180
CFC	Aerosoles, refrigerantes, aislantes	0	3	65-130

Fuente: modificada de Jaramillo, 1994 e IPCC, 2001.

* partes por millón en volumen

El CO₂ y el vapor de agua, están en concentraciones más elevadas y sus montos están regulados por los ciclos globales del carbono y el ciclo hidrológico respectivamente (Ahuja, 1990).

¹ El efecto de invernadero (o invernáculo), consiste en la retención de energía calórica en la atmósfera inferior debido a la absorción y reflexión por parte de las nubes y ciertos gases presentes en la atmósfera. La radiación solar visible (de baja longitud de onda) atraviesa la atmósfera y calienta la superficie de la Tierra, la cual a su vez emite radiación térmica (de alta longitud de onda), parte de la cual es retenida por los GEI (Rodríguez y González, 2000).

En el ciclo del carbono² se establece un balance de carbono entre las fuentes de emisión y los sumideros o sitios que captan carbono (Figura 1). Los principales sumideros de carbono son el suelo, los océanos, los bosques tropicales, templados, boreales y los pastizales. El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO₂ a la atmósfera relacionados con el cambio climático global (Mintzer, 1992)

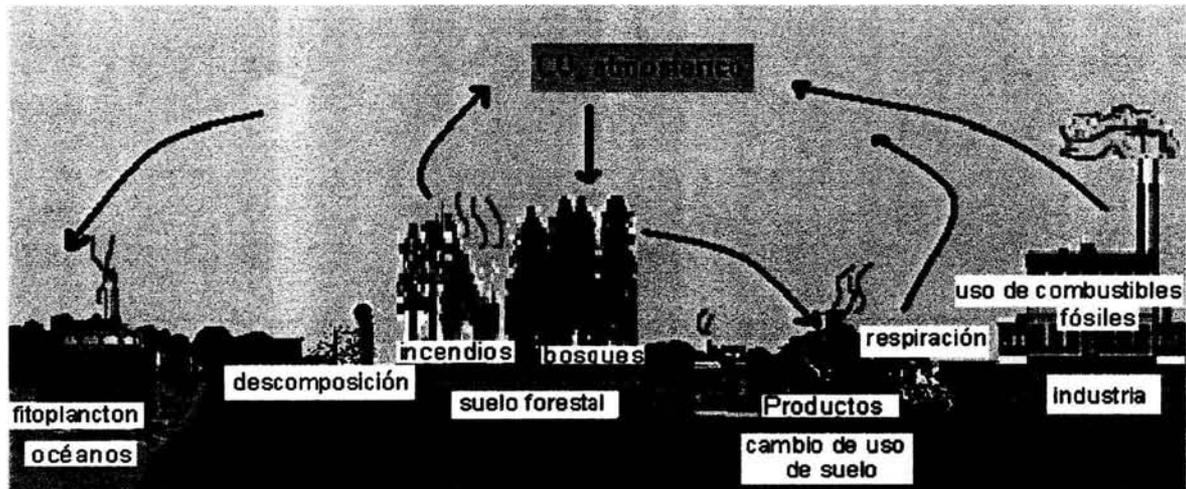


Figura 1. Ciclo global del carbono.

Se estima que la concentración en la atmósfera del CO₂ se ha venido incrementando de manera exponencial desde finales del siglo XVIII, de 280 a casi 367 ppmv, debido a las actividades humanas (Lashof y Ahuja, 1990; IPCC, 2001).

El cambio climático es la alteración termodinámica de la atmósfera a nivel planetario, como resultado de un incremento de las concentraciones de GEI (IPCC, 1995), lo cual deviene en el calentamiento de la atmósfera y por ende de la superficie de la tierra (Gay *et al.*, 1991). Es posible afirmar que el cambio climático es el problema ambiental más importante del presente siglo, teniendo repercusiones ambientales, sociales, económicas y en relación con las estrategias de ordenación de recursos (Apps y Kurz, 1991).

² Ciclo del carbono: es el movimiento de éste en sus distintas formas entre la superficie terrestre, su interior y la atmósfera, seguido por un mecanismo de intercambio como lo son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Ciesla, 1996).

Ante la problemática ambiental generada por el cambio climático en el planeta, en 1972 se efectúa la Cumbre de Estocolmo, donde se planteó como problema ambiental la contaminación atmosférica (Tabla 2).

En 1985 se aprobó en la convención de Viena la protección de la capa de ozono, ratificada dos años después al celebrarse el protocolo de Montreal, que buscaba regular las emisiones de CFC.

En 1988 se crea el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), como un órgano adscrito de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) (Rivera, 2000).

Al celebrarse la Cumbre de Río de Janeiro (1992), a la que se suscribieron 155 países, manifestando su interés en estabilizar las emisiones de GEI, la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), sugirió la continuación de las negociaciones a través de las Conferencias de las Partes (COPS), con la idea de materializar acciones para mitigar el calentamiento global.

Tabla 2. Cumbres y conferencias internacionales ante el Cambio Climático Global

Fecha	Reuniones ante el Cambio Climático Global
1972	Cumbre de Estocolmo, Suecia
1985	Aprobación de los acuerdos de Viena
1987	Protocolo de Montreal
1988	Nace el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
1988	Cumbre de Toronto
1992	Cumbre de Río de Janeiro
1992	Convención Marco sobre Cambio Climático
1995	1ra Conferencia de las partes, Berlín, Alemania
1996	2a Conferencia de las partes, Ginebra, Suiza
1997	3a Conferencia de las partes, Kyoto, Japón <i>Protocolo de Kyoto</i>
1998	4a Conferencia de las partes, Buenos Aires
1999	5a Conferencia de las partes, Bonn, Alemania
2000	6a Conferencia de las partes, La Haya, Holanda
2001	7a Conferencia de las partes, Bonn, Alemania
2001	8a Conferencia de las partes, Marrakech, Marruecos
2002	Cumbre de Johannesburgo, Sudáfrica

Fuente: Orrego, 1998; Aristizabal y Guerra, 2002; Totten, 1999; Ministerio del Medio Ambiente, 2002.

Así, se sucedieron 8 COPS, destacando la COP-3 en la ciudad japonesa de Kyoto donde se elaboró el marco legal bajo el cual todos los países adscritos a la CMCC se comprometieron a reducir las emisiones que contribuyan al calentamiento global, mediante normas y procedimientos que en su conjunto son conocidos como el Protocolo de Kyoto (Totten, 1999).

En 2002 se celebra la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, en Johannesburgo donde se realizaron negociaciones con el propósito de establecer compromisos reales con acciones concretas para alcanzar los objetivos del Desarrollo Sostenible. En el acuerdo final Rusia ratificó su respaldo al Protocolo de Kyoto, con el cual el tratado contaría con suficientes productores importantes de GEI para entrar en vigencia (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático, el Protocolo de Kyoto establece legalmente compromisos dirigidos a los países del Anexo I³ para reducir colectivamente las emisiones de GEI en una proporción superior al 5% con respecto a los niveles de 1990 para el período entre el 2008 y el 2012 (Totten, 1999).

El Protocolo de Kyoto establece tres mecanismos de flexibilidad: el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el Mercado Internacional de Derechos de emisiones (MIDE) y las Actividades de Implementación Conjunta (AIC) (IPCC, 2001).

El MDL tiene el propósito de ayudar a los países del Anexo I a cumplir sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones mediante el apoyo económico a proyectos forestales que promuevan el desarrollo sostenible en un país en vías de desarrollo (partes del no Anexo I) (IPCC, 2001).

³ Las tres categorías en las que el Protocolo de Kyoto designa las responsabilidades de los países firmantes son:

a) *Países del Anexo I*, se conforman por 39 países desarrollados o con economías de mercado en transición y son los de mayor responsabilidad y capacidad de acción ante el cambio climático. En 1990 produjeron cerca del 55% de las emisiones totales

b) *Países del Anexo II*, constituido por un subconjunto de 25 países desarrollados del *Anexo I*, los cuales proporcionan ayuda económica y tecnológica a los países del *No Anexo I* a fin de enfrentar el cambio climático.

c) *Países del no Anexo I*, son los países cuyas economías están en desarrollo, a los cuales no se les obliga a reducir o a contabilizar sus emisiones del GEI. México forma parte de esta categoría (ONU: CMCC, 1998).

Las emisiones de GEI en México contribuyen con el 1.45% de las emisiones totales de carbono que se dan anualmente en nuestro planeta (Tabla 3).

Tabla 3. Emisiones de México por sector para 1990

Fuente	Emisiones MtC*	Porcentaje
Sector energía	83.8	71.5%
Cambio de uso de suelo y deforestación	30.2	25.8
Industria del cemento	3.1	3.1
TOTAL	117.1 MtC	100%

Fuente: Gay y Martínez, 1995

* mega toneladas de carbono

Actualmente se mira a los bosques como un medio para mitigar las emisiones de GEI, debido a que capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre (Maser, 1995; Ordóñez *et al.*, 2001).

Las plantas utilizan CO₂ y liberan O₂, durante la fotosíntesis, a diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los foto asimilados en componentes de carbono de sus estructuras leñosas por períodos prolongados, por lo que deben ser considerados reservas naturales de carbono (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

Al carbono almacenado en la biomasa considerando las condiciones actuales de cobertura se le conoce como contenido de carbono.

La captura potencial de carbono se refiere al almacenamiento futuro de carbono en forma sólida y estable. Así en las plantas, el carbono se fija en forma directa a través de la fotosíntesis que convierte el CO₂ atmosférico en biomasa, posteriormente, parte de esta biomasa es indirectamente retenida como carbono orgánico del suelo durante los procesos de descomposición. La cantidad de carbono almacenado en un sitio refleja el balance a largo plazo entre las entradas y las salidas de carbono en el ecosistema.

En México los bosques, selvas y otras áreas con vegetación natural ocupan aproximadamente 74% del territorio nacional (SEMARNAT-INE, 2001), por lo que resulta necesario conocer la dinámica de carbono de éstos ecosistemas forestales y sus capacidades en contenido y captura potencial de carbono.

III. OBJETIVOS

General

- Estimar el contenido y la captura potencial de carbono en el estrato arbóreo del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche.

Particulares

- Delimitar la distribución espacial del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche
- Obtener parámetros básicos del bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche:
 - Evaluar la estructura
 - Estimar la biomasa arbórea con el uso de ecuaciones volumétricas
 - Calcular el incremento corriente anual
- Determinar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii*
- Proponer una escala para definir la calidad de sitio de los rodales monoespecíficos de *Pinus hartwegii* en función del incremento corriente anual
- Elaborar escenarios a corto, mediano y largo plazo de la captura potencial de carbono del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche

IV. ANTECEDENTES

Como resultado de la creciente preocupación sobre el medio ambiente y el calentamiento global, hay un consenso mundial que sugiere realizar: inventarios forestales, programas de mitigación, transferencia tecnológica, protección de sumideros de carbono, intercambio de información y participación ciudadana (Parlamento Latinoamericano *et al.*, 1998).

Esta preocupación derivó en el desarrollo de metodologías para la estimación del contenido y captura de carbono en los bosques. En México, desde 1997 se han realizado diversos estudios relativos a mitigación de GEI con el propósito de analizar su potencial y sus costos en los principales sectores en el país: energético, forestal, transporte y agrícola.

Entre dichos estudios destaca la estimación de la captura potencial de carbono en bosques realizada por Ordóñez (1998), en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro en el Estado de Michoacán, en la cual se utilizó el Modelo de Simulación CO2FIX⁴ (Nabuurs *et al.*, 2001) para la estimación dinámica del potencial de captura de carbono se generaron escenarios a corto, mediano y largo plazos; esta investigación proporcionó los lineamientos metodológicos para la obtención de los parámetros cuantificables para este modelo y sugirió la elaboración de estudios específicos para determinar parámetros a nivel regional (Ordóñez, 1998).

En la estimación del contenido de carbono en los bosques, se utilizan los inventarios de carbono, que contabilizan el carbono fijado al momento de las mediciones, a partir de datos obtenidos en campo como altura del árbol y diámetro normalizado⁵ (DN). Con la elaboración de un inventario es posible calcular la biomasa del bosque, para ello pueden ser utilizadas ecuaciones alométricas y ecuaciones volumétricas.

⁴ El CO2FIX es un modelo de estimación fundamentado en el ciclo de carbono que integra los flujos y almacenes de carbono en los ecosistemas forestales, incluyendo los reservorios de biomasa, suelo y productos (Nabuurs *et al.*, 2001).

⁵ El DN, también se conoce como diámetro a la altura del pecho (DAP), es el diámetro del árbol a la altura de 1.3 metros

El uso de las ecuaciones alométricas se considera una forma práctica y confiable para estimar la biomasa y el contenido de carbono de un lugar. Estas ecuaciones se han utilizado en especies forestales de clima templado-frío para estimar la biomasa aérea total y foliar, a partir del DN.

El estudio de Peña del Valle (2003) cuyo propósito fue estimar el contenido de carbono en el área forestal del Parque Nacional La Malinche, es un ejemplo de aplicación de ecuaciones alométricas, para las coníferas de los géneros *Pinus* y *Abies* y para las latifoliadas de los géneros *Quercus* y *Alnus*. Las ecuaciones alométricas fueron tomadas de la tesis profesional de Ayala (1998) son:

$$\text{Ecuación alométrica coníferas: } PT = 0.084 * DN^{2.475}$$

$$\text{Ecuación alométrica latifoliadas: } PT = 1.91 * DN^{1.782}$$

Donde PT= peso seco total

La estimación arrojó que el Parque Nacional la Malinche almacena alrededor de 2,002,955.29 tC (Peña del Valle, 2003).

El uso de las ecuaciones volumétricas se basa en fórmulas de sólidos geométricos, utilizando de forma directa el DN y la altura registrados en campo, pero requiere el valor de la densidad de la madera específica. Debido a que algunos géneros presentan formas irregulares, la estimación de la biomasa a partir del volumen, se corrige con el uso del coeficiente mórfico forestal, que se refiere a la relación existente entre el volumen de un árbol y el volumen de un cilindro que tenga como base el área transversal del árbol a la altura del DN y como la altura la que corresponde al propio árbol (Caballero, 1982).

Fragoso (2003) elaboró un estudio en el predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, donde utilizó ecuaciones volumétricas para calcular la biomasa forestal aérea por especie en m³ y estimar el contenido de carbono apegándose a la propuesta del IPCC (1994), además calculó el incremento corriente anual para obtener la captura potencial de carbono a 10 años (Fragoso, 2003).

V. SITIO DE ESTUDIO

Volcán La Malinche

Generalidades

La Cordillera Volcánica Transmexicana esta integrada por diversas formaciones volcánicas entre las que se encuentra el volcán de La Malinche (Figura 2), localizado entre los estados de Tlaxcala y Puebla; su posición geográfica esta ubicada entre los de 19°06'04'' y 19°20'06'' latitud N, y 97°55'41'' y 98°10'52'' longitud W.



Figura 2. Vista panorámica del volcán La Malinche, 2004.

El volcán fue decretado Área Natural Protegida por el Presidente Lázaro Cárdenas el 21 de septiembre de 1938, con el carácter de Parque Nacional, decreto publicado en el diario Oficial el 6 de octubre del mismo año (Subsecretaría de Ecología, 1989). El propósito de su creación fue salvaguardar los ecosistemas forestales en beneficio de las comunidades rurales y para la protección del área de recarga de los acuíferos del valle poblano-tlaxcalteca.

El Parque tiene una totalidad de 45,711 ha de las cuales 33,032 ha corresponden a Tlaxcala y 12,679 ha a Puebla (Melo, 1977). El gobierno del estado de Tlaxcala, a través de la Coordinación General de Ecología administra este Parque, bajo un acuerdo de cooperación entre los estados de Puebla y Tlaxcala (Coordinación General de Ecología del Estado de Tlaxcala, 1999), dicho acuerdo fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de febrero de 1996.

Geología

El volcán La Malinche es la quinta elevación de la Cordillera Volcánica Transmexicana, alcanza una altitud de 4,461 m. De origen poligenético⁶, su formación data del Mioceno (Sánchez de Tagle, 1978).

Aunque se ha considerado a La Malinche como un volcán extinto, presentó una erupción en el 8,000 AC y debido a que se han reportado otros volcanes que han hecho erupción después de un largo período de inactividad, se identifica a este volcán como potencialmente activo que actualmente se encuentra en reposo. La estratigrafía del volcán está compuesta principalmente por depósitos piroclásticos de composición dacítica andesítica (Castro-Govea, 1999).

Edafología

Los suelos de La Malinche corresponden a derivados de cenizas volcánicas de andesita de hornblenda, que presentan un proceso de andosolización que se clasifica dentro del Orden Inceptisol. Por esta razón, los suelos que predominan en esta área son poco o nada útiles para el aprovechamiento agrícola y muy propensos a la erosión (Allende, 1968).

Hidrología

La Malinche forma parte de la cuenca hidrológica del río Atoyac-Zahuapan, aportando volúmenes considerables a las aguas subterráneas y de afloramiento, que se encuentran en la presa Manuel Ávila Camacho (Hommer, 2002).

El volcán presenta solo una corriente permanente, conocida como río Barranca Grande (Melo, 1977). En las laderas inferiores el nivel freático se encuentra bastante profundo (Espejel, 1998). En 1976, la precipitación pluvial de La Malinche provocaba un escurrimiento anual de 430m³/ha, estas aguas llenan los mantos freáticos con 150 millones de m³ al año, sin embargo, a medida que se desforesta, disminuye esta infiltración y, por el contrario, aumenta el arrastre y la erosión del suelo (Gobiernos de Tlaxcala y Puebla, 2001).

⁶ Poligenético: formado por varios eventos eruptivos.

Clima

El clima de La Malinche se puede expresar de acuerdo a pisos climáticos, debido a que en los diferentes niveles altitudinales, es posible encontrar variaciones significativas de temperatura y humedad (Figura 3).

El piso inferior es el templado subhúmedo marcado entre 18°C y 12°C; donde aparecen las primeras heladas con regularidad, que son el factor decisivo en el cambio de vegetación (Wilhelm y Stiehl, 1973).

El clima semifrío se ubica por encima de los 3,000 y hasta los 4,000 m donde la temperatura media fluctúa de 12°C a 5°C.

Por encima de los 4,000 m se encuentra un clima frío con temperaturas medias entre 5°C y -2°C (García, 1964; Lauer, 1973).

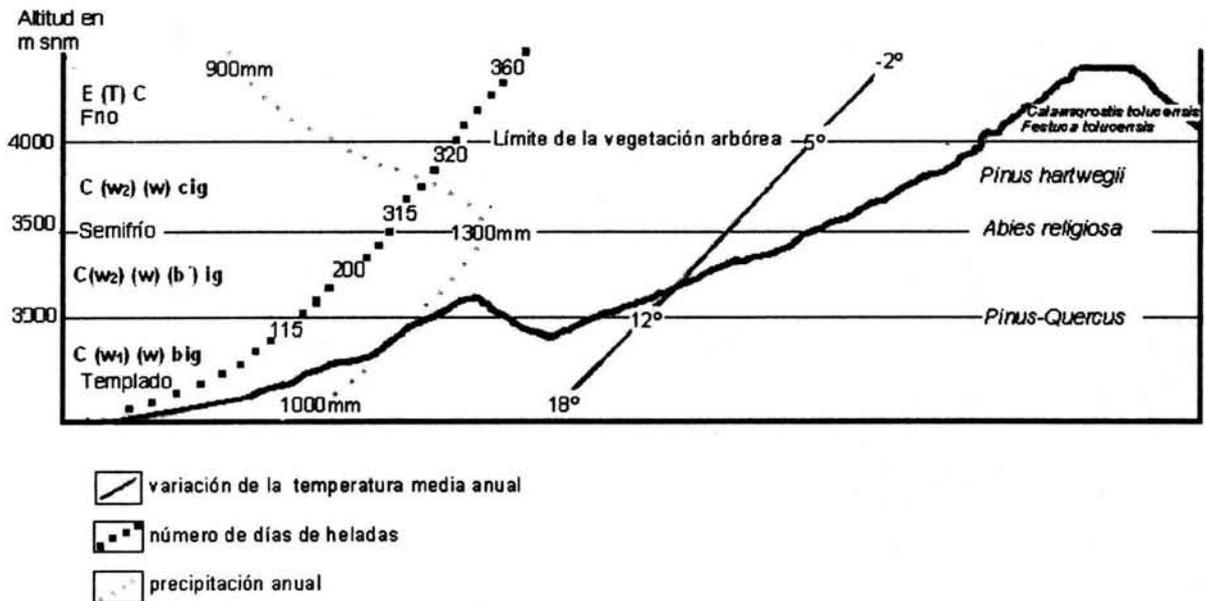


Figura 3. Pisos climáticos en el volcán La Malinche

Bosque de *Pinus hartwegii*

Pinus hartwegii es considerado como el pino mexicano mejor adaptado a frecuentes heladas nocturnas del clima de alta montaña (Sánchez de Tagle, 1978). La comunidad de *Pinus hartwegii* se distribuye en el volcán La Malinche por encima de los 3,200 m y hasta el límite superior arbóreo a los 4,000 m (Hommer, 2002).

El bosque de *Pinus hartwegii* esta asociado en sus niveles bajos a *Cupressus lindleyi* y *Alnus*, se desarrolla sobre sustratos más o menos ricos en humus. De 3,200 a 3,900 m es posible observar pequeños manchones de *Abies religiosa* entremezclados con esta comunidad hasta los 3600 m. La vegetación cerrada de árboles termina por encima de los 3,500 m snm y hasta el límite superior arbóreo a los 4,000 m, donde *Pinus hartwegii* es un bosque monoespecífico, persistiendo hasta el piso climático de 5° C (Rzedowski, 1978).

En La Malinche, como en los volcanes y algunas montañas de México *Pinus hartwegii* está presente como límite de la vegetación arbórea (Figura 4), restringido a la variación de la temperatura media anual, a la precipitación anual y al número de días de heladas. El límite superior de la vegetación arbórea esta asociado a los incendios forestales, pues estos le han brindado estabilidad a las poblaciones de *Pinus hartwegii* (Lauer, 1978).

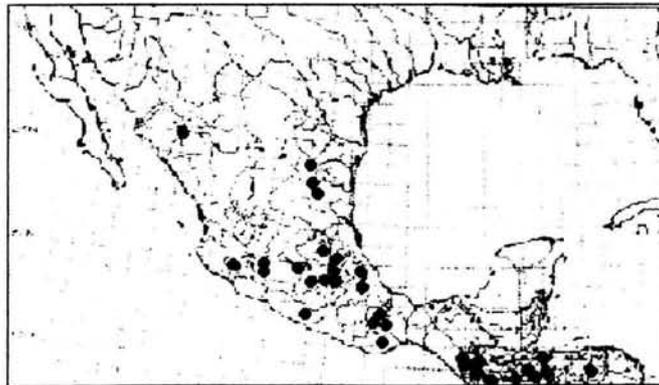


Figura 4. Distribución de *Pinus hartwegii*⁷

⁷ Tomado de Farjon y Styles, 1997.

VI. METODOS

En la Figura 5 se muestra el esquema general que describe el método seguido en el presente estudio que se apega a lo propuesto por el IPCC en 1994. Con el objetivo de conocer el contenido y la captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche inicialmente se elaboró un mapa base y se realizó trabajo de campo (en amarillo). Se consideró la obtención de parámetros básicos (en verde): se delimitó la superficie que cubre el bosque de *Pinus hartwegii*, se evaluó la estructura arbórea del bosque, se especificó la densidad de la madera, se calculó la biomasa, se definió el incremento corriente anual y la edad del bosque y se aplicaron factores estándares (en rosa) para la valoración final de contenido de carbono expresado en tC/ha (en azul) y la captura potencial expresada en tC/ha/año (en morado).

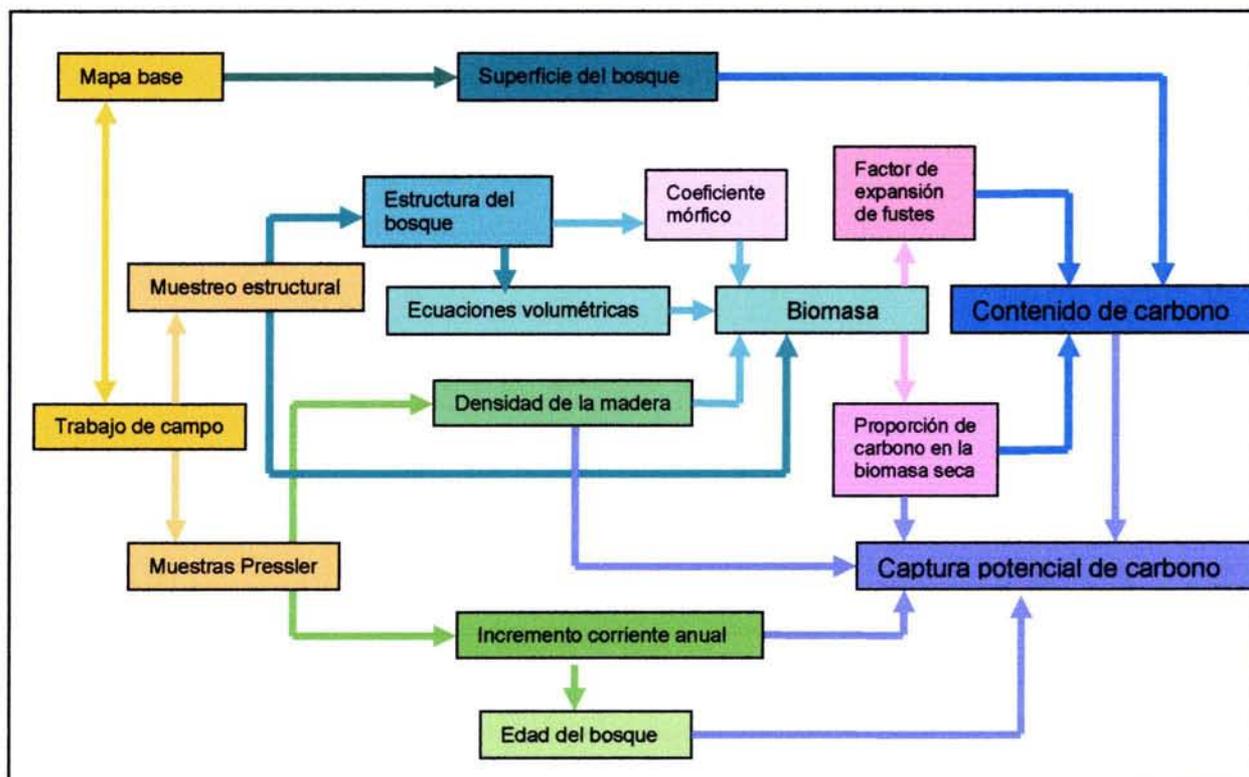


Figura 5. Diagrama de la metodología

Parámetros básicos

Mapa base

Se elaboró un mapa del área que ocupa el bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche. Para ello se tomo como referencia el Mapa de Vegetación y Uso de Suelo del volcán La Malinche Tlaxcala-Puebla elaborado por Peña del Valle (2003).

Se efectuó la fotointerpretación de 32 fotografías aéreas, con escala 1:25,000 del volcán (SECODUVI, 2001), sobre ellas se demarcó el polígono del Parque Nacional de acuerdo a los límites del decreto presidencial, y se definió el área forestal y de agricultura.

Se definieron los límites inferior y superior de distribución del bosque monoespecífico de *Pinus hartwegii*; con el uso del Modelo Digital del Terreno del volcán, por encima de la curva de nivel de los 3,600 m.

Se utilizaron 8 fotografías que incluyen al bosque de *Pinus hartwegii*, en ellas se delimitaron rodales de acuerdo a las características de estos bosques y su manifestación sobre la fotografía, propuestos por Ayala (1995):

- Tono homogéneo, en un rango de gris claro a gris oscuro, debido a la forma acicular de sus hojas ya que absorben gran cantidad de energía
- Textura es mediana pues la distribución del arbolado en el campo no es muy densa, pero está influida por el tamaño de los árboles y principalmente por la forma y disposición de la copa
- Forma del árbol observada en la fotografía aérea es esbelta de fuste amplio, recto y con alturas que van de 10 a 40 m, con ramificaciones sólo en la parte alta de este. La copa se ve de forma circular a hemisférica.

El procesamiento cartográfico de la información se realizó mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) ILWIS⁸, que permitió la integración de las ortofotos georreferidas (archivos raster) así como de bases de datos vectoriales (segmentos) contenidos en el incluyendo la delimitación precisa del bosque de *Pinus hartwegii*.

⁸ Integrated Land and Water Information System

Trabajo de campo

Una vez establecidos cartográficamente los rodales del bosque monoespecífico de *Pinus hartwegii*, se realizaron recorridos de tipo exploratorio, con el fin de corroborar el tipo de vegetación, en la ladera norte del volcán y en la ladera sureste, pues la vertiente sur del volcán se caracteriza por grandes barrancas de difícil acceso.

El tamaño de la muestra fue establecido a partir de los valores de varianza y de desviación estándar del DN en metros de todos los árboles de un muestreo previo (Anexo 1).

Para verificar la intensidad de muestreo se utilizó la fórmula, propuesta por Husch *et al.*, en 1972:

$$N = \frac{t^2 (S\%)^2}{(E\%)^2}$$

Donde:

N= número de la muestra

t²= valor de T de student (utilizando el valor de tablas)

S %= coeficiente de varianza

E %= error permitido

A partir de los datos del muestreo mínimo a realizar se seleccionaron 2 sitios de muestreo que estuvieran ubicados en los límites altitudinales definidos y localizados en las laderas N y SE, bajo el supuesto de que se encontrarían diferencias de acuerdo a la ladera en la cantidad de radiación solar y el viento.

Los muestreos se hicieron siguiendo el método propuesto por Peña del Valle (2003), para el volcán La Malinche, el cual consiste en inventariar 10 círculos con una superficie de 0.1ha, para cubrir una superficie total de 1ha (Figura 6). Se consideró esta cobertura con el fin de tener una representación espacial del terreno en las fotografías aéreas.

Los círculos se establecieron paralelos a la pendiente, arreglaron de acuerdo a la forma de distribución de la comunidad vegetal en cada sitio. El arreglo de los círculos ideal es 2 líneas de 5 círculos, separados por 50 m del centro del primero al segundo. Cada círculo tiene 17.8m de radio.

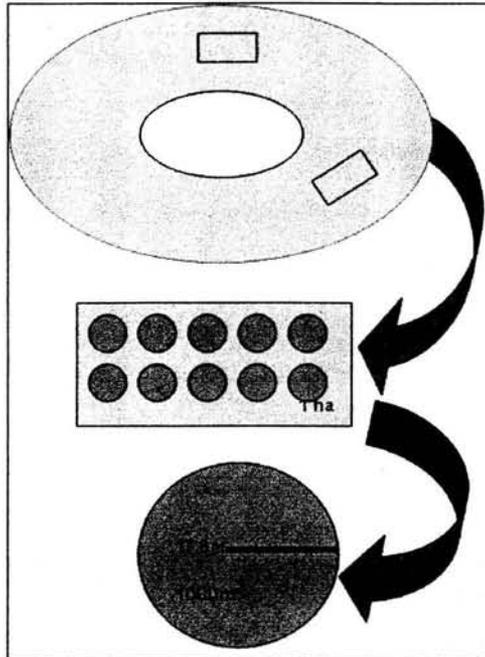


Figura 6. Diagrama del muestreo

En cada círculo se inventariaron todos los árboles de *Pinus hartwegii*, con altura mayor a 1.3m. De cada individuo marcado se registró su DN y altura. La altura del árbol en metros fue calculada con el uso de ecuaciones trigonométricas.

Para estimar la densidad de la madera y el incremento corriente anual se tomaron muestras de árboles en pie de los sitios, con el uso el taladro Pressler para extraer muestras pequeñas de madera. Se seleccionó un árbol en cada uno de los 10 círculos del sitio para ambas laderas; se tomó en cuenta que tuvieran un DN mayor a 30cm, y estuvieran libres de plagas y enfermedades. Cada muestra Pressler, se guardó en un popote de plástico para su traslado y se almacenó en una caja de unicel para evitar su deshidratación. Luego de obtener la muestra, se cubrió la herida del árbol con cera de Campeche, para protegerlos de parásitos o plagas.

Análisis estructural

Para definir la estructura espacial y cuantitativa del bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche, se consideró como unidad mínima de muestreo cada círculo es decir 0.1ha.

Con los datos obtenidos en campo se procedió al análisis descriptivo sobre densidad de individuos, área basal, estructura diamétrica y vertical.

Para la densidad del arbolado se utilizó directamente el inventario.

El área basal es una medida del espacio horizontal ocupado, es considerada para estimar el volumen de especies arbóreas o arbustivas y como indicadora de cobertura y dominancia de una especie en un área determinada. En el caso de árboles éste parámetro se obtiene a partir del DN como explica la fórmula, propuesta por Mostacedo y Fredericksen (2000):

$$AB = \pi (DN^2/4)$$

Donde:

AB= área basal (m²)

π = 3.1416

DN²= diámetro normalizado al cuadrado (m)

En lo referente a las alturas, con el uso de ecuaciones trigonométricas se encontraron algunas sobreestimaciones, por lo que se recurrió al uso de la ecuación alométrica, propuesta por Franco *et al.*, 2004:

$$h = -0.0027*(DN)^2 + 0.5968*(DN) + 0.5027$$

Donde:

h = altura total (m)

DN=diámetro normalizado (cm)

Para el análisis del DN y la altura los individuos se agruparon en 10 clases, con el mismo intervalo entre clases (Anexo 2).

Densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl.

Con el fin de estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* se utilizó el método empírico propuesto por Valencia y Vargas (1997) y el método tradicional de máximo contenido de humedad propuesto por Smith (1954).

Se utilizaron las 22 muestras Pressler, obtenidas en campo, después de 24 horas de la extracción, se pesaron en una balanza analítica con una precisión de 0.0001g, y se registró el peso inicial (Pi).

Para el método empírico (Valencia y Vargas, 1997) se calculó el volumen verde de las muestras considerándolas como un cilindro perfecto, se midió con un vernier su diámetro y se aplicó la siguiente fórmula:

$$Vv = \pi * D^2 * L / 4$$

Donde:

Vv= volumen estimado del cilindro de la madera (cm³)

$\pi = 3.1416$

D= diámetro de la muestra de madera Pressler (cm²)

L=largo de la muestra de madera Pressler (cm)

Después se obtuvo el peso anhidro (Po) de cada muestra, para ello se dejaron por 24 horas a temperatura ambiente para eliminar el exceso de agua. Posteriormente se colocaron en una estufa de secado con temperaturas de 100 a 105° C, durante 24 horas. Se pesaron en una balanza analítica con una precisión de 0.0001g. Con los 2 valores obtenidos se aplicó la fórmula de la densidad de la madera, propuesta por Valencia y Vargas (1997):

$$DM = Po / Vv$$

Donde:

DM= densidad de la madera (g/cm³)

Po= peso anhidro (g)

Vv=volumen verde (cm³)

Para el método de máximo contenido de humedad (Smith, 1954) las muestras Pressler se colocaron en un recipiente con agua durante 8 días para lograr la penetración total de agua en la muestra, y obtener un peso constante en la balanza. Se sacaron del recipiente quitando el exceso de agua y luego de 24 horas se pesaron en la balanza analítica, de este modo se obtuvo el peso saturado (Ps).

Con las variables de peso anhidro y peso saturado se calculó la densidad de la madera para cada muestra, utilizando la fórmula del método de máximo contenido de humedad (Smith, 1954):

$$DM = \frac{1}{\frac{Ps - Po}{Po} + \frac{1}{1.53}}$$

Donde:

DM = Densidad de la madera (g/cm³)

Ps = Peso saturado (g)

Po = Peso anhidro (g)

1.53 = gravedad específica de la madera sólida

Por último las estimaciones de densidad de los 2 métodos se compararon por medio de una correlación simple, y se especificó el valor de la densidad de *Pinus hartwegii*.

Biomasa

La biomasa es la masa total de organismos vivos en una zona (IPCC, 2001).

Con los datos de estructura por árbol se obtuvo su volumen, este dato se multiplicó con el coeficiente mórfo forestal, para obtener el volumen en metros cúbicos de acuerdo con la fórmula propuesta por Grijpma (2001):

$$V = (DN^2) * (0.7854) * (h) * (0.7)$$

Donde:

V= volumen (m³)

DN²= diámetro normalizado al cuadrado (cm)

0.7854= $\pi / 4$

h= altura del árbol (m)

0.7= coeficiente mórfo forestal

Una vez obtenido el volumen se multiplicó por la densidad de la madera obtenida para *Pinus hartwegii*, para saber la biomasa de cada árbol en toneladas, de acuerdo con la fórmula propuesta por Brown (1984):

$$B = V * DM$$

Donde:

B= biomasa (t)

V= volumen (m³)

DM= densidad de la madera (t/m³)

Incremento corriente anual

Se calculó el ICA de los árboles de acuerdo con el registro en los anillos de crecimiento de las muestras Pressler extraídas. Las muestras Pressler fueron secadas a temperatura ambiente por una semana, y pegadas con resistol blanco al porta virutas, alineando verticalmente las traqueidas del xilema. Para poder observar de manera clara los anillos de crecimiento, las muestras se lijaron manualmente con lija de papel del grano mayor al menor (medidas 150, 360, 600, y 1500).

Se utilizó un micrómetro con platina de fase deslizante, un microscopio óptico conectado a una computadora, con el programa TRIMS⁹ instalado, como lo sugiere Gutiérrez (2004).

Las muestras fueron medidas una por una deslizando la platina y observando la muestra en un estereoscopio con ocular en cruz. Se comenzó a medir de la médula a la corteza, contando cada anillo de crecimiento identificando madera de primavera y madera de otoño¹⁰. Cada vez que en alguna de las divisiones del ocular en cruz se llega al anillo, se presiona el botón del micrómetro.

Este método proporciona una exactitud de 0.01mm. Todas las medidas se registraron en la computadora y se recuperaron como hojas de cálculo en Excel.

Con la base de datos se determinó el diámetro de cada muestra, de acuerdo a cada anillo de crecimiento presente. Así se pudo obtener el diámetro de cada año, por ejemplo el diámetro del año 0 es igual a 0, el del año 1 será el diámetro 0 más la diferencia entre diámetro 1 y diámetro 0 (DN calculado).

A partir del DN calculado, se recurrió al uso de la ecuación alométrica, propuesta por Franco *et al.*, (2004) para estimar la altura y poder conocer el volumen del árbol en un año determinado. El incremento corriente anual (ICA) es el aumento volumétrico en una hectárea durante la edad del árbol, en cierto año (Grijpma, 2001; Ordóñez, 1999).

⁹ Tree Ring Incremental Measuring System de la compañía Madera Software localizada en 2509 North Campbell Avenue #386, Tucson Arizona 85719, USA

¹⁰ Anillo de crecimiento: capa de crecimiento del xilema secundario vista en sección transversal. Esta compuesto por madera de primavera (primera madera que forma el incremento del crecimiento, contiene células grandes, también llamada temprana) y madera de otoño (última parte del incremento de crecimiento; contiene células más pequeñas y es más denso que la madera de primavera) (Raven *et al.*, 1992).

Se calculó el ICA para cada árbol muestreado, que es la diferencia entre el volumen de una edad del árbol en un año determinado con respecto al año anterior.

$$ICAa = V2 - V1$$

Donde:

ICAa= incremento corriente anual del árbol(m³/año)

V1= volumen en el año 1

V2= volumen en el año 2

Posteriormente se obtuvo el ICA para cada círculo, para ello se multiplicó el ICAa por la densidad de arbolado que presentó el círculo:

$$ICAc = ICAa * Da$$

Donde:

ICAc= incremento corriente anual del círculo (m³/0.1ha/año)

ICAa= incremento corriente anual del árbol (m³/año)

Da= densidad del arbolado

Después se calculó el ICA para cada sitio, se promedió el ICAa y se multiplicó por la densidad del arbolado que presentó el sitio:

$$ICAs = (\sum ICAa / 10) * Da$$

Donde:

ICAs= incremento corriente anual del sitio (m³/0.1ha/año)

ICAa= incremento corriente anual del árbol (m³/año)

Da= densidad del arbolado

Edad del bosque

En el tratamiento de la información del ICA se calcularon los DN y la altura, de todas las muestras para cada año, considerando que se forma un anillo de crecimiento anualmente, y se discriminaron los anillos falsos, se estimó la edad de los árboles de acuerdo con el número de anillos de crecimiento.

Después se hizo una correlación de el DN y la altura con la edad, a partir de la cual se pudo estimar la edad de cada árbol inventariado.

Estimación del contenido de carbono

Una vez calculada la biomasa de cada árbol, se multiplicó por el factor de expansión de fustes, para incluir otros componentes de la biomasa, no obtenidos directamente como son ramas, follaje y raíces.

Posteriormente se multiplicó por el contenido de carbono, que indica la proporción de carbono en la biomasa de cada árbol, el IPCC (1996) sugiere que la materia vegetal seca contiene entre el 45 y 50% de carbono, se utilizó el valor más conservador, que es de 0.45 tC (toneladas de carbono).

$$CCa = B * 1.3 * 0.45$$

Donde:

CCa= contenido de carbono por árbol (tC)

B= biomasa (t)

1.3= factor de expansión de fustes

0.45= proporción de carbono en la biomasa seca (tC)

Se calculó de carbono de todos los árboles de cada círculo, sumando los valores de CCa, expresado en tC/0.1ha.

$$CCc = \sum (CCa)$$

Donde:

CCc= contenido de carbono por círculo (tC/0.1 ha)

CCa= contenido de carbono por árbol (tC)

Después se calculó el contenido de carbono por sitio, sumando los CCc de todos los círculos, para obtener el contenido de carbono expresado en tC/ha

$$CCs = \sum (CCc)$$

Donde:

CCs= contenido de carbono por sitio (tC/ha)

CCc= contenido de carbono por círculo (tC/0.1ha)

Para conocer el contenido de carbono total del bosque de *Pinus hartwegii*, se multiplicó el valor promedio de CCs de ambos sitios en tC/ha por la superficie del bosque.

$$CCT = (\sum CCs/2) * Sb$$

Donde:

CCT= contenido de carbono total (tC)

CCs= contenido de carbono por sitio (tC/ha)

Sb= superficie del bosque (ha)

Estimación de la captura potencial de carbono

Para la estimación de la captura potencial de carbono se utilizó el cálculo del contenido de carbono y la edad promedio del círculo, a partir de la cual comenzó la proyección.

Se utilizó el cálculo del ICA, para saber el incremento en volumen que tendrían los árboles del círculo, correspondiente a cada año.

$$Ve = Vc + ICA$$

Donde:

Ve= volumen estimado para el círculo en una edad ($m^3/0.1ha/año$)

Vc= volumen calculado para el círculo (m^3)

ICA= incremento corriente anual ($m^3/0.1ha/año$)

Posteriormente se aplicaron los parámetros utilizados en el cálculo de biomasa y contenido de carbono.

$$B = (Ve) * (DM)$$

Donde:

B= biomasa (t/año)

Ve= volumen estimado para el círculo en una edad ($m^3/año$)

DM= densidad de la madera (t/m^3)

De esta forma se generaron escenarios a 5, 10, 15, 20, 25, 40 y 50 años, en la proyección no se tomaron en cuenta los árboles de 100 años de edad, pues su crecimiento es muy pequeño.

Primero se hizo la proyección por círculo:

$$CPCc = (B) (0.45)$$

Donde:

CPCc= captura potencial de carbono por círculo(tC/0.1ha/año)

B= biomasa (t/0.1ha/año)

0.45= proporción de carbono en la biomasa seca (tC)

Después se hizo el cálculo por sitio, sumando los valores CPCc de los círculos que llegaron al año correspondiente a cada escenario. Con el fin de obtener la captura potencial de carbono expresada en tC/ha/año.

$$CPCs = \Sigma (CPCc)$$

Donde:

CPCs= captura potencial de carbono por sitio (tC/ha/año)

CPCc= captura potencial de carbono por círculo (tC/0.1ha/año)

VII. RESULTADOS

Parámetros básicos

Mapa base

En la Figura 7 se presenta el mapa que describe al Parque Nacional La Malinche con una superficie de 22,952 ha con uso de suelo forestal, de estas 546 ha corresponden a la comunidad monoespecífica de de *Pinus hartwegii*, es decir un 2.3% del total. Tomando como base mapa de comunidades vegetales y uso de suelo realizado por Peña del Valle (2003), en este trabajo se resumieron las categorías de información a 5 con el fin de evidenciar el área de cobertura de *Pinus hartwegii* (Tabla 4).

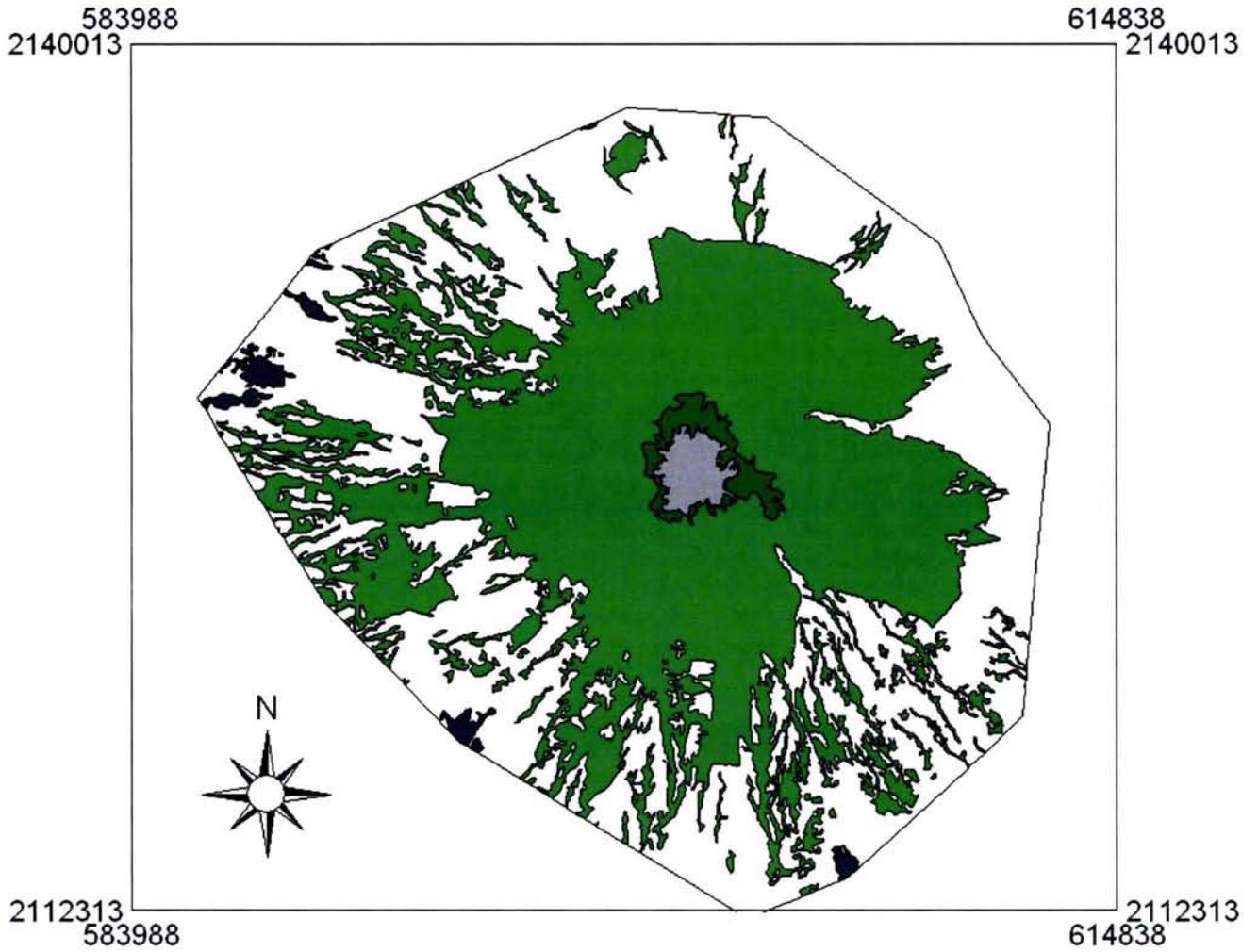
Tabla 4. Uso de suelo y vegetación del volcán La Malinche, Tlaxcala-Puebla.

Categorías	Área(m ²)	Hectáreas
Agricultura	219,879,468	21,988
Forestal	224,061,239	22,406
<i>Pinus hartwegii</i>	5,464,275	546
Sin vegetación arbórea	4,677,620	468
Zona urbana	4,320,789	432
Total	458,403,391	45,840

La categoría Forestal agrupa a los polígonos que pertenecen a otros tipos de bosques como otras especies de pino, oyamel, encino, pino-encino, encino-pino, y pino-oyamel.

La categoría sin vegetación arbórea, incluye pastizal de alta montaña y áreas que corresponden a morrenas y vestigios de glaciares rocosos; en el nivel altitudinal inferior inmediato a esta categoría se encuentra el bosque de *Pinus hartwegii*, como límite superior de la vegetación arbórea en el volcán La Malinche.

1 : 250000



- Pinus hartwegii
- Forestal
- Agricultura
- Sin vegetación arborea
- Zona urbana

Figura 7. Mapa de superficie forestal del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala-Puebla.

La altitud en la que se establecieron los sitios de muestreo corresponde al límite inferior del bosque monoespecífico de *Pinus hartwegii*, y tiene una representación del 0.4% de la superficie del bosque (Figura 8).

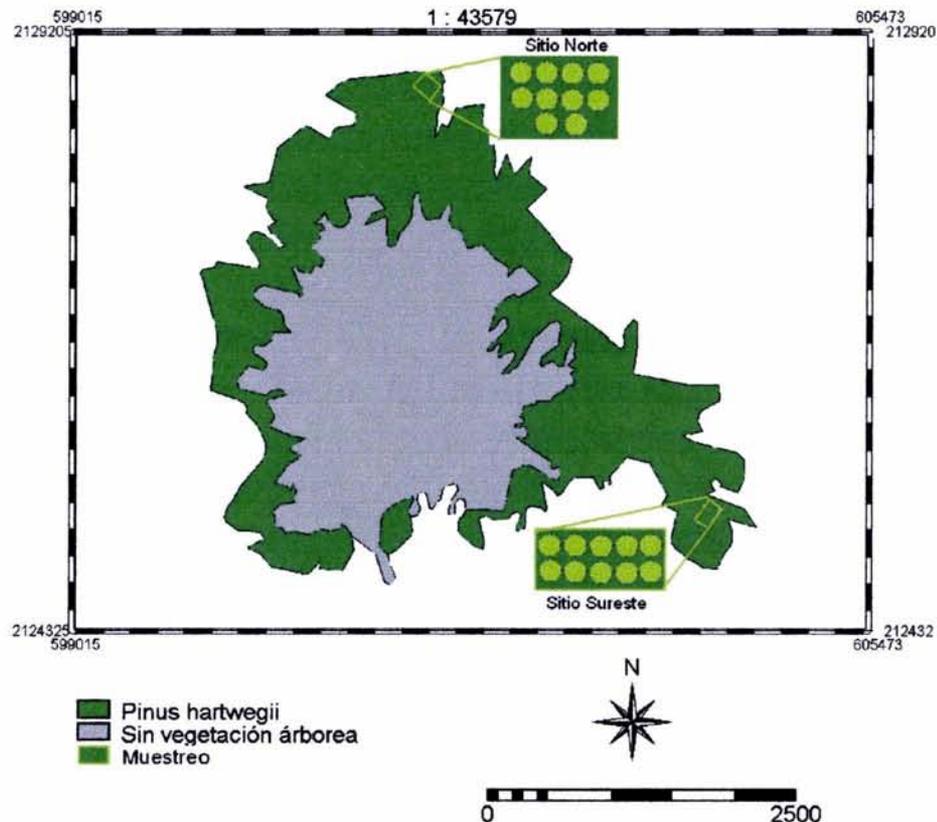


Figura 8. Distribución del bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche, y localización de sitios de muestreo.

En la ladera Norte, los círculos de la hectárea muestreada se organizaron paralelos a la curva de nivel de los 3,650 m en un arreglo espacial de 3 líneas, 2 de 4 círculos y una de 2 círculos. Sobre una pendiente entre 20 y 25 ° y suelos poco profundos con un clima semifrío. Este sitio se nombró como sitio N.

En la ladera Sureste la distribución de los círculos tuvo un arreglo espacial de 2 líneas de 5 círculos; esta hectárea se localiza paralela a la curva de nivel de los 3,670 m, sobre una pendiente entre 17 y 25 ° y suelos poco profundos; con un clima semifrío, a este sitio se nombró sitio SE.

Análisis estructural

El sitio N presenta una densidad de 320 individuos/ha (Tabla 5). Los árboles tienen un diámetro promedio de 26.8cm y una altura promedio de 13.8m. El área basal de los árboles ocupa una superficie de 23.3m².

Tabla 5. Densidad, promedio de DN, promedio de alturas y cobertura del área basal por círculos en el sitio N

Círculo	Densidad de arbolado	DN promedio (cm)	Altura promedio (m)	Área basal (m ²)
1	32	35.0	17.9	3.2
2	24	33.5	16.8	2.6
3	24	16.4	9.0	0.9
4	28	15.3	8.2	1.2
5	34	28.2	14.7	2.6
6	71	16.4	8.9	2.7
7	27	32.7	16.5	2.8
8	26	31.0	15.2	2.9
9	29	31.8	16.6	2.5
10	25	27.4	14.2	2.0
Promedio		26.8	13.8	
Σ	320			23.3

El sitio SE presenta una densidad de 105 individuos/ha (Tabla 6). Los árboles tienen un diámetro promedio de 47.9cm y una altura promedio de 22.9m. El área basal de los árboles ocupa una superficie de 20.8m².

Tabla 6. Densidad, promedio de DN, promedio de alturas y cobertura del área basal por círculos en el sitio SE.

Círculo	Densidad de arbolado	DN promedio (cm)	Altura promedio(m)	Área basal (m ²)
1	7	59.6	25.4	2.2
2	9	51.5	23.3	2.1
3	2	41.4	20.3	0.3
4	3	52.9	24.1	0.7
5	3	44.9	21.8	0.5
6	12	46.7	22.1	2.2
7	18	50.4	23.4	3.8
8	28	41.5	20.3	4.0
9	18	49.3	22.9	3.7
10	5	58.3	25.7	1.4
Promedio		47.9	22.9	
Σ	105			22.9

Los sitios difirieron significativamente en cuanto a la estructura diamétrica (Figura 9). En la grafica del sitio N se encuentran a la mayoría de los individuos en las 5 primeras clases, acentuándose la frecuencia de la clase 1, de ahí que la cobertura en área basal no fuera muy grande; esta grafica presenta una tendencia sigmoidea cargada a la izquierda (Anexo 2). En el sitio SE la grafica presenta distribución normal, con una frecuencia mayor en las clases 4, 5 y 6.

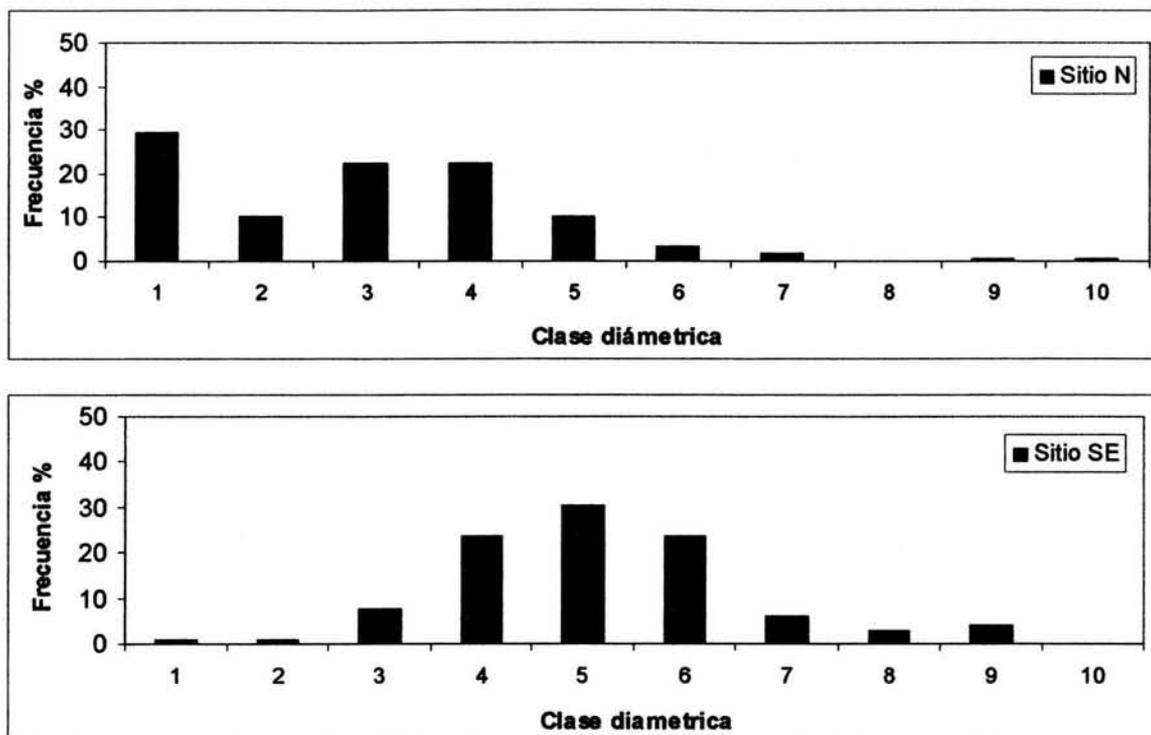


Figura 9. Estructura diamétrica, por clases, sitios Norte y Sureste.

Respecto a la estructura vertical, los sitios difirieron significativamente, de acuerdo con la Figura 10. En el sitio N la grafica presenta una forma sigmoidea, destaca la frecuencia de la clase 1 y 2, lo que revela que en este sitio hay muchos individuos jóvenes, pero también la frecuencia de individuos aumenta en las clases 5 y 6 (Anexo 2). Mientras que en el sitio SE la mayor frecuencia de individuos se ubico en las clases 7 y 8, la grafica presenta una distribución normal cargada hacia la derecha.

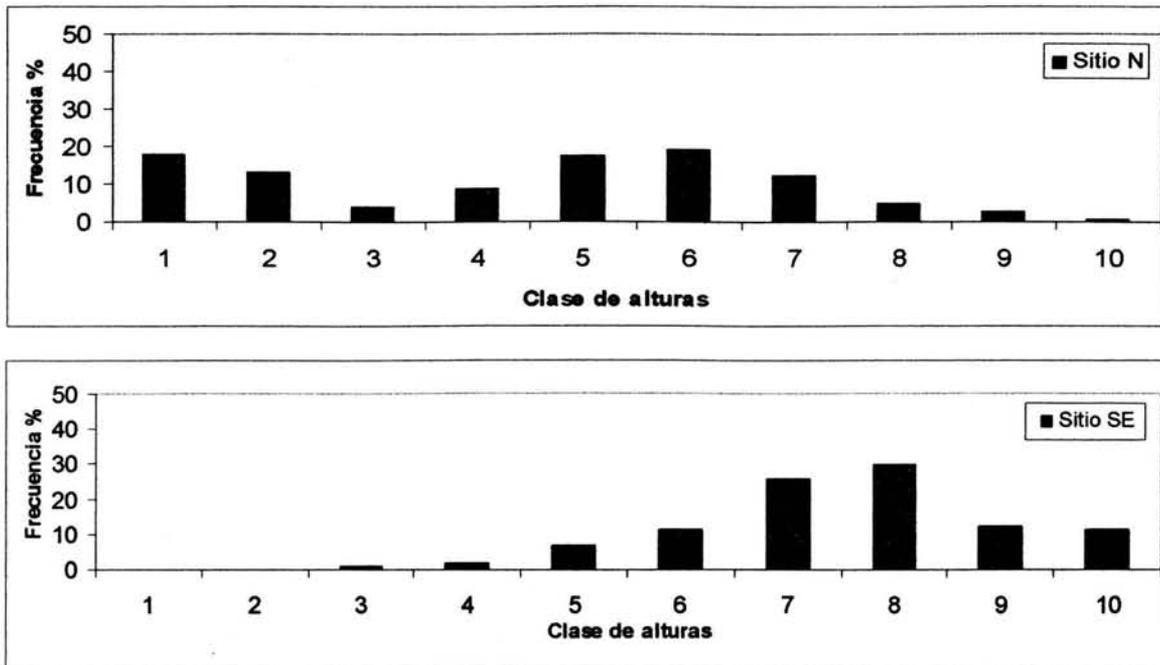


Figura 10. Estructura vertical, por clases, de los sitios N y SE.

Densidad de la madera

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de densidad (DM) por dos métodos. Los datos fueron obtenidos a partir de las mediciones hechas con el uso de las muestras Pressler extraídas en campo. Se indica el sitio y el círculo de donde se extrajeron. Se muestran las características de las 22 muestras: peso inicial (Pi), longitud, diámetro, volumen verde (VV), peso anhidro (Po) y peso saturado (Ps). El valor promedio de la densidad obtenida por el método empírico (Valencia y Vargas, 1997) fue de 0.4967 g/cm^3 , con un valor mínimo de 0.4167 g/cm^3 y máximo de 0.5847 g/cm^3 .

El valor promedio de la densidad obtenida por el método de máximo contenido de humedad (Smith, 1954) fue de 0.4964 g/cm^3 , con un valor mínimo de 0.4152 g/cm^3 y máximo de 0.5812 g/cm^3 .

Ajustando a tres decimales el valor obtenido por ambos métodos es el mismo: 0.496 g/cm^3 .

Tabla 7. Densidad de la madera de *Pinus hartwegii*

Muestra	Pi (g)	long (cm)	Diámetro (cm)	VV (cm)	Po (g)	Ps (g)	DM Valencia y Vargas	DM Smith
sNc1	4.169	26.0	0.50	5.105	2.833	6.117	0.555	0.552
sNc2	5.201	27.1	0.50	5.321	2.905	6.416	0.546	0.537
sNc3	4.749	28.8	0.50	5.655	2.924	6.688	0.517	0.515
sNc4	4.301	26.9	0.50	5.282	2.445	6.146	0.463	0.461
sNc5	4.513	26.2	0.50	5.144	2.807	6.158	0.546	0.541
sNc6	3.707	26.0	0.45	4.135	1.995	4.789	0.482	0.487
sNc7	5.709	30.5	0.50	5.989	3.424	7.132	0.572	0.576
sNc8	6.024	31.0	0.50	6.087	3.182	7.190	0.523	0.523
sNc9	5.319	27.7	0.50	5.439	2.750	6.382	0.506	0.507
sNc10	4.625	25.0	0.50	4.909	2.870	5.932	0.585	0.581
sNr10	5.679	29.4	0.50	5.773	2.405	6.626	0.417	0.415
sSEc1	5.623	28.6	0.50	5.616	2.634	6.532	0.469	0.469
sSEc2	6.457	29.5	0.50	5.792	2.502	6.653	0.432	0.432
sSEc3	6.792	32.2	0.50	6.322	3.065	7.404	0.485	0.483
sSEc4	5.581	30.7	0.50	6.028	3.064	7.090	0.508	0.508
sSEc5	6.545	31.2	0.50	6.126	2.783	7.042	0.454	0.458
sSEc6	6.582	32.0	0.50	6.283	2.781	7.187	0.443	0.447
sSEc7	6.512	34.7	0.50	6.813	3.416	7.988	0.501	0.502
sSEc8	5.706	28.6	0.50	5.616	2.658	6.500	0.473	0.476
sSEc9	7.074	33.0	0.50	6.480	2.828	7.473	0.436	0.435
sSEc10	4.633	26.1	0.50	5.125	2.707	6.076	0.528	0.527
sSEr1	5.995	30.3	0.50	5.949	2.891	6.929	0.486	0.498
Promedio							0.496	0.496

Conforme a la clasificación de la madera desarrollada por Markwar y Meck de acuerdo con su densidad (g/cm^3) en relación a su peso anhidro sobre su volumen verde (Echenique y Díaz, 1972) la madera de *Pinus hartwegii* es moderadamente pesada (Anexo 3). La densidad se puede expresar en diferentes unidades, para el cálculo de biomasa arbórea se utilizará el valor de $0.496 \text{ ton}/\text{m}^3$; para un manejo más simple de las unidades.

La correlación simple entre los valores de densidad de la madera obtenidos con el método empírico y el método de máximo contenido de humedad fue de $R^2=0.995$ (Figura 11). Se consideró que no existe una diferencia significativa entre los métodos utilizados, este alto valor de correlación muestra que el método empírico puede emplearse confiablemente para calcular el volumen de las muestras Pressler, debido a que es una forma más rápida y sencilla en comparación con el método tradicional de máximo contenido de humedad.

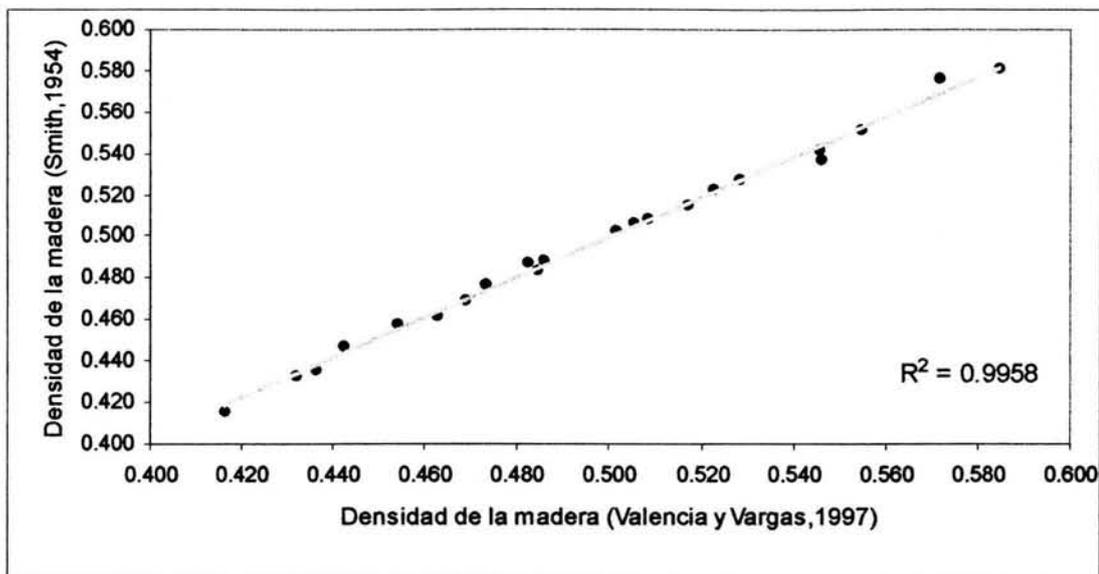


Figura 11. Correlación de la Densidad de la madera *Pinus hartwegii*, por dos métodos.

Resultados similares de correlación se han comprobado en muestras de madera obtenidas de una plantación de progenies de *Pinus patula* donde se compararon los valores de densidad de la madera, obtenidos con el método empírico y el método de máximo contenido de humedad, en 48 árboles, en los cuales se obtuvieron prácticamente los mismos valores de densidad de la madera con ambos métodos, con una correlación de $r=0.99$ entre dichos valores (Valencia, 1994).

En un estudio realizado en una plantación de *Pinus greggii*, se seleccionaron 15 árboles, donde se utilizaron 3 métodos para estimar la densidad. La correlación simple entre los valores de densidad de la madera obtenidos por medio del método empírico y los valores del método de desplazamiento en agua fue de $r=0.96$, mientras que la correlación de los valores del método empírico con los valores del método de máximo contenido de humedad fue de $r=0.99$ (Valencia y Vargas, 1997).

Biomasa

En la Tabla 8, se presenta el volumen y la biomasa de los árboles de cada círculo del sitio N. Los círculos 5 y 6 presentan cuantitativamente una biomasa análoga, aunque en cuanto a la densidad de individuos difieran considerablemente; el círculo 5 tiene 34 individuos, mientras que el 6 presenta 71.

El círculo 1 y el 7 también presentan cantidades de biomasa similares, pero en este caso la diferencia en la densidad de individuos no es significativa (Tabla 5). El círculo 8, presenta la mayor cantidad de biomasa y el 3 la menor; y la densidad de individuos en ambos círculos difiere solo por 2 individuos; pero los individuos del círculo 3 son de tallas menores en cuanto a su DN y altura.

Tabla 8. Volumen y Biomasa de los árboles en los círculos del sitio N

Círculo	Volumen (m ³)	Biomasa (t)
1	43.3	21.5
2	39.3	19.5
3	11.5	5.7
4	19.1	9.5
5	34.1	16.9
6	34.4	17.1
7	42.7	21.2
8	49.0	24.3
9	32.1	15.9
10	27.7	13.7
Promedio	33.3	16.5

En los círculos del sitio SE (Tabla 9) la cantidad de biomasa es similar en los círculos 7, 8 y 9. De éstos los círculos 7 y 9 tienen 18 individuos y son de tallas similares en cuanto a diámetro y altura, pero el círculo 8 tiene 28 individuos (ver Tabla 6); la diferencia radica en que estos individuos presentan un diámetro promedio 10 cm menor que los individuos de los círculos 7 y 9.

Los círculos 3, 4 y 5 presentan pocos individuos, por lo que la biomasa es también escasa. Los círculos 1 y 2 con 7 y 9 individuos respectivamente, presentan una biomasa similar. Cabe recordar que el arreglo de los círculos en este sitio fue de 2 líneas de 5, lo que puede explicar que círculos continuos presenten características similares.

Tabla 9. Volumen y Biomasa de los árboles en los círculos del sitio SE

Círculo	Volumen (m ³)	Biomasa (t)
1	43.7	21.7
2	38.4	19.1
3	4.3	2.1
4	12.6	6.3
5	7.5	3.7
6	36.6	18.2
7	65.6	32.6
8	62.2	32.0
9	64.5	32.0
10	26.6	13.2
Promedio	36.2	18.1

Incremento corriente anual

De acuerdo con las mediciones obtenidas con el uso del programa TRIMS, y con el posterior manejo de datos se obtuvo el ICA del árbol muestreado de cada círculo, los cuales se promediaron para definir el ICA para cada sitio.

En la gráfica de la Figura 12 se presenta el ICA promedio para ambos sitios.

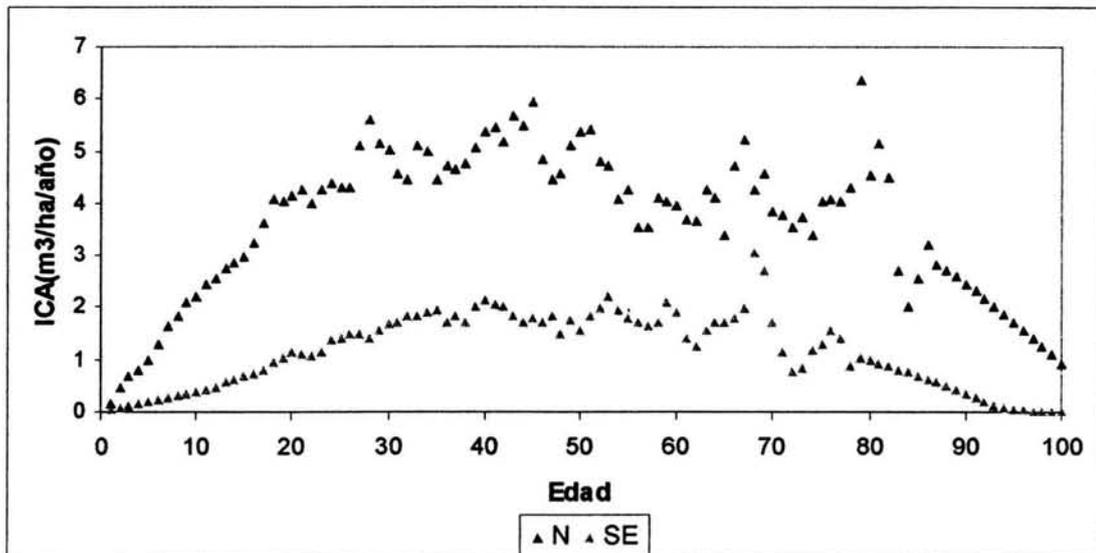


Figura 12. Incremento corriente anual de los sitios N y SE

En los 2 sitios durante los primeros 10 años el crecimiento es lento, entre los 20 y 50 años el crecimiento se acelera y disminuye entre los 80 y 100 años

Se encontró que el sitio N presenta un crecimiento máximo de alrededor de 5 m³/ha/año y el sitio SE un crecimiento máximo de alrededor de 2m³/ha/año.

Calidad de sitio

Existe una relación entre el crecimiento y los factores ambientales que se puede expresar en las curvas de crecimiento de los árboles sugiriendo una calidad de sitio.

Barnes (1962) definió la calidad de sitio como la capacidad productiva de un área forestal determinada por clima, suelo, topografía y otros factores fisiográficos y microbiológicos.

Se presentan las gráficas de cada círculo, donde se relaciona la edad promedio de los árboles contra el ICA ($m^3/0.1ha/año$) y se agruparon de acuerdo a al volumen máximo de crecimiento (Figuras 13 a 17).

Este tipo de curvas permite conocer la calidad del sitio que puede ser interpretada como la capacidad productiva de una localidad para el crecimiento de una especie determinada. Grijpma (2001), propone que los sitios pueden ir de I a V, siendo I la calidad óptima del sitio y V la menor calidad de sitio.

De acuerdo con los resultados de este estudio se propone una escala para determinar la calidad de sitio de los rodales monoespecíficos no coetáneos de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche (Tabla 10), estimada a partir del máximo volumen que presentó cada rodal del bosque (Daniel *et al.*, 1982).

Tabla 10. Calidad de sitio de acuerdo con el ICA para bosque de *Pinus hartwegii*

Calidad de sitio 0.1ha	ICA ($m^3/0.1ha/año$)
I	entre 0-3
II	entre 0-2
III	entre 0-1.4
IV	entre 0-0.8
V	entre 0-0.2

Calidad de sitio I

El círculo 6 del sitio N presenta calidad de sitio I, es decir el crecimiento óptimo. La Figura 13 muestra que el crecimiento va de 0 a 3 $m^3/0.1ha/año$. Este crecimiento se estabiliza alrededor de la edad 40 de los árboles, y disminuye a partir de los 70 años.

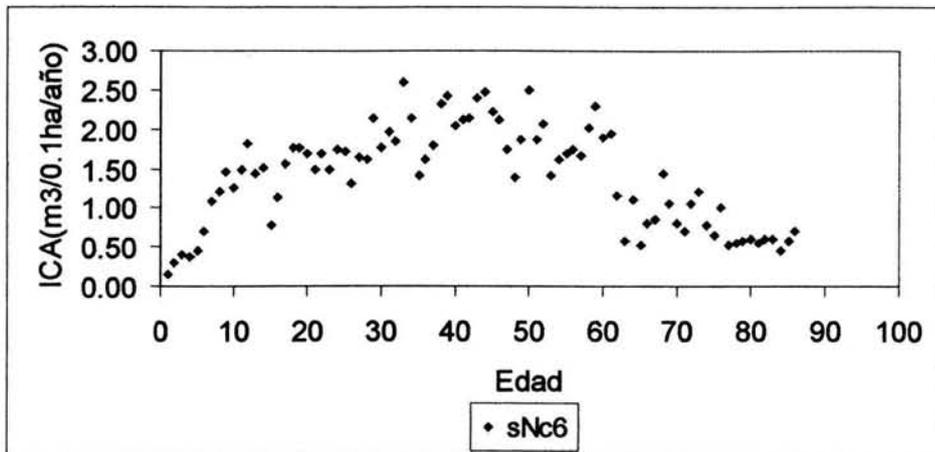


Figura 13. Círculos con calidad de sitio I

Calidad de sitio II

Los círculos 5 y 8 del sitio N presentan calidad de sitio II, la Figura 14 muestra que el crecimiento va de 0 a 2 m³/0.1ha/año. Este crecimiento se estabiliza alrededor de la edad 40.

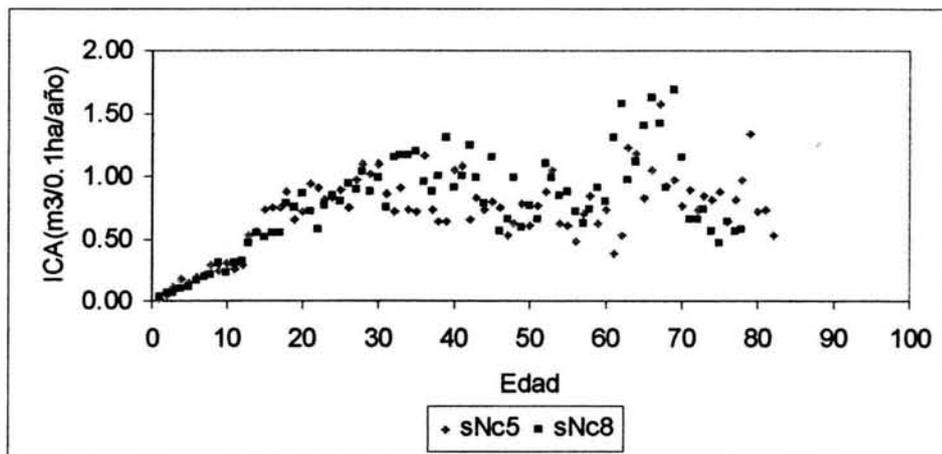


Figura 14. Círculos con calidad de sitio II

Calidad de sitio III

La curva de crecimiento de los círculos 4 y 10 del sitio N y 7 SE va de 0 a 1.4 m³/0.1ha/año; por lo que presentan una calidad de sitio III, pero como se observa en la Figura 15 la curva de estos círculos puede llegar a calidad de sitio II, en algunos años.

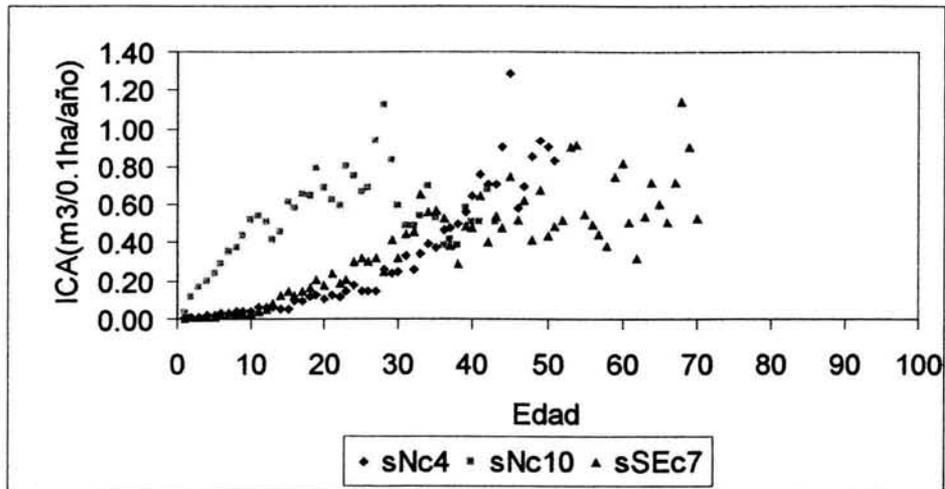


Figura 15. Círculos con calidad de sitio III

Calidad de sitio IV

La Figura 16 muestra el crecimiento de los círculos 1, 3, 7 y 9 del sitio N; 1, 8 y 9 del sitio SE; que presentan un crecimiento que va de 0 a 0.8 m³/0.1ha/año, por lo anterior una calidad de sitio IV. No obstante la calidad de sitio del círculo 7 N puede mejorar pues el árbol muestreado tiene una edad menor a 60 años.

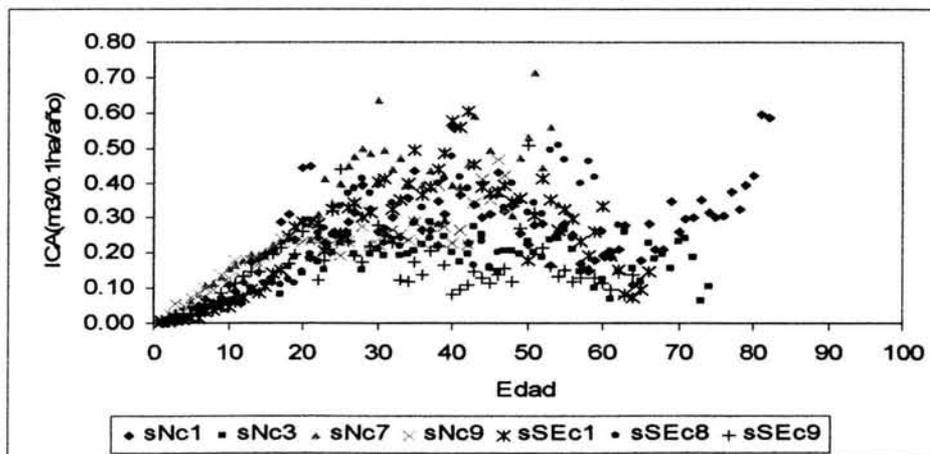


Figura 16. Círculos con calidad de sitio IV

Calidad de sitio V

Las curvas de crecimiento de los círculos 2 del sitio N y 6 del sitio SE van de 0 a 0.2 m³/0.1ha/año, entonces presentan una calidad de sitio V (Figura 17). El sitio SE presentó una tasa de crecimiento menor y los círculos 2, 3, 4, 5 y 10 del mismo presentan un crecimiento menor a 0.15 m³/0.1ha/año.

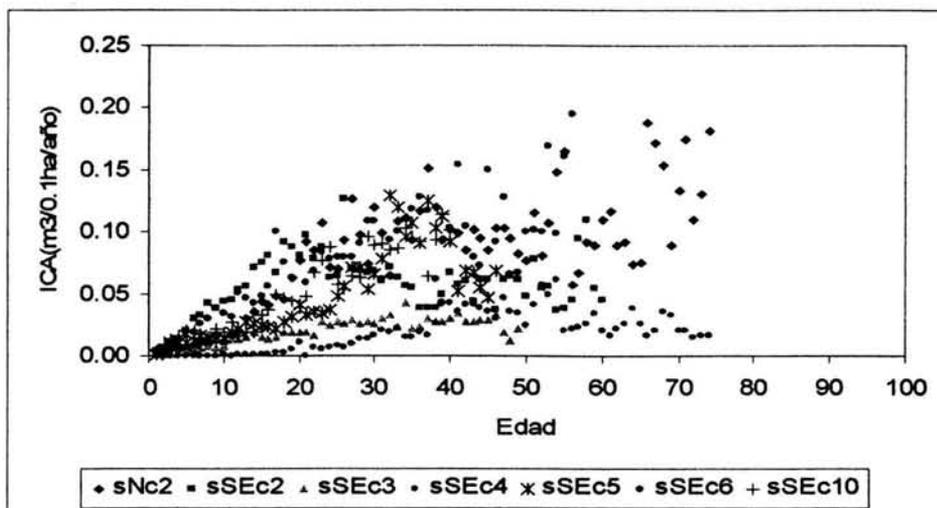


Figura 17. Círculos con calidad de sitio V

Edad del bosque

La estimación de la edad del bosque se realizó a partir de las mediciones obtenidas con el programa TRIMS, ya que permitió conocer el DN y estimar la edad de todos los individuos inventariados (Anexo 4).

La edad es un parámetro indispensable para entender las condiciones actuales de contenido de carbono, también es importante en la simulación para estimar la captura potencial del bosque.

Para tener un manejo de datos más sencillo, se obtuvo la edad promedio de los árboles de cada círculo (Figura 18), en este promedio solo se contemplaron los individuos menores a 100 años, debido a que después de los 100 años presentan un crecimiento muy pequeño.

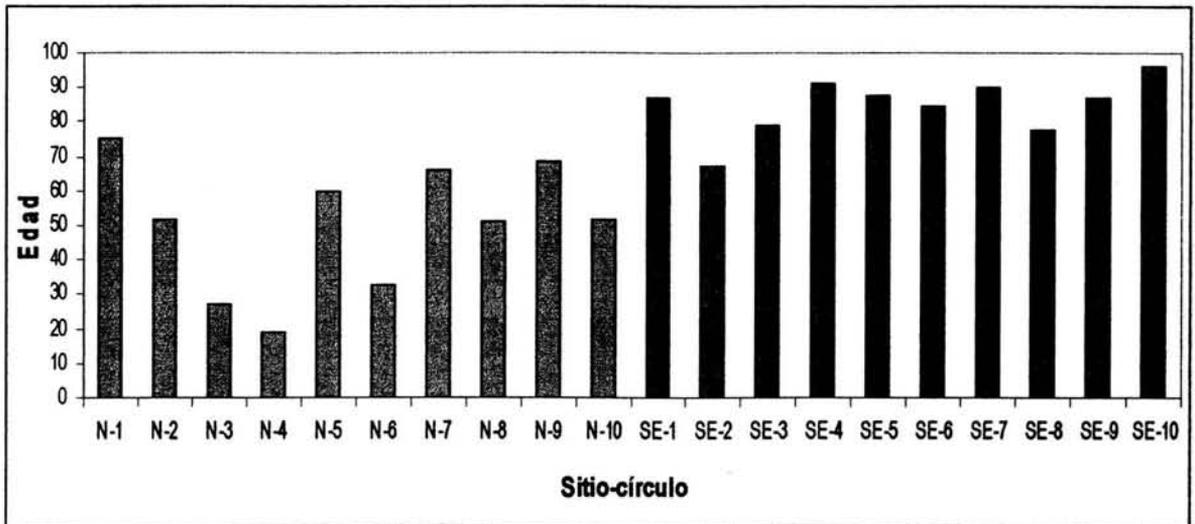


Figura 18. Promedio de edad del arbolado de *Pinus hartwegii*, por círculo.

Contenido de carbono

Una vez conocida la biomasa, se multiplicó por el factor de expansión de fustes (1.3) y por el contenido de carbono (0.45), así se presentan las Tablas 11 y 12 con el contenido de carbono por círculo (CCc), para los sitios N y SE.

Tabla 11. Contenido de carbono del sitio N

Círculo	Contenido de carbono tC/0.1ha
1	12.6
2	11.4
3	3.4
4	5.5
5	68.0
6	10.0
7	12.4
8	14.2
9	9.3
10	8.0
Σ	97 tC/ha
Desv.Est.	3.325

Tabla 12. Contenido de carbono del sitio SE

Círculo	Contenido de carbono tC/0.1ha
1	12.7
2	11.1
3	1.2
4	3.7
5	2.2
6	10.6
7	19.1
8	18.1
9	18.7
10	7.7
Σ	105 tC/ha
Desv.Est.	6.775

De cada círculo se obtuvo un resultado en tC/0.1ha y se sumaron para conocer la captura de carbono en tC/ha. Estos resultados obedecen directamente a la densidad y edad del arbolado que presenta cada círculo (Figura 19).

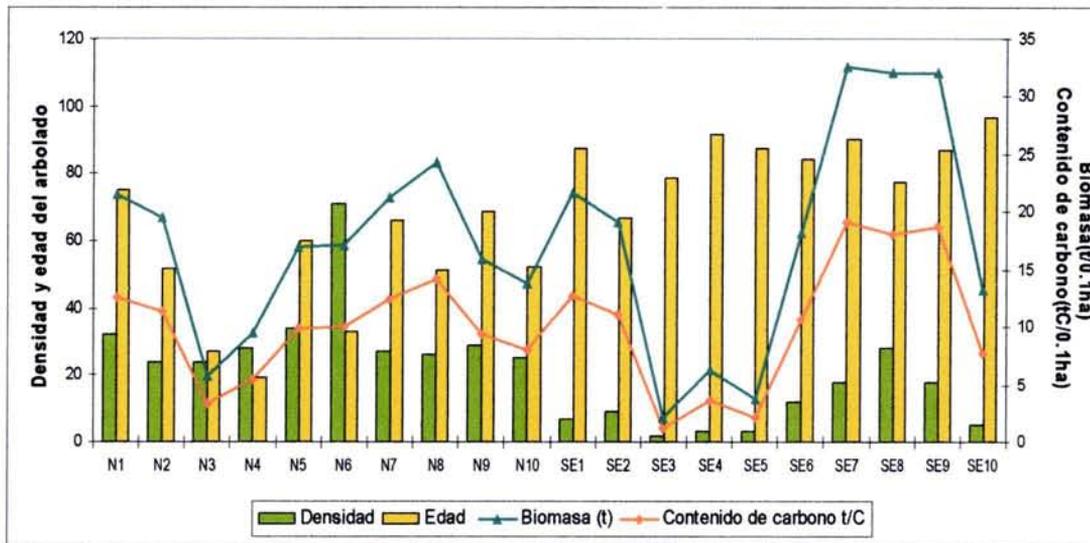


Figura 20. Contenido de carbono y biomasa, densidad y edad del arbolado por círculo.

Las 2 hectáreas muestreadas se localizan espacialmente en 2 laderas del volcán, presentan estructuralmente individuos con DN en un rango que va de 0.015 a 1m, alturas en un rango que va de 1.3 a 31.3m, un rango de edades de 1 a 100 años, densidad de 2 hasta 71 individuos en 0.1ha, una biomasa de 2.1 a 32.6t en 0.1ha (Anexo 5).

El contenido de carbono por sitio (CCs) resultó de 96.7 tC/ha para el sitio N y de 105.1 tC/ha para el sitio SE, demostrando que aún con características heterogéneas presentan un contenido de carbono promedio de 101 tC/ha.

Por lo anterior se pudo extrapolar el contenido de carbono promedio a las 546ha del bosque monoespecífico de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche, de esta manera estimar que el bosque almacena 55,146 tC.

Captura potencial de carbono

La proyección de la captura de carbono comenzó en el año 2003, cuando se realizó el inventario y se pudo conocer el contenido de carbono. Para cada círculo existe una proyección, pues presentan diferentes edades, y la proyección comprende desde la edad presentada por cada círculo en 2003 hasta que el círculo tuviera una edad promedio de 100 años. Por ejemplo si la edad promedio de círculo en 2003 fue de 60 años, la simulación comprendió 40 años por lo que llegó al año 2043. Para ello se utilizó el volumen calculado para el año 2003, el volumen (V_e) de los años siguientes se obtuvo con el ICA.

En seguida se proponen escenarios de la captura potencial de carbono, que correlacionan un año con la captura potencial de carbono en $tC/0.1ha$, que presentaría cada círculo.

Escenario 2008

El escenario 2008 de la captura potencial de carbono incluye a todos los círculos de los 2 sitios (Figura 20), excepto el círculo 10 del sitio SE, pues presenta una edad promedio de 97 años por lo que la proyección sólo llega al 2006, aunado a que el círculo presentó una calidad de sitio V (Tabla 11).

Por lo anterior a 5 años del inventario el sitio N presentará una captura potencial de $102.8 tC/ha/año$ y el sitio SE presentará una captura potencial de $98.0 tC/ha/año$.

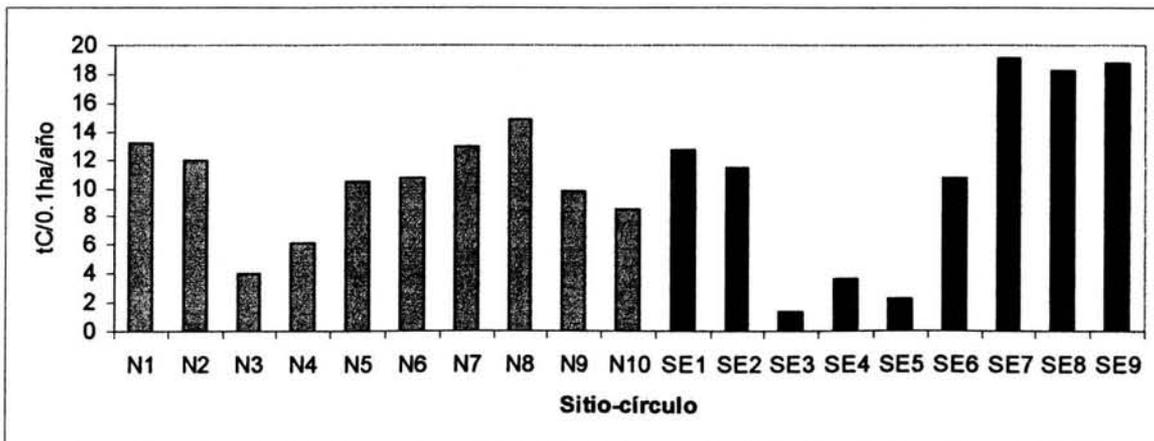


Figura 20. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2008

Escenario 2013

El escenario a 10 años de levantado el inventario, incluye a todos los círculos del sitio N, pero sólo a 8 círculos del sitio SE (Figura 21). Debido a que el círculo 4 SE presenta una calidad de sitio V además de una edad promedio de 92 años.

En cuanto a condiciones por sitio el N tendrá una captura potencial de 109.0 tC/ha/año, mientras que el sitio SE 94.8 tC/ha/año.

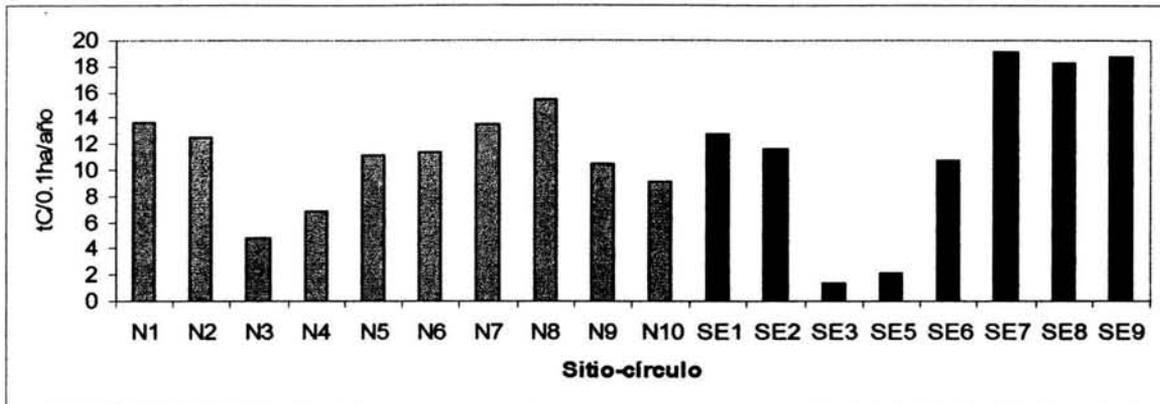


Figura 21. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2013

Escenario 2018

En el escenario 2018 (Figura 22) sólo lo integran los árboles de 4 círculos del sitio SE, pues los círculos no incluidos de este sitio presentan una edad promedio del arbolado mayor a 80 años, aunado a que presentaron una calidad de sitio IV o V. Pero incluye todos los círculos del sitio N, pues la edad promedio del arbolado de estos círculos es menor a 80 años.

Esta proyección a 15 años del levantamiento del inventario, describe que en el sitio N almacenará 115.1 tC/ha/año; y en el sitio SE almacenará 42.2 tC/ha/año.

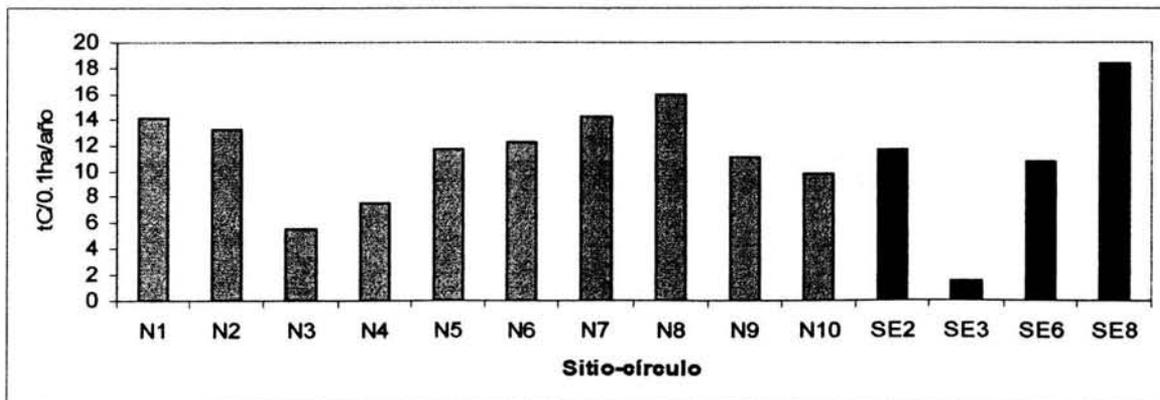


Figura 22. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2018

Escenario 2023

En la Figura 23 se presenta el escenario 2023 que involucra a todos los círculos del sitio N, pero sólo a 3 del SE, pues la edad del arbolado promedio menor a 80 años. Este hecho se observa en la captura potencial de carbono del sitio SE con 31.6 tC/ha/año, mientras que el sitio N capturarán 120.9 tC/ha/año.

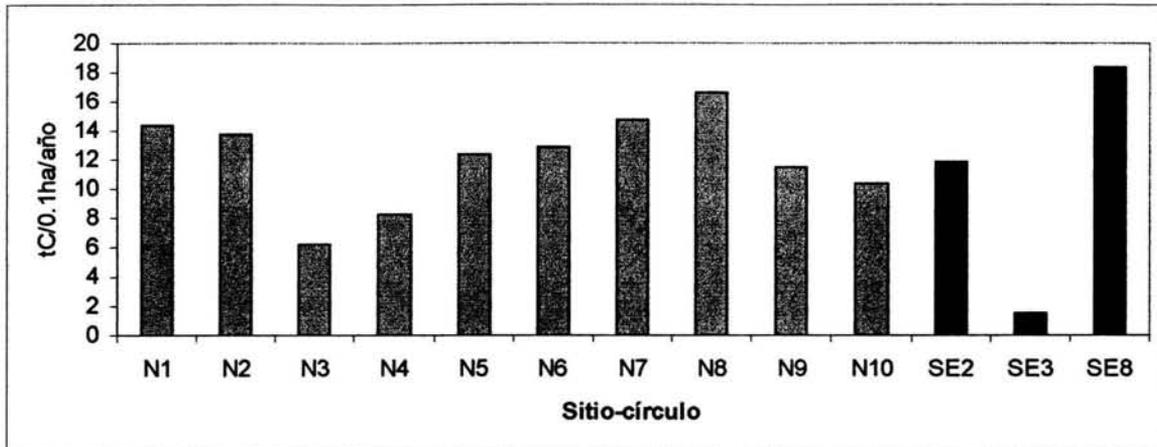


Figura 23. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2023

Escenario 2028

El escenario 2028 no incluye al círculo 1N, pues presentó una edad promedio de 76 años, pero si al resto de los círculos de este sitio. Solo incluye al círculo 2SE pues registró la menor edad promedio del sitio SE, con 67 años.

De acuerdo a esta proyección (Figura 24) el sitio N presentará una captura de 111.5 tC/ha/año y el sitio SE presentará una captura de 11.8 tC/ha/año

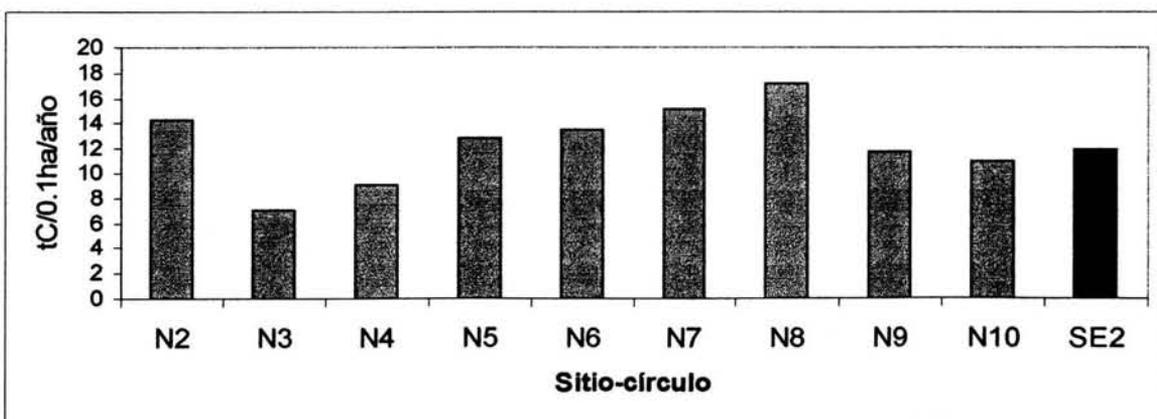


Figura 24. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2028

Escenario 2043

El escenario 2043 sólo incluye 7 círculos del sitio N (Figura 25), cuya edad del arbolado promedio es menor a 65 años, es decir los círculos con mayor numero de individuos jóvenes. De acuerdo a esta simulación el sitio N presentará una captura de carbono de 95.5 tC/ha/año.

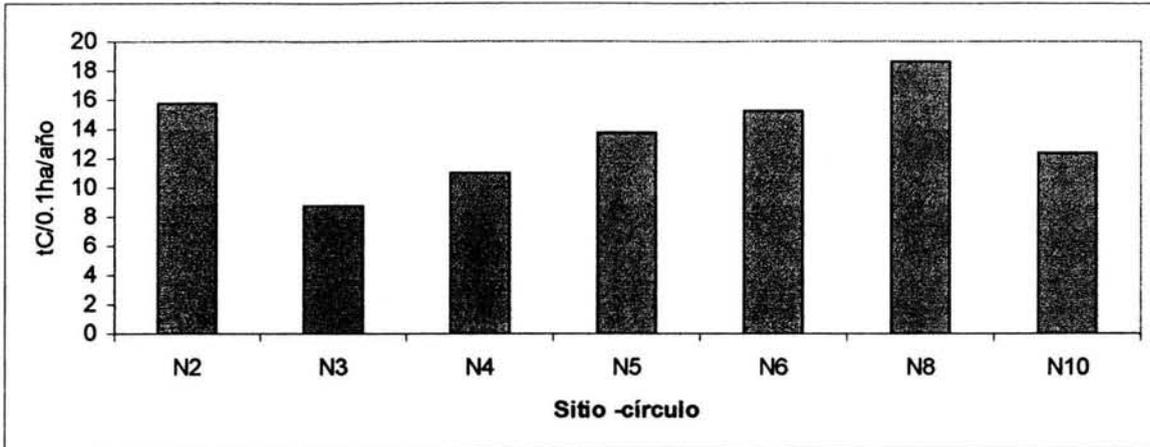


Figura 25. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2043

Escenario 2053

En el escenario generado a 50 años, solo se incluyen a los círculos N3, N4 y N6; debido a que presentan una edad promedio del arbolado menor a 35 años. La captura de carbono que presentará el sitio N es de 38.6 tC/ha/año (Figura 26).

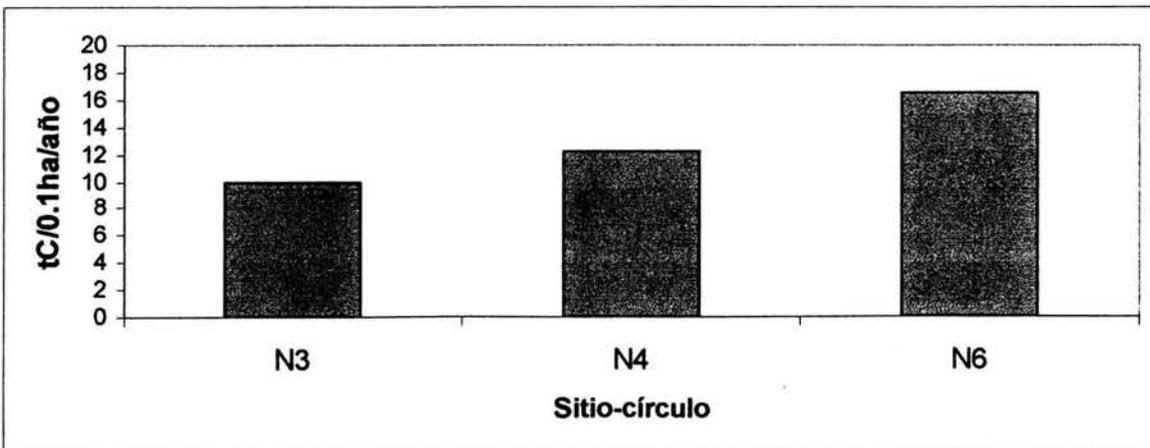


Figura 26. Escenario de la captura potencial de carbono por círculo para el año 2053

A partir de los escenarios generados se pudo conocer que el sitio N tiene un potencial de captura mayor que el sitio SE, debido a la densidad de arbolado, calidad de sitio y edad del rodal presentada en 2003(Figura 27).

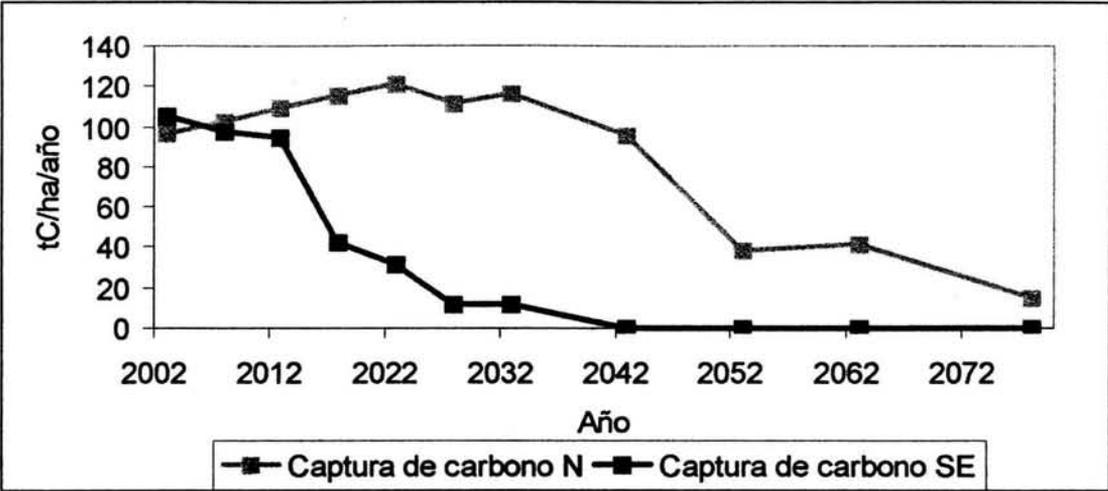


Figura 27. Proyección de la captura de carbono por sitios

VIII. DISCUSIÓN

El estudio que aquí se presenta se podría aplicar a los bosques de pino que se distribuyen en toda la Cordillera Volcánica Transmexicana, específicamente a los bosques de *Pinus hartwegii* que se desarrollan entre los 3000 y 4000 m prácticamente en todas las áreas montañosas de México que alcanzan tales elevaciones (Rzedowski, 1978).

Debido a que *Pinus hartwegii* se presenta de manera monoespecífica, fue posible restringir la estimación de contenido y captura de carbono para la especie.

Para la estimación del contenido de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* se elaboró un mapa base que permitió delimitar el área que ocupa en el Parque Nacional La Malinche.

Se utilizaron los criterios de fotointerpretación para la identificación de *Pinus hartwegii* (Ayala, 1995), basada en los elementos comunes de la flora (forma de la copa, características del follaje) y su manifestación sobre la fotografía aérea (tonos, texturas, formas).

El mapa tuvo como base el realizado por Peña del Valle (2003), durante el proceso cartográfico el uso de ILWIS admitió introducir, seleccionar, procesar y combinar diferentes datos georreferidos; incluyendo la fotointerpretación redefinida y los sitios inventariados de la comunidad de *Pinus hartwegii*.

En esta comunidad se levantó un inventario en 2003 de 2 ha (2 sitios de 1 ha), que es un muestreo representativo del 0.4% que corresponde a la superficie mínima a muestrear (Villa-Salas, 1993). Los sitios se localizan espacialmente en las laderas N y SE del volcán. Cada sitio formado por 10 círculos de 0.1 ha.

En el inventario se registró el DN y altura del árbol. Durante el análisis estructural de bosque se encontraron sobreestimaciones de la altura, pues Rzedowski (1978) refiere que en el límite altitudinal inferior del bosque de *Pinus hartwegii* los individuos pueden alcanzar alturas entre 15 y 20m; por ello se recurrió al uso de una ecuación alométrica para estimar la altura a partir del DN específica para la especie (Franco *et al.*, 2004).

Este ajuste se considera válido pues se han empleado relaciones alométricas del DN para estimar el carbono presente en diferentes tipos de vegetación (Brown *et al.*, 1989; De Jong *et al.*, 1995). Se encontró entonces que los árboles tienen un DN promedio de 0.368 m y una altura promedio de 17.8m.

El análisis del inventario demuestra que los rodales de *Pinus hartwegii* con una mayor densidad de arbolado presentan individuos con DN y altura de tallas pequeñas y por lo tanto más jóvenes como los árboles del sitio N (Tabla 5) y en los rodales con una menor densidad de individuos, los árboles son más viejos y sus tallas de DN y altura son grandes como los árboles del sitio SE (Tabla 6).

Se especificó la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* en 0.496 g/cm^3 , para ello se utilizaron 2 métodos el tradicional de máximo contenido de humedad (Smith, 1954) y el empírico propuesto recientemente por Valencia y Vargas (1997); la experiencia en este trabajo permite recomendar el uso del método empírico por resultar más rápido y sencillo. Este valor de densidad puede ser utilizado para trabajos futuros referentes a la especie, particularmente para obtener biomasa y contenido de carbono ya que este parámetro es indispensable para su evaluación.

Para la estimación del contenido de carbono en un bosque se requiere que se estime el peso seco de la biomasa. La estimación adecuada de la biomasa de un bosque es un parámetro de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes y, representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o almacenado en una superficie (Brown *et al.*, 1996).

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa de un bosque. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando luego su peso seco. Una forma de estimar la biomasa con el método indirecto es a través de ecuaciones y modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales (Brown, 1997).

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 factor de expansión de fustes para determinar la biomasa total del árbol.

Se consideró al círculo como la unidad mínima de muestreo y se encontró que un rodal de 0.1ha tiene en promedio una biomasa de 17.3 t. Este promedio incluye rodales con diferentes características estructurales, edades y densidades poblacionales presentes en la comunidad de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche, por lo que resulta válido extrapolar el valor promedio a la superficie total que cuenta con 94,458 t de biomasa.

Comparativamente con otras localidades de pino donde se ha estimado la biomasa en toneladas, los valores mínimo y máximo obtenidos para este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados (Tabla 14).

Tabla 14. Biomasa en bosques de pino, con valores mínimo y máximo en 0.1ha.

Autor	Especie	Localidad	Superficie (ha)	Biomasa en 0.1ha Mínima—Máxima
Zamora (2003)	<i>Pinus sp.</i>	Periban de Ramos, Michoacán	339	0.3—35.6
Fragoso (2003)	<i>Pinus pseudostrobus</i>	Tancítaro, Michoacán	217	2.9 —32.9
Este estudio	<i>Pinus hartwegii</i>	La Malinche, Tlaxcala- Puebla	546	2.1—32.6

La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Acosta- Mireles *et al.*, 2002).

Llevar a cabo proyectos de este tipo, requiere contar con métodos de medición confiables, que cumplan con las exigencias establecidas por el IPCC y sean eficientes para medir el contenido y la captura potencial de carbono.

Los resultados demuestran que el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche almacena en su estrato arbóreo 55,104.5 tC.

Comparativamente con otros estudios de contenido de carbono en bosques templados (Tabla15), los resultados obtenidos en este estudio son cercanos a estimaciones realizadas por modelos de cálculo o muestreos directos.

Las localidades reportadas por Ordóñez (1998), Zamora (2003) y Fragoso (2003), presentan manejo en algunos rodales, como aclareos y cortas. Debido a que el sitio de estudio del es un Parque Nacional no hay evidencias de un impacto muy severo por actividades antropicas, por lo que al cotejar los valores es mayor el contenido de carbono por hectárea, que en los otros estudios.

Tabla 15. Comparación de estudios de contenido de carbono en bosques templado-frío

Autor	Localidad	Vegetación	Contenido de carbono tC/ha
Ordóñez (1998)	Nuevo San Juan, Michoacán	Bosque templado: <i>Pinus, Quercus, Abies</i>	63
Zamora (2003)	Periban de Ramos, Michoacán	Bosque templado: <i>Pinus, Quercus</i>	74
Fragoso (2003)	Tancítaro, Michoacán	Bosque templado: <i>Abies, Pinus, Quercus</i>	69
Este estudio	Volcán La Malinche, Tlaxcala-Puebla	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	100

Para hacer referencia a la captura potencial de carbono se debe tomar en cuenta la edad y el crecimiento del bosque.

Se calculó el ICA para el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche, encontrando que el sitio N presenta un crecimiento mayor que el sitio SE, lo anterior puede deberse a diversos factores del sitio como la temperatura, precipitación, insolación, vientos, heladas; factores fisiográficos y las condiciones edáficas (ph, materia orgánica, textura y estructura del suelo), estos factores definen el potencial del crecimiento de acuerdo a las características genéticas de la especie (Monroy, 1996).

Se propuso una escala para determinar la calidad de sitio de los rodales monoespecíficos no coetáneos de *Pinus hartwegii* (Tabla 10), estimada a partir del máximo volumen que presentó cada rodal del bosque en un año (Daniel *et al.*, 1982). El crecimiento máximo en un rodal de 0.1ha fue de 3 m³/0.1ha/año, presentado solo en el círculo 6 del sitio N, y el mínimo fue de 0.2 m³/0.1ha/año presentado en 7 círculos del sitio SE.

A partir de los parámetros de ICA, edad, densidad de la madera y biomasa se elaboraron escenarios de captura potencial de carbono a 5, 10, 15, 20, 25, 40 y 50 años. Cada escenario estima el carbono almacenado en el bosque en un año determinado, bajo las premisas de que no existiera manejo, y los elementos evaluados siguieran creciendo de manera estable.

Los escenarios se realizaron únicamente para los sitios y círculos bien definidos en su estructura, debido a que el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche es multietáneo y habría que hacer un remuestreo para evaluar áreas con características similares a los círculos (20) de los sitios N y SE.

En general se encontró que el sitio N tiene un mayor potencial de captura de carbono que el sitio SE, debido a que éste último presentó en 2003 una población en su mayoría adulta. De hecho en este sitio 44 de 105 árboles inventariados presentaron una edad estimada en 100 años. Mientras que en el sitio N solo 18 de 320 árboles inventariados presentaron una edad promedio de 100 años.

Debido a que se obtuvo la captura potencial de carbono por hectárea, es posible comparar los resultados con el estudio de Ordóñez (1998), pues refiere la captura en las mismas unidades (Tabla 16).

Tabla 16. Comparación con otro estudio de captura de carbono por décadas.

Años	Ordóñez (1998) tC/ha/año	Este estudio sitio N tC/ha/año	Este estudio sitio SE tC/ha/año
10	20	110	98
20	35	121	32
30	50	116	12
40	84	96	s.d.
50	123	39	s.d.
60	166	42	s.d.
70	190	12	s.d.

s.d.= sin datos

En esta comparación con el trabajo de Ordóñez (1998), es importante subrayar que su trabajo fue elaborado con el modelo de simulación CO2FIX donde se involucraron 3 géneros (Tabla 15), y que la localidad donde se realizó tiene un plan de manejo forestal, lo que puede implicar un aumento en el ICA.

Los valores de la simulación de Ordóñez están más cercanos al comportamiento del sitio N, pero a partir del escenario a 50 años se acentúan las diferencias, evidenciando que el área de estudio no presenta manejo y por lo tanto no está contemplada la renovación de árboles.

Por lo anterior sería recomendable la implementación de un plan de manejo de bajo impacto de la densidad de los rodales en el bosque de *Pinus hartwegii*, para mejorar la calidad de sitio, ya que su efecto se manifiesta rápidamente.

Una opción es hacer aclareos para disminuir la competencia por el espacio de crecimiento, que tendría por efecto el incremento de los DN de los árboles y por ende de la biomasa (Ruíz *et al.*, 1996). Esta intervención podría llevarse a cabo en rodales con características análogas a los del sitio N, que presenten una alta densidad de arbolado.

Otra intervención de bajo impacto es la selección de árboles maduros (80-100 años) para talar en sitios con una alta regeneración. Esta corta deja espacios en el bosque que son aprovechados inmediatamente por la regeneración natural y podría destinarse a rodales con características análogas a los del sitio N, pues durante el levantamiento del inventario se encontró que tenían una alta regeneración, que fue evidente en el análisis estructural al presentar muchos individuos jóvenes.

Además se presentan datos que facilitan la elección de rodales que requieren reforestación como aquellos con poca densidad de arbolado, o que presenten una calidad de sitio IV o V, de acuerdo con la escala propuesta, rodales con características análogas a los del sitio SE serían los adecuados.

En este trabajo se analizan diferentes condiciones del bosque que son parámetros estándares aplicables en bosques manejados y en el establecimiento de plantaciones forestales que funcionen como almacenes naturales de carbono con el fin de alcanzar los compromisos de mitigación de GEI.

IX. CONCLUSIONES

El método seguido en el presente estudio presenta mediciones confiables y eficientes para estimar el contenido y la captura potencial de carbono, que cumplen con las exigencias establecidas por el IPCC.

En la comunidad monoespecífica de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche se levantó un inventario de 2 ha, mediante el registro de los parámetros DN, altura y densidad del arbolado presentados en 2003. Además se extrajeron muestras de madera con un taladro Pressler, para estimar la densidad de la madera, la edad del arbolado y el ICA.

A partir de estos parámetros se realizó un análisis estructural de 425 árboles, para calcular la biomasa forestal con el uso de ecuaciones volumétricas, un coeficiente mórfico y la densidad de la madera.

Se generó una escala para determinar la calidad de sitio de acuerdo con el ICA y una tabla de edades del arbolado de acuerdo al DN de 1 a 100 años para rodales monoespecíficos de *Pinus hartwegii*. Se recomienda la utilización de ambas en otros estudios referentes a la especie o el género *Pinus* en otras áreas, planes de manejo forestal o estudios vinculados a la estimación de biomasa, contenido y captura potencial de carbono.

Con las condiciones de cobertura del 2003 el bosque de *Pinus hartwegii* del volcán La Malinche almacena 55,146 tC. A partir de este valor se proyectaron escenarios de captura de carbono que hacen evidente la necesidad de promover un manejo forestal de bajo impacto, mediante intervenciones como son aclareos, cortas para la regeneración natural y reforestación.

Los parámetros forestales analizados en este trabajo deben considerarse en los bosques protegidos, manejados y en el establecimiento de plantaciones que funcionen como almacenes naturales de carbono.



X. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Míreles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de las relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Ahuja, D. 1990. Estimating regional anthropogenic emissions of greenhouse gases. Report No. 20p-20006, United States Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Washington, D.C.
- Allende, R. 1968. Introducción al estudio de los suelos derivados de cenizas volcánicas o de ando del volcán La Malinche. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 65p.
- Apps, M. y W. Kurz. 1991. The carbon budget of Canadian forests in a changing climate: can forestry be part of the solution? (Abstract). In *Extended Abstracts for 'ISCORD '91', 3rd International Symposium on Cold Region Development*, Edmonton, June 16-20, 1991. Alberta Res. Council.
<http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS14-S.HTM>
- Aristizabal, J. y A. Guerra. 2002. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema Agroforestal nogal cafetero (*Cordia alliodora*) – cacao (*Theobroma cacao* L.) – plátano (*Musa paradisiaca*). Tesis Profesional. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 108p.
- Ayala, C. 1995. Identificación de dos especies arbóreas de clima templado frío mediante patrones de fotointerpretación. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 97p.
- Ayala, R. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 70p.
- Barnes, H. 1962. Yield of evenaged stand of Westernhemallock. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No 1273. 23p.
- Brown, S. y E. Lugo. 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223 (4642): 1290-1293.
- Brown, S., J. Gillespe y E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35 (4): 881-902.
- Brown, S.; J. Sathaye; M. Cannell; P. Kauppi. 1996. Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* 75(1): 80-91.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Roma. Forestry Paper 135.
- Caballero, M. 1982. Empleo de coeficientes mórficos en la elaboración de tablas de volúmenes de cedro rojo. *Boletín Divulgativo* No. 26 B, abril 1982. 2ª ed. INIF: SARH. México. 27p.
- Castro-Govea, R. 1999. Historia eruptiva reciente del Volcán La Malinche. Tesis de Maestría. Colegio de Ciencias y Humanidades. Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado, UNAM. 129p.

- Ciesla, W. 1996. Cambio climático, Bosques y Ordenación Forestal. Roma: FAO. Pp 44 - 45.
- Coordinación General de Ecología del Estado de Tlaxcala. 1999. Programa de manejo del Parque Nacional La Malinche. 68p.
- Daniel, W., J. Helms y F. Baker. 1982. Principios de Silvicultura. McGraw Hill. México. 482p.
- De Jong, B., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor, y R. Tipper. 1995. Community Forest Management and Carbon Sequestration: a Feasibility Study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20(6): 409-416.
- Echenique M., R. y V. Díaz G. 1972. Algunas características tecnológicas de la madera de 11 especies mexicanas. *Bol. Tec. Num. 27*. INIF. México. 71 p.
- Ern, H. 1973. Repartición, ecología e importancia económica de los bosques de coníferas en los estados de Puebla y Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. México. Comunicaciones: Proyecto Puebla-Tlaxcala, 7:21-23.
- Espejel, A. 1998. La importancia y el deterioro del recurso bosque en la región de La Malinche. Estado de Tlaxcala. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias sobre Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Tlaxcala. México. 194p.
- Farjón, A. y B. Styles. 1997. Flora geotrópica Monograph 75. *Pinus* (Pinaceae). Organization for Flora Neotropica. 291p.
- Fragoso, P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez, México. 65p.
- Franco, S., A. Ramírez y B. Ordóñez. 2004. Estimación del carbono almacenado en el estrato forestal en Peña Ahumada Estado de México. En prensa.
- García, E., 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D.F. Offset Larrios. 3ª ed. corregida y aumentada 1988.
- Gay C., L. Menchaca y C. Conde. 1991. El efecto invernadero y México. *Ciencias* 22: 3-10.
- Gay, C. y J. Martínez, 1995. Mitigation of Emissions of Greenhouse Gases in Mexico. *Interciencia* 20 (6): 336-342.
- Gobiernos de Tlaxcala y Puebla. 2001. Programa Integral de Manejo del Parque Nacional La Malinche. Documento de trabajo. 98p.
- Grijpma, P., 2001. Producción Forestal. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 4ª Reimpresión. México, D.F. 134 p.
- Gutiérrez, G. 2004. Análisis dendrocronológico y económico de *Abies vejari*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis*, y *Pinus teocote* en la Sierra de Peña Nevada, Nuevo León. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. México. 102p.
- Hommer, Y. 2002. Estudio preliminar de aves y mamíferos en la cañada Grande, en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 69p.

- Husch, B; C. Miller y T. Beers. 1972. Forest Measurement. The Ronald Press. USA. 410p.
- IPCC. 1994. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 1995. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working group III to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 448p.
- IPCC. 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático 2001: informe de síntesis. Una Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 46p.
- Jaramillo, V. 1994. El cambio global: interacciones de la biota y la atmósfera. Ciencias 35: 4-14.
- Lashof, D., y D. Ahuja.1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. Nature 344: 529-531.
- Lauer, W.1978. Timberline studies in Central Mexico. Arctic and Alpine Research 10(2): 386-396.
- Melo, G. 1977. Parques Nacionales. Series varios. Tomo I N° 2. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Ministerio del Medio Ambiente.2002. II Foro Iberoamericano de Ministros de Medio Ambiente. Bávaro, República Dominicana. 11-13 de julio, 2002. 6p
- Mintzer, M. 1992. Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses. Cambridge, University Press, Cambridge.
- Monroy, C. 1996. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl.et Cham. En la región de Huayacocotla, Estado de Veracruz. Ciencia Forestal en México 21(80): 57- 77.
- Mostacedo, B y T. Fredericksen. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en Ecología Vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) Santa Cruz, Bolivia. 87p.
<http://www.cadex.org/bolfor/Libros/Ecologia%20Vegetal.pdf>
- Nabuurs, G., J. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, T. Lapvetelainen, J. Liski, O. Maser, G. Mohren, A. Pussinen, M. Schelhaas. 2001. CO2FIX V2.0 – manual of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. ALTERRA Report. Wageningen The Netherlands x p.
- ONU: CMCC. 1998. Organización de Naciones Unidas: Convención Marco sobre el Cambio Climático. Informe de la Conferencia de las partes sobre su tercer período de sesiones, celebrado en Kyoto del 1° al 11 de diciembre de 1997. Conferencia de las partes. 52p.
<http://unfccc.int/cop4/resource/docs/spanish/cop3/g9860812.pdf>
- Ordóñez, B. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM. México. 61 p.

- Ordóñez, B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. 72p
- Ordóñez, B.; J. De Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2):27-47.
- Orrego, S.1998. Venta de servicios ambientales: posibilidades y limitaciones para el Dpto. del Choco. Fundación ESPAVE - IIAP. Medellín, Colombia. 26p.
- Parlamento Latinoamericano, Ciudadanía Ambiental Global, ALDA. 1998. La lucha contra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano. Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente. Buenos Aires. 174p.
- Peña del Valle, A. 2003. Captura de Carbono: un estudio en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala –Puebla. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México. 85p.
- Raven, P., Evert, R., Eichorn, S. 1992. Biología de las plantas Vol. 2. Reverté, Barcelona. 746p.
- Rivera, A. 2000. El Cambio Climático: El Calentamiento de la Tierra. Editorial Debate, Barcelona. 270 p.
- Rodríguez, H. y González, F. 2000. Opciones para la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Colombia. Bogotá D.C: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Alvarez Lleras No 14. 260 p.
- Ruíz, M., A. Fierros y H. Ramírez. 1996. Efecto inicial del aclareo en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. y Golf. En la Sabana, Oaxaca. *Ciencia Forestal en México* 21(80): 25-38.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México. 432p.
- Sánchez de Tagle, C. 1978. Contribución al conocimiento de la fauna herpetológica del Parque Nacional La Malinche. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 90p.
- SECODUVI. 2001. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Gobierno del Estado de Tlaxcala. 32 Fotografías aéreas pancromáticas del año 2001 a escala 1:25, 000, México.
- SEMARNAT-INE. 2001. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Instituto Nacional de Ecología. México: Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático — México. 374 p. Subsecretaría de Ecología. 1989. Conservación Ecológica de los Recursos Naturales, Información básica de las Áreas Naturales protegidas de México. 81p.
- Smith, D. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. Forest Products Laboratory. Rept. No. 2014. USDA. Forest Service. Madison, Wis. EUA. 8p.
- Subsecretaría de Ecología. 1989. Conservación Ecológica de los recursos naturales. Información básica de las Áreas Naturales Protegidas de México. 81p.
- Totten, M. 1999. Getting it Right: Emerging Markets for Storing carbon in Forests. World Resources Institute (WRI) - Forests Trends, Washington D.C. 48p.

- Valencia, S. y J. Vargas. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1): 81-87.
- Valencia S., y A. López. 1999. Variación de la densidad de la madera dentro y entre árboles de *Pinus rudis* Endl., en Sierra Las Alazanas, Arteaga, Coahuila. *Foresta-AN*. Nota Técnica No. 1. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 17p.
- Villa- Salas, A. 1993. Como verificar el muestreo en un estudio dasonómico. *Publicación especial Núm. 64*. SARH- INIFAP: 66-69.
- Wilhelm L. y E. Stiehl. 1973. la clasificación del clima de la región Puebla-Tlaxcala. *Comunicaciones* 7. Puebla 32-33pp.
- Zamora, C.J. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido la Majada municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez, México. 48p.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

XI. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de la intensidad de muestreo. Promedio, desviación estándar y varianza de los DN de todos los árboles de cada círculo, por cada ladera.

Ladera Norte

Círculo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Promedio	0.350	0.335	0.164	0.153	0.282	0.164	0.327	0.310	0.318	0.274	0.268
Desviación estándar	0.077	0.077	0.143	0.178	0.136	0.149	0.159	0.214	0.089	0.160	0.045
Varianza	0.006	0.006	0.021	0.032	0.018	0.022	0.025	0.046	0.008	0.025	0.000

Ladera Sureste

Círculo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Promedio	0.596	0.515	0.414	0.529	0.449	0.467	0.504	0.415	0.493	0.491	0.487
Desviación estándar	0.219	0.181	0.128	0.156	0.064	0.121	0.116	0.106	0.135	0.287	0.064
Varianza	0.048	0.033	0.016	0.024	0.004	0.015	0.014	0.011	0.018	0.083	0.001

Anexo 2. Análisis estructural de la comunidad de *Pinus hartwegii*. Clases diamétricas utilizadas para el reporte de la estructura diamétrica y clases de alturas utilizadas para el reporte de la estructura vertical.

Las clases no tienen correspondencia.

Clases de diámetros		Clases de alturas	
Clase	Diámetro	Clase	Altura
1	0.015-0.115	1	1.3-4.3
2	0.116-0.215	2	4.4-7.3
3	0.216-0.315	3	7.4-10.3
4	0.316-0.415	4	10.4-13.3
5	0.416-0.515	5	13.4-16.3
6	0.516-0.615	6	16.4-19.3
7	0.616-0.715	7	19.4-22.3
8	0.716-0.815	8	22.4-25.3
9	0.816-0.915	9	25.4-28.3
10	0.916-1.015	10	28.4-31.3

Anexo 3. Clasificación de la madera desarrollada por Markwar y Meck de acuerdo con su densidad (g/cm^3) en relación a su peso anhidro sobre su volumen verde (Echenique M. y Díaz G., 1972 citado en Valencia y López, 1999).

Relación de la densidad de la madera (DM), peso anhidro (Pa) sobre volumen verde (Vv). $DM = Pa / Vv = \text{g/cm}^3$	Terminología
menor de 0.20	extremadamente liviana
de 0.20 a 0.25	excesivamente liviana
de 0.25 a 0.30	muy liviana
de 0.30 a 0.36	liviana
de 0.36 a 0.42	moderadamente liviana
de 0.42 a 0.50	moderadamente pesada
de 0.50 a 0.60	pesada
de 0.60 a 0.72	muy pesada
de 0.72 a 0.86	excesivamente pesada
mayor de 0.86	extremadamente pesada

Anexo 4. Calculo de la edad con respecto al DN y al altura para los individuos de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche

EDAD	DN	ALTURA
1	0.92	1.047
2	1.98	1.672
3	2.98	2.256
4	3.84	2.753
5	4.57	3.171
6	5.28	3.580
7	5.97	3.969
8	6.67	4.362
9	7.30	4.717
10	7.92	5.062
11	8.49	5.377
12	9.05	5.684
13	9.60	5.981
14	10.17	6.292
15	10.73	6.595
16	11.28	6.890
17	11.81	7.176
18	12.36	7.464
19	12.92	7.760
20	13.47	8.050
21	14.03	8.343
22	14.52	8.601
23	14.99	8.841
24	15.47	9.088
25	15.95	9.336
26	16.43	9.579
27	16.90	9.816
28	17.37	10.053
29	17.83	10.284
30	18.27	10.504
31	18.71	10.722
32	19.12	10.925
33	19.53	11.128
34	19.94	11.330
35	20.35	11.530
36	20.72	11.710
37	21.07	11.880
38	21.43	12.054
39	21.76	12.210
40	22.12	12.384
41	22.49	12.557
42	22.76	12.686
43	23.08	12.839
44	23.30	12.944
45	23.40	12.992
46	23.63	13.097
47	23.89	13.217
48	23.91	13.227
49	24.13	13.333
50	24.40	13.457

EDAD	DN	ALTURA
51	24.62	13.558
52	24.91	13.692
53	25.05	13.757
54	25.33	13.889
55	25.59	14.006
56	25.67	14.045
57	25.89	14.143
58	26.30	14.331
59	26.96	14.631
60	27.19	14.732
61	27.37	14.815
62	27.72	14.972
63	27.88	15.044
64	28.23	15.198
65	28.42	15.282
66	28.77	15.437
67	28.98	15.528
68	28.51	15.324
69	28.75	15.429
70	28.98	15.532
71	29.17	15.612
72	29.25	15.649
73	29.39	15.712
74	29.54	15.776
75	29.70	15.844
76	31.94	16.809
77	32.10	16.877
78	32.25	16.943
79	32.40	17.003
80	35.19	18.159
81	35.34	18.221
82	35.52	18.293
83	35.68	18.358
84	39.14	19.726
85	39.20	19.747
86	39.26	19.773
87	39.35	19.805
88	43.17	21.235
89	43.29	21.278
90	43.62	21.398
91	43.96	21.520
92	47.12	22.629
93	47.36	22.711
94	47.75	22.844
95	47.99	22.925
96	49.10	23.296
97	49.35	23.379
98	49.78	23.521
99	50.01	23.596
100	50.70	23.820

Anexo 5. Inventario del arbolado de 2ha en el bosque monoespecífico de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche.

Sitio Norte

Circulo	No. Especie	DN(cm)	Altura (m)	Edad	Volumen (m3)	Biomasa(t)	Contenido de Carbono por árbol
1	1Pinus hartwegii	38.00	19.28	84	1.53	0.76	0.44
1	2 Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
1	3 Pinus hartwegii	54.00	24.86	100	3.98	1.98	1.16
1	4 Pinus hartwegii	30.00	15.98	75	0.79	0.39	0.23
1	5Pinus hartwegii	38.00	19.28	83	1.53	0.76	0.44
1	6Pinus hartwegii	24.00	13.27	49	0.42	0.21	0.12
1	7Pinus hartwegii	27.00	14.65	60	0.59	0.29	0.17
1	8Pinus hartwegii	29.50	15.76	71	0.75	0.37	0.22
1	9Pinus hartwegii	39.00	19.67	84	1.64	0.82	0.48
1	10Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
1	11Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
1	12Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
1	13Pinus hartwegii	38.00	19.28	83	1.53	0.76	0.44
1	14Pinus hartwegii	32.00	16.84	77	0.95	0.47	0.28
1	15Pinus hartwegii	34.00	17.67	79	1.12	0.56	0.33
1	16Pinus hartwegii	39.00	19.67	79	1.64	0.82	0.48
1	17Pinus hartwegii	39.50	19.86	80	1.70	0.85	0.49
1	18Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
1	19Pinus hartwegii	30.00	15.98	75	0.79	0.39	0.23
1	20Pinus hartwegii	42.50	20.99	87	2.08	1.03	0.61
1	21Pinus hartwegii	39.50	19.86	87	1.70	0.85	0.49
1	22Pinus hartwegii	28.00	15.10	64	0.65	0.32	0.19
1	23Pinus hartwegii	41.00	20.43	88	1.89	0.94	0.55
1	24Pinus hartwegii	20.00	11.36	35	0.25	0.12	0.07
1	25Pinus hartwegii	19.00	10.87	32	0.22	0.11	0.06
1	26Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
1	27Pinus hartwegii	26.00	14.19	58	0.53	0.26	0.15
1	28Pinus hartwegii	46.00	22.24	91	2.59	1.28	0.75
1	29Pinus hartwegii	31.00	16.41	76	0.87	0.43	0.25
1	30Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
1	31Pinus hartwegii	41.00	20.43	88	1.89	0.94	0.55
1	32Pinus hartwegii	28.00	15.10	64	0.65	0.32	0.19
2	1Pinus hartwegii	53.70	24.76	100	3.93	1.95	1.14
2	2 Pinus hartwegii	55.40	25.28	100	4.27	2.12	1.24
2	3 Pinus hartwegii	52.80	24.49	100	3.75	1.86	1.09
2	4 Pinus hartwegii	11.20	6.85	16	0.05	0.02	0.01
2	5Pinus hartwegii	12.60	7.59	17	0.07	0.03	0.02
2	6Pinus hartwegii	13.00	7.80	19	0.07	0.04	0.02
2	7Pinus hartwegii	24.10	13.32	49	0.43	0.21	0.12
2	8Pinus hartwegii	28.30	15.23	64	0.67	0.33	0.19
2	9Pinus hartwegii	30.00	15.98	75	0.79	0.39	0.23
2	10Pinus hartwegii	21.20	11.94	37	0.30	0.15	0.09
2	11Pinus hartwegii	58.70	26.23	100	4.97	2.47	1.44
2	12Pinus hartwegii	34.40	17.84	79	1.16	0.58	0.34
2	13Pinus hartwegii	35.40	18.25	80	1.26	0.62	0.37
2	14Pinus hartwegii	25.00	13.74	53	0.47	0.23	0.14
2	15Pinus hartwegii	34.00	17.67	79	1.12	0.56	0.33
2	16Pinus hartwegii	56.60	25.63	100	4.51	2.24	1.31
2	17Pinus hartwegii	25.40	13.92	53	0.49	0.25	0.14
2	18Pinus hartwegii	24.30	13.41	49	0.44	0.22	0.13
2	19Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
2	20Pinus hartwegii	50.90	23.88	100	3.40	1.69	0.99
2	21Pinus hartwegii	37.30	19.01	83	1.45	0.72	0.42
2	22Pinus hartwegii	10.50	6.47	14	0.04	0.02	0.01
2	23Pinus hartwegii	19.80	11.26	34	0.24	0.12	0.07
2	24Pinus hartwegii	55.00	25.16	100	4.18	2.08	1.22
3	1Pinus hartwegii	13.30	7.96	20	0.08	0.04	0.02
3	2 Pinus hartwegii	10.80	6.63	14	0.04	0.02	0.01
3	3 Pinus hartwegii	11.20	6.85	16	0.05	0.02	0.01
3	4 Pinus hartwegii	7.30	4.72	9	0.01	0.01	0.00
3	5Pinus hartwegii	36.40	18.65	83	1.36	0.67	0.39
3	6Pinus hartwegii	23.00	12.80	45	0.37	0.18	0.11
3	7Pinus hartwegii	37.60	19.13	83	1.49	0.74	0.43
3	8Pinus hartwegii	7.60	4.88	9	0.02	0.01	0.00
3	9Pinus hartwegii	26.60	14.47	58	0.56	0.28	0.16
3	10Pinus hartwegii	7.10	4.60	9	0.01	0.01	0.00
3	11Pinus hartwegii	56.80	25.69	100	4.56	2.26	1.32

3	12	Pinus hartwegii	40.50	20.24	87	1.83	0.91	0.53
3	13	Pinus hartwegii	30.50	16.19	75	0.83	0.41	0.24
3	14	Pinus hartwegii	12.60	7.59	18	0.07	0.03	0.02
3	15	Pinus hartwegii	8.00	5.10	11	0.02	0.01	0.01
3	16	Pinus hartwegii	17.70	10.22	29	0.18	0.09	0.05
3	17	Pinus hartwegii	7.00	4.55	9	0.01	0.01	0.00
3	18	Pinus hartwegii	3.40	2.50	4	0.00	0.00	0.00
3	19	Pinus hartwegii	4.70	3.25	5	0.00	0.00	0.00
3	20	Pinus hartwegii	8.60	5.44	11	0.02	0.01	0.01
3	21	Pinus hartwegii	4.00	2.85	4	0.00	0.00	0.00
3	22	Pinus hartwegii	8.90	5.60	11	0.02	0.01	0.01
3	23	Pinus hartwegii	5.00	3.42	6	0.00	0.00	0.00
3	24	Pinus hartwegii	5.40	3.65	6	0.01	0.00	0.00
4	1	Pinus hartwegii	16.50	9.61	27	0.14	0.07	0.04
4	2	Pinus hartwegii	65.00	27.89	100	6.48	3.22	1.88
4	3	Pinus hartwegii	48.00	22.93	95	2.90	1.44	0.84
4	4	Pinus hartwegii	12.00	7.28	18	0.06	0.03	0.02
4	5	Pinus hartwegii	12.00	7.28	18	0.06	0.03	0.02
4	6	Pinus hartwegii	7.00	4.55	9	0.01	0.01	0.00
4	7	Pinus hartwegii	64.00	27.64	100	6.22	3.09	1.81
4	8	Pinus hartwegii	23.10	12.85	43	0.38	0.19	0.11
4	9	Pinus hartwegii	16.00	9.36	26	0.13	0.07	0.04
4	10	Pinus hartwegii	11.00	6.74	16	0.04	0.02	0.01
4	11	Pinus hartwegii	41.50	20.62	87	1.95	0.97	0.57
4	12	Pinus hartwegii	8.00	5.10	11	0.02	0.01	0.01
4	13	Pinus hartwegii	5.50	3.70	6	0.01	0.00	0.00
4	14	Pinus hartwegii	4.50	3.13	5	0.00	0.00	0.00
4	15	Pinus hartwegii	2.00	1.69	2	0.00	0.00	0.00
4	16	Pinus hartwegii	3.00	2.27	4	0.00	0.00	0.00
4	17	Pinus hartwegii	5.00	3.42	6	0.00	0.00	0.00
4	18	Pinus hartwegii	7.00	4.55	9	0.01	0.01	0.00
4	19	Pinus hartwegii	2.00	1.69	2	0.00	0.00	0.00
4	20	Pinus hartwegii	3.50	2.56	4	0.00	0.00	0.00
4	21	Pinus hartwegii	7.00	4.55	9	0.01	0.01	0.00
4	22	Pinus hartwegii	4.50	3.13	5	0.00	0.00	0.00
4	23	Pinus hartwegii	8.00	5.10	11	0.02	0.01	0.01
4	24	Pinus hartwegii	4.50	3.13	5	0.00	0.00	0.00
4	25	Pinus hartwegii	6.50	4.27	8	0.01	0.00	0.00
4	26	Pinus hartwegii	7.00	4.55	9	0.01	0.01	0.00
4	27	Pinus hartwegii	26.50	14.42	59	0.56	0.28	0.16
4	28	Pinus hartwegii	7.60	4.88	9	0.02	0.01	0.00
5	1	Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
5	2	Pinus hartwegii	24.50	13.50	49	0.45	0.22	0.13
5	3	Pinus hartwegii	38.00	19.28	83	1.53	0.76	0.44
5	4	Pinus hartwegii	22.50	12.56	40	0.35	0.17	0.10
5	5	Pinus hartwegii	31.00	16.41	76	0.87	0.43	0.25
5	6	Pinus hartwegii	42.00	20.81	88	2.02	1.00	0.59
5	7	Pinus hartwegii	44.50	21.71	91	2.36	1.17	0.69
5	8	Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
5	9	Pinus hartwegii	13.50	8.07	20	0.08	0.04	0.02
5	10	Pinus hartwegii	29.50	15.76	71	0.75	0.37	0.22
5	11	Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
5	12	Pinus hartwegii	42.50	20.99	88	2.08	1.03	0.61
5	13	Pinus hartwegii	28.00	15.10	64	0.65	0.32	0.19
5	14	Pinus hartwegii	41.00	20.43	88	1.89	0.94	0.55
5	15	Pinus hartwegii	30.00	15.98	76	0.79	0.39	0.23
5	16	Pinus hartwegii	41.50	20.62	87	1.95	0.97	0.57
5	17	Pinus hartwegii	28.50	15.32	64	0.68	0.34	0.20
5	18	Pinus hartwegii	16.00	9.36	26	0.13	0.07	0.04
5	19	Pinus hartwegii	34.00	17.67	80	1.12	0.56	0.33
5	20	Pinus hartwegii	27.50	14.87	61	0.62	0.31	0.18
5	21	Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
5	22	Pinus hartwegii	44.50	21.71	91	2.36	1.17	0.69
5	23	Pinus hartwegii	28.00	15.10	64	0.65	0.32	0.19
5	24	Pinus hartwegii	38.00	19.28	83	1.53	0.76	0.44
5	25	Pinus hartwegii	32.00	16.84	77	0.95	0.47	0.28
5	26	Pinus hartwegii	22.50	12.56	41	0.35	0.17	0.10
5	27	Pinus hartwegii	44.00	21.53	91	2.29	1.14	0.67
5	28	Pinus hartwegii	33.50	17.47	79	1.08	0.54	0.31
5	29	Pinus hartwegii	3.50	2.56	4	0.00	0.00	0.00
5	30	Pinus hartwegii	3.00	2.27	4	0.00	0.00	0.00
5	31	Pinus hartwegii	9.00	5.66	12	0.03	0.01	0.01
5	32	Pinus hartwegii	5.00	3.42	6	0.00	0.00	0.00
5	33	Pinus hartwegii	4.50	3.13	5	0.00	0.00	0.00
5	34	Pinus hartwegii	3.00	2.27	4	0.00	0.00	0.00
6	1	Pinus hartwegii	37.90	19.24	83	1.52	0.75	0.44
6	2	Pinus hartwegii	44.30	21.64	91	2.34	1.16	0.68
6	3	Pinus hartwegii	47.00	22.59	92	2.74	1.36	0.80
6	4	Pinus hartwegii	24.90	13.69	52	0.47	0.23	0.14
6	5	Pinus hartwegii	29.40	15.71	73	0.75	0.37	0.22
6	6	Pinus hartwegii	19.40	11.06	32	0.23	0.11	0.07
6	7	Pinus hartwegii	36.60	18.73	83	1.38	0.68	0.40
6	8	Pinus hartwegii	33.30	17.38	79	1.06	0.53	0.31
6	9	Pinus hartwegii	37.80	19.20	83	1.51	0.75	0.44
6	10	Pinus hartwegii	27.20	14.74	60	0.60	0.30	0.17
6	11	Pinus hartwegii	31.30	16.54	76	0.89	0.44	0.26

6	12Pinus hartwegii	22.40	12.52	41	0.35	0.17	0.10
6	13Pinus hartwegii	34.80	18.00	80	1.20	0.60	0.35
6	14Pinus hartwegii	33.40	17.42	79	1.07	0.53	0.31
6	15Pinus hartwegii	27.50	14.87	62	0.62	0.31	0.18
6	16Pinus hartwegii	27.80	15.01	63	0.64	0.32	0.19
6	17Pinus hartwegii	19.60	11.16	33	0.24	0.12	0.07
6	18Pinus hartwegii	39.20	19.75	85	1.67	0.83	0.48
6	19Pinus hartwegii	44.60	21.75	92	2.38	1.18	0.69
6	20Pinus hartwegii	32.40	17.00	77	0.98	0.49	0.29
6	21Pinus hartwegii	20.30	11.51	35	0.26	0.13	0.08
6	22Pinus hartwegii	44.00	21.53	87	2.29	1.14	0.67
6	23Pinus hartwegii	23.70	13.13	46	0.41	0.20	0.12
6	24Pinus hartwegii	33.30	17.38	79	1.06	0.53	0.31
6	25Pinus hartwegii	27.30	14.78	61	0.61	0.30	0.18
6	26Pinus hartwegii	33.30	17.38	79	1.06	0.53	0.31
6	27Pinus hartwegii	42.60	21.03	87	2.10	1.04	0.61
6	28Pinus hartwegii	44.30	21.64	92	2.34	1.16	0.68
6	29Pinus hartwegii	35.60	18.33	83	1.28	0.63	0.37
6	30Pinus hartwegii	7.70	4.94	9	0.02	0.01	0.00
6	31Pinus hartwegii	2.90	2.21	3	0.00	0.00	0.00
6	32Pinus hartwegii	2.50	1.98	3	0.00	0.00	0.00
6	33Pinus hartwegii	2.90	2.21	4	0.00	0.00	0.00
6	34Pinus hartwegii	8.70	5.49	11	0.02	0.01	0.01
6	35Pinus hartwegii	3.90	2.79	4	0.00	0.00	0.00
6	36Pinus hartwegii	5.20	3.53	6	0.01	0.00	0.00
6	37Pinus hartwegii	6.00	3.99	7	0.01	0.00	0.00
6	38Pinus hartwegii	6.50	4.27	8	0.01	0.00	0.00
6	39Pinus hartwegii	5.60	3.76	6	0.01	0.00	0.00
6	40Pinus hartwegii	2.50	1.98	3	0.00	0.00	0.00
6	41Pinus hartwegii	2.10	1.74	2	0.00	0.00	0.00
6	42Pinus hartwegii	1.80	1.57	2	0.00	0.00	0.00
6	43Pinus hartwegii	4.60	3.19	5	0.00	0.00	0.00
6	44Pinus hartwegii	5.00	3.42	5	0.00	0.00	0.00
6	45Pinus hartwegii	4.60	3.19	5	0.00	0.00	0.00
6	46Pinus hartwegii	7.30	4.72	9	0.01	0.01	0.00
6	47Pinus hartwegii	1.50	1.39	2	0.00	0.00	0.00
6	48Pinus hartwegii	10.50	6.47	15	0.04	0.02	0.01
6	49Pinus hartwegii	4.50	3.13	5	0.00	0.00	0.00
6	50Pinus hartwegii	5.45	3.68	6	0.01	0.00	0.00
6	51Pinus hartwegii	3.15	2.36	4	0.00	0.00	0.00
6	52Pinus hartwegii	6.10	4.04	8	0.01	0.00	0.00
6	53Pinus hartwegii	2.65	2.07	3	0.00	0.00	0.00
6	54Pinus hartwegii	4.80	3.31	5	0.00	0.00	0.00
6	55Pinus hartwegii	3.80	2.73	4	0.00	0.00	0.00
6	56Pinus hartwegii	2.40	1.92	3	0.00	0.00	0.00
6	57Pinus hartwegii	2.10	1.74	2	0.00	0.00	0.00
6	58Pinus hartwegii	4.20	2.96	5	0.00	0.00	0.00
6	59Pinus hartwegii	3.00	2.27	4	0.00	0.00	0.00
6	60Pinus hartwegii	2.00	1.69	2	0.00	0.00	0.00
6	61Pinus hartwegii	1.90	1.63	2	0.00	0.00	0.00
6	62Pinus hartwegii	1.75	1.54	2	0.00	0.00	0.00
6	63Pinus hartwegii	9.10	5.71	12	0.03	0.01	0.01
6	64Pinus hartwegii	8.35	5.30	11	0.02	0.01	0.01
6	65Pinus hartwegii	8.35	5.30	11	0.02	0.01	0.01
6	66Pinus hartwegii	9.20	5.76	12	0.03	0.01	0.01
6	67Pinus hartwegii	11.00	6.74	16	0.04	0.02	0.01
6	68Pinus hartwegii	6.40	4.21	8	0.01	0.00	0.00
6	69Pinus hartwegii	9.70	6.04	13	0.03	0.02	0.01
6	70Pinus hartwegii	2.40	1.92	3	0.00	0.00	0.00
6	71Pinus hartwegii	1.60	1.45	2	0.00	0.00	0.00
7	1Pinus hartwegii	38.50	19.48	83	1.59	0.79	0.46
7	2 Pinus hartwegii	26.00	14.19	58	0.53	0.26	0.15
7	3 Pinus hartwegii	11.00	6.74	16	0.04	0.02	0.01
7	4 Pinus hartwegii	90.00	32.34	100	14.40	7.15	4.18
7	5Pinus hartwegii	25.50	13.97	55	0.50	0.25	0.15
7	6Pinus hartwegii	36.00	18.49	83	1.32	0.65	0.38
7	7Pinus hartwegii	16.00	9.36	26	0.13	0.07	0.04
7	8Pinus hartwegii	30.00	15.98	76	0.79	0.39	0.23
7	9Pinus hartwegii	32.00	16.84	78	0.95	0.47	0.28
7	10Pinus hartwegii	19.00	10.87	32	0.22	0.11	0.06
7	11Pinus hartwegii	44.00	21.53	91	2.29	1.14	0.67
7	12Pinus hartwegii	48.00	22.93	95	2.90	1.44	0.84
7	13Pinus hartwegii	41.00	20.43	87	1.89	0.94	0.55
7	14Pinus hartwegii	28.50	15.32	68	0.68	0.34	0.20
7	15Pinus hartwegii	29.80	15.89	75	0.78	0.39	0.23
7	16Pinus hartwegii	36.00	18.49	83	1.32	0.65	0.38
7	17Pinus hartwegii	44.00	21.53	91	2.29	1.14	0.67
7	18Pinus hartwegii	27.00	14.65	60	0.59	0.29	0.17
7	19Pinus hartwegii	10.00	6.20	14	0.03	0.02	0.01
7	20Pinus hartwegii	24.00	13.27	49	0.42	0.21	0.12
7	21Pinus hartwegii	29.00	15.54	71	0.72	0.36	0.21
7	22Pinus hartwegii	29.80	15.89	75	0.78	0.39	0.23
7	23Pinus hartwegii	37.40	19.05	83	1.46	0.73	0.43
7	24Pinus hartwegii	31.00	16.41	76	0.87	0.43	0.25
7	25Pinus hartwegii	46.00	22.24	91	2.59	1.28	0.75
7	26Pinus hartwegii	46.00	22.24	91	2.59	1.28	0.75

7	27	Pinus hartwegii	8.00	5.10	11	0.02	0.01	0.01
8	1	Pinus hartwegii	20.60	11.65	38	0.27	0.13	0.08
8	2	Pinus hartwegii	34.60	17.92	80	1.18	0.59	0.34
8	3	Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
8	4	Pinus hartwegii	65.00	27.89	100	6.48	3.22	1.88
8	5	Pinus hartwegii	23.50	13.04	45	0.40	0.20	0.11
8	6	Pinus hartwegii	11.70	7.12	17	0.05	0.03	0.02
8	7	Pinus hartwegii	10.00	6.20	14	0.03	0.02	0.01
8	8	Pinus hartwegii	99.00	33.12	100	17.85	8.86	5.18
8	9	Pinus hartwegii	11.00	6.74	17	0.04	0.02	0.01
8	10	Pinus hartwegii	10.60	6.53	14	0.04	0.02	0.01
8	11	Pinus hartwegii	11.80	7.17	17	0.05	0.03	0.02
8	12	Pinus hartwegii	12.00	7.28	18	0.06	0.03	0.02
8	13	Pinus hartwegii	34.70	17.96	79	1.19	0.59	0.35
8	14	Pinus hartwegii	30.40	16.15	75	0.82	0.41	0.24
8	15	Pinus hartwegii	30.20	16.06	75	0.81	0.40	0.23
8	16	Pinus hartwegii	42.40	20.95	87	2.07	1.03	0.60
8	17	Pinus hartwegii	18.00	10.37	30	0.18	0.09	0.05
8	18	Pinus hartwegii	47.50	22.76	93	2.82	1.40	0.82
8	19	Pinus hartwegii	65.00	27.89	100	6.48	3.22	1.88
8	20	Pinus hartwegii	21.00	11.84	37	0.29	0.14	0.08
8	21	Pinus hartwegii	37.50	19.09	84	1.48	0.73	0.43
8	22	Pinus hartwegii	21.40	12.04	38	0.30	0.15	0.09
8	23	Pinus hartwegii	48.00	22.93	95	2.90	1.44	0.84
8	24	Pinus hartwegii	36.00	18.49	83	1.32	0.65	0.38
8	25	Pinus hartwegii	27.50	14.87	61	0.62	0.31	0.18
8	26	Pinus hartwegii	2.70	2.09	3	0.00	0.00	0.00
9	1	Pinus hartwegii	17.50	10.12	28	0.17	0.08	0.05
9	2	Pinus hartwegii	49.00	23.26	96	3.07	1.52	0.89
9	3	Pinus hartwegii	14.00	8.33	21	0.09	0.04	0.03
9	4	Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
9	5	Pinus hartwegii	41.00	20.43	87	1.89	0.94	0.55
9	6	Pinus hartwegii	29.00	15.54	71	0.72	0.36	0.21
9	7	Pinus hartwegii	40.50	20.24	87	1.83	0.91	0.53
9	8	Pinus hartwegii	36.00	18.49	83	1.32	0.65	0.38
9	9	Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
9	10	Pinus hartwegii	36.00	18.49	83	1.32	0.65	0.38
9	11	Pinus hartwegii	29.00	15.54	71	0.72	0.36	0.21
9	12	Pinus hartwegii	19.00	10.87	32	0.22	0.11	0.06
9	13	Pinus hartwegii	35.50	18.29	83	1.27	0.63	0.37
9	14	Pinus hartwegii	28.00	15.10	64	0.65	0.32	0.19
9	15	Pinus hartwegii	31.50	16.62	76	0.91	0.45	0.26
9	16	Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
9	17	Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
9	18	Pinus hartwegii	33.00	17.26	79	1.03	0.51	0.30
9	19	Pinus hartwegii	25.50	13.97	55	0.50	0.25	0.15
9	20	Pinus hartwegii	41.00	20.43	88	1.89	0.94	0.55
9	21	Pinus hartwegii	36.50	18.69	83	1.37	0.68	0.40
9	22	Pinus hartwegii	27.00	14.65	60	0.59	0.29	0.17
9	23	Pinus hartwegii	22.00	12.33	40	0.33	0.16	0.10
9	24	Pinus hartwegii	18.00	10.37	30	0.18	0.09	0.05
9	25	Pinus hartwegii	27.50	14.87	61	0.62	0.31	0.18
9	26	Pinus hartwegii	53.00	24.55	100	3.79	1.88	1.10
9	27	Pinus hartwegii	37.00	18.89	83	1.42	0.71	0.41
9	28	Pinus hartwegii	34.00	17.67	79	1.12	0.56	0.33
9	29	Pinus hartwegii	27.00	14.65	60	0.59	0.29	0.17
10	1	Pinus hartwegii	10.30	6.36	14	0.04	0.02	0.01
10	2	Pinus hartwegii	22.90	12.75	40	0.37	0.18	0.11
10	3	Pinus hartwegii	46.30	22.35	92	2.63	1.31	0.76
10	4	Pinus hartwegii	28.50	15.32	68	0.68	0.34	0.20
10	5	Pinus hartwegii	34.00	17.67	79	1.12	0.56	0.33
10	6	Pinus hartwegii	55.70	25.37	100	4.33	2.15	1.26
10	7	Pinus hartwegii	49.80	23.53	98	3.21	1.59	0.93
10	8	Pinus hartwegii	30.30	16.11	75	0.81	0.40	0.24
10	9	Pinus hartwegii	30.00	15.98	75	0.79	0.39	0.23
10	10	Pinus hartwegii	62.80	27.33	100	5.93	2.94	1.72
10	11	Pinus hartwegii	25.60	14.01	55	0.50	0.25	0.15
10	12	Pinus hartwegii	31.70	16.71	76	0.92	0.46	0.27
10	13	Pinus hartwegii	42.40	20.95	87	2.07	1.03	0.60
10	14	Pinus hartwegii	34.20	17.76	80	1.14	0.57	0.33
10	15	Pinus hartwegii	26.40	14.38	58	0.55	0.27	0.16
10	16	Pinus hartwegii	26.50	14.42	58	0.56	0.28	0.16
10	17	Pinus hartwegii	25.00	13.74	53	0.47	0.23	0.14
10	18	Pinus hartwegii	19.50	11.11	33	0.23	0.12	0.07
10	19	Pinus hartwegii	20.00	11.36	35	0.25	0.12	0.07
10	20	Pinus hartwegii	28.30	15.23	64	0.67	0.33	0.19
10	21	Pinus hartwegii	23.00	12.80	43	0.37	0.18	0.11
10	22	Pinus hartwegii	2.40	1.92	3	0.00	0.00	0.00
10	23	Pinus hartwegii	2.80	2.15	3	0.00	0.00	0.00
10	24	Pinus hartwegii	2.25	1.83	3	0.00	0.00	0.00
10	25	Pinus hartwegii	4.60	3.19	5	0.00	0.00	0.00
10	320	árboles	25.52	13.23		333.01	165.34	96.72

Sitio Sureste

Circulo	No. Especie	DN(cm)	Altura (m)	Edad	Volumen (m3)	Biomasa(t)	Contenido de Carbono por árbol
1	1Pinus hartwegii	39.40	19.83	87	1.69	0.84	0.49
1	2Pinus hartwegii	86.80	31.96	100	13.24	6.57	3.85
1	3Pinus hartwegii	51.00	23.92	100	3.42	1.70	0.99
1	4Pinus hartwegii	48.30	23.03	95	2.95	1.47	0.86
1	5Pinus hartwegii	89.10	32.24	100	14.07	6.99	4.09
1	6Pinus hartwegii	67.40	28.46	100	7.11	3.53	2.06
1	7Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
2	1Pinus hartwegii	69.00	28.83	100	7.55	3.75	2.19
2	2Pinus hartwegii	54.50	25.01	100	4.08	2.03	1.19
2	3Pinus hartwegii	75.40	30.15	100	9.42	4.68	2.74
2	4Pinus hartwegii	15.70	9.21	25	0.12	0.06	0.04
2	5Pinus hartwegii	49.90	23.56	98	3.23	1.60	0.94
2	6Pinus hartwegii	59.20	26.37	100	5.08	2.52	1.48
2	7Pinus hartwegii	57.00	25.75	100	4.60	2.28	1.34
2	8Pinus hartwegii	32.30	16.96	78	0.97	0.48	0.28
2	9Pinus hartwegii	50.40	23.72	100	3.31	1.64	0.96
3	1Pinus hartwegii	32.30	16.96	78	0.97	0.48	0.28
3	2Pinus hartwegii	50.40	23.72	100	3.31	1.64	0.96
4	1Pinus hartwegii	70.00	29.05	100	7.83	3.89	2.27
4	2Pinus hartwegii	39.60	19.90	87	1.72	0.85	0.50
4	3Pinus hartwegii	49.00	23.26	96	3.07	1.52	0.89
5	1Pinus hartwegii	51.40	24.04	100	3.49	1.73	1.01
5	2Pinus hartwegii	44.50	21.71	92	2.36	1.17	0.69
5	3Pinus hartwegii	38.70	19.56	83	1.61	0.80	0.47
6	1Pinus hartwegii	72.50	29.58	100	8.55	4.24	2.48
6	2Pinus hartwegii	46.00	22.24	91	2.59	1.28	0.75
6	3Pinus hartwegii	58.50	26.18	100	4.92	2.45	1.43
6	4Pinus hartwegii	37.90	19.24	83	1.52	0.75	0.44
6	5Pinus hartwegii	39.40	19.83	87	1.69	0.84	0.49
6	6Pinus hartwegii	37.70	19.16	83	1.50	0.74	0.43
6	7Pinus hartwegii	48.20	23.00	96	2.94	1.46	0.85
6	8Pinus hartwegii	51.30	24.01	100	3.47	1.72	1.01
6	9Pinus hartwegii	45.60	22.10	91	2.53	1.25	0.73
6	10Pinus hartwegii	37.90	19.24	83	1.52	0.75	0.44
6	11Pinus hartwegii	27.60	14.92	62	0.62	0.31	0.18
6	12Pinus hartwegii	57.70	25.95	100	4.75	2.36	1.38
7	1Pinus hartwegii	47.60	22.79	93	2.84	1.41	0.82
7	2Pinus hartwegii	48.00	22.93	95	2.90	1.44	0.84
7	3Pinus hartwegii	61.00	26.86	100	5.49	2.73	1.60
7	4Pinus hartwegii	40.40	20.21	87	1.81	0.90	0.53
7	5Pinus hartwegii	47.90	22.89	95	2.89	1.43	0.84
7	6Pinus hartwegii	34.00	17.67	91	1.12	0.56	0.33
7	7Pinus hartwegii	44.30	21.64	91	2.34	1.16	0.68
7	8Pinus hartwegii	58.70	26.23	100	4.97	2.47	1.44
7	9Pinus hartwegii	40.00	20.05	87	1.76	0.88	0.51
7	10Pinus hartwegii	44.80	21.82	91	2.41	1.20	0.70
7	11Pinus hartwegii	54.80	25.10	100	4.14	2.06	1.20
7	12Pinus hartwegii	53.70	24.76	100	3.93	1.95	1.14
7	13Pinus hartwegii	64.20	27.69	100	6.27	3.12	1.82
7	14Pinus hartwegii	82.70	31.39	100	11.80	5.86	3.43
7	15Pinus hartwegii	43.80	21.46	91	2.26	1.12	0.66
7	16Pinus hartwegii	53.10	24.58	100	3.81	1.89	1.11
7	17Pinus hartwegii	52.30	24.33	100	3.66	1.82	1.06
7	18Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
8	1Pinus hartwegii	47.70	22.83	94	2.86	1.42	0.83
8	2Pinus hartwegii	24.60	13.55	51	0.45	0.22	0.13
8	3Pinus hartwegii	44.30	21.64	91	2.34	1.16	0.68
8	4Pinus hartwegii	39.30	19.79	86	1.68	0.83	0.49
8	5Pinus hartwegii	39.90	20.02	87	1.75	0.87	0.51
8	6Pinus hartwegii	25.90	14.15	57	0.52	0.26	0.15
8	7Pinus hartwegii	52.10	24.27	100	3.62	1.80	1.05
8	8Pinus hartwegii	39.50	19.86	87	1.70	0.85	0.49
8	9Pinus hartwegii	56.40	25.57	100	4.47	2.22	1.30
8	10Pinus hartwegii	38.50	19.48	84	1.59	0.79	0.46
8	11Pinus hartwegii	27.50	14.87	61	0.62	0.31	0.18
8	12Pinus hartwegii	23.20	12.90	43	0.38	0.19	0.11
8	13Pinus hartwegii	43.70	21.43	90	2.25	1.12	0.65
8	14Pinus hartwegii	52.80	24.49	100	3.75	1.86	1.09
8	15Pinus hartwegii	43.00	21.17	88	2.15	1.07	0.63
8	16Pinus hartwegii	50.50	23.76	100	3.33	1.65	0.97
8	17Pinus hartwegii	39.00	19.67	84	1.64	0.82	0.48
8	18Pinus hartwegii	38.50	19.48	83	1.59	0.79	0.46
8	19Pinus hartwegii	52.00	24.24	100	3.60	1.79	1.05
8	20Pinus hartwegii	35.00	18.08	80	1.22	0.60	0.35
8	21Pinus hartwegii	43.30	21.28	89	2.19	1.09	0.64
8	22Pinus hartwegii	22.10	12.37	40	0.33	0.16	0.10
8	23Pinus hartwegii	52.00	24.24	100	3.60	1.79	1.05
8	24Pinus hartwegii	58.90	26.29	100	5.01	2.49	1.46
8	25Pinus hartwegii	54.20	24.92	100	4.02	2.00	1.17

8	26	Pinus hartwegii	50.00	23.59	99	3.24	1.61	0.94
8	27	Pinus hartwegii	30.00	15.98	75	0.79	0.39	0.23
8	28	Pinus hartwegii	37.60	19.13	83	1.49	0.74	0.43
9	1	Pinus hartwegii	48.60	23.13	95	3.00	1.49	0.87
9	2	Pinus hartwegii	56.60	25.63	100	4.51	2.24	1.31
9	3	Pinus hartwegii	53.40	24.67	100	3.87	1.92	1.12
9	4	Pinus hartwegii	41.20	20.51	88	1.91	0.95	0.56
9	5	Pinus hartwegii	45.20	21.96	91	2.47	1.22	0.72
9	6	Pinus hartwegii	32.80	17.17	79	1.02	0.50	0.30
9	7	Pinus hartwegii	30.60	16.24	75	0.84	0.41	0.24
9	8	Pinus hartwegii	73.20	29.72	100	8.76	4.35	2.54
9	9	Pinus hartwegii	68.40	28.69	100	7.38	3.66	2.14
9	10	Pinus hartwegii	60.00	26.59	100	5.26	2.61	1.53
9	11	Pinus hartwegii	60.40	26.70	100	5.36	2.66	1.56
9	12	Pinus hartwegii	29.80	15.89	75	0.78	0.39	0.23
9	13	Pinus hartwegii	51.90	24.20	100	3.58	1.78	1.04
9	14	Pinus hartwegii	42.40	20.95	88	2.07	1.03	0.60
9	15	Pinus hartwegii	41.90	20.77	88	2.00	1.00	0.58
9	16	Pinus hartwegii	70.30	29.11	100	7.91	3.93	2.30
9	17	Pinus hartwegii	45.60	22.10	91	2.53	1.25	0.73
9	18	Pinus hartwegii	35.20	18.16	80	1.24	0.61	0.36
10	1	Pinus hartwegii	47.70	22.83	94	2.86	1.42	0.83
10	2	Pinus hartwegii	53.10	24.58	100	3.81	1.89	1.11
10	3	Pinus hartwegii	82.70	31.39	100	11.80	5.86	3.43
10	4	Pinus hartwegii	58.20	26.09	100	4.86	2.41	1.41
10	5	Pinus hartwegii	50.00	23.59	99	3.24	1.61	0.94
Total			105 árboles	48.22	22.49	361.93	179.70	105.12