



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA

Estimación de biomasa y carbono de *Pinus
pseudostrobus* en San José del Rincón, Estado de
México

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

ADRIÁN ALEJANDRO PALMA MARROQUÍN

TUTOR: M. en C. Efraín Velasco Bautista.

TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO.

2011.



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo se llevó a cabo gracias al financiamiento del proyecto “Definición de acciones sobre el riesgo en materia de adaptación y vulnerabilidad para el sector primario ante el cambio climático para el Estado de México” con Clave CONACYT: EDOMEX-2008-01-103001



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA
 CARRERA DE BIOLOGIA



09 de agosto de 2011

DR. SERGIO CHÁZARO OLVERA
 DIRECTOR
 PRESENTE.

Atención: Lic. Eloy González Fernández
 Jefe de la Unidad de Administración Escolar

Los abajo firmantes, miembros de la Comisión Dictaminadora del trabajo de:

TESIS DE INVESTIGACIÓN

Titulado "Estimación de biomasa y carbono de *Pinus pseudostrabus* en San José del Rincón, Estado de México"

Que presenta el (la) pasante de Biología: **ADRIAN ALEJANDRO PALMA MARROQUIN** con Número de Cuenta: **30381250-6**. Para obtener el título de Biólogo.

Informan que después de haber revisado cuidadosamente el trabajo, consideramos que reúne las características de calidad académica que se requieren para aspirar a la obtención del título citado, razón por la cual otorgamos nuestros **votos aprobatorios** para la presentación del examen profesional correspondiente.

GRADO	NOMBRE	FIRMA	CARGO
DRA.	SILVIA ROMERO RANGEL		Presidente
M. EN C.	EZEQUIEL CARLOS ROJAS ZENTENO		Vocal
M. EN C.	EFRAIN VELASCO BAUTISTA		Secretario
M. EN C.	ANGEL DURAN DIAZ		Suplente
M. EN C.	MARTIN ENRIQUE ROMERO SANCHEZ		Suplente

Con base en lo anterior solicito su autorización para que los profesores que otorgan los votos aprobatorios funjan como sinodales del examen profesional en el cargo anotado, y a la Administración Escolar otorgue la fecha para la Réplica Oral del trabajo presentado.

Atentamente
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

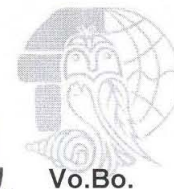
JEFE DE CARRERA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
 DE MÉXICO
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

M. EN C. RAFAEL CHÁVEZ LÓPEZ



JEFATURA DE
 BIOLOGIA



Vo.Bo.

Dr. Sergio Cházaro Olvera
 Director

Dedicatoria

A mis padres Flor de María Marroquín Lesieur y Gerardo Palma Bautista por su total e incondicional apoyo, motivación y cariño en todas las etapas de mi vida tanto pasadas como futuras y por estar ahí siempre que los he necesitado. Los amo.

A mi hermana Paulina Palma Marroquín por ser mi amiga, mi cómplice y la mejor hermana. Te amo.

A Ovet Alfredo Marroquín Lesieur por compartirme su enorme pasión por la Biología.

A mis abuelos por su apoyo y experiencias de vida.

Agradecimientos

A mis padres y hermana por su apoyo incondicional.

Al M. en C Efraín Velasco Bautista por dirigir este trabajo y compartir sus conocimientos en estadística.

Al M. en C. Antonio González Hernández por su apoyo y participación en el trabajo de campo y sus acertados comentarios.

Al Biol. Jairzinho López Zamora, por se mi amigo de la carrera con el que comparto muchas vivencias y proyectos.

Al grupo de trabajo en campo: M. en C. Francisco Moreno, M. en C Efraín Velasco, M. en C Martin Romero, Dr. Ramiro Pérez, Biol. Gustavo Torres y Bruno

A mis compañeros de la FES-Iztacala con quienes compartí inolvidables momentos: Victor Jimenez, Kenya Toledo, Juan de Dios Ruiz, Edith Martínez, Karina Trinidad, Carmen Torres

A mis compañeros de Centro Geo: Geog. David León, Citllalli Tapia, Alfonso Tapia, Patricia López, Talib Oliver

A la Geog. Gabriela Aguirre por sus acertados comentarios para mejorar el presente trabajo

Al Geog. David León por sus opiniones y comentarios.

Índice

RECONOCIMIENTO	ii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Introducción	1
El carbono	2
El ciclo del carbono	3
Almacenes de carbono	4
Antecedentes	8
Objetivo	15
Objetivos particulares	15
Hipótesis	16
Material y método	16
Área de estudio	16
Climas	17
Geomorfología y relieve	18
Hidrología	19
Geología	20
Suelos	21
Aprovechamiento actual del suelo	22
Especie de estudio	23
Distribución y hábitat	24
Floración y fructificación	25
Metodología de campo	25
Medición del fuste.....	26
Medición de las ramas	27
Pesado del follaje	29
Secado de muestras en el invernadero y laboratorio del CENID-COMEF-INIFAP .	30
Trabajo de gabinete	33
Biomasa del fuste	33
Biomasa de las ramas y del follaje.....	34
Modelos de biomasa y carbono	35
Resultados y discusión	36
Modelos para biomasa	40
Modelos para carbono	46
Conclusiones	53
Bibliografía	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CAMBIO CLIMÁTICO, CUADRO DE REFERENCIA.	1
FIGURA 2. A) EMISIONES MUNDIALES DE GEI ANTROPÓGENOS ENTRE 1970 Y 2004. B) <i>PARTE PROPORCIONAL QUE REPRESENTAN DIFERENTES GEIANTROPÓGENOS RESPECTO DE LAS EMISIONES TOTALES EN 2004, EN TÉRMINOS DE CO₂ EQUIVALENTE.</i> C) <i>PARTE PROPORCIONAL QUE REPRESENTAN DIFERENTES SECTORES EN LAS EMISIONES TOTALES DE GEI ANTROPÓGENOS EN 2004, EN TÉRMINOS DE CO₂ EQUIVALENTE.</i> FUENTE. IPCC 2007	2
FIGURA 3. CICLO DEL CARBONO (WORLD ENERGY BLOG).	3
FIGURA 4. CICLO GLOBAL DEL CARBONO CON ALMACENES Y FLUJOS EXPRESADOS EN GT C Y GT C AÑO-1 RESPECTIVAMENTE	7
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	17
FIGURA 6. CLIMAS DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	18
FIGURA 7. RELIEVE E HIDROLOGÍA DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	20
FIGURA 8. GEOLOGÍA DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	21
FIGURA 9. TIPOS DE SUELO PRESENTES EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	22
FIGURA 10. ASPECTO DE LA CORTEZA DE <i>PINUS PSEUDOSTROBUS</i> .	23
FIGURA 11. ASPECTO DEL FOLLAJE DE <i>PINUS PSEUDOSTROBUS</i> LINDL.	24
FIGURA 12. MADERA DE <i>PINUS PSEUDOSTROBUS</i> LINDL.	24
FIGURA 13. CONO DE <i>PINUS PSEUDOSTROBUS</i> LINDL.	25
FIGURA 14. EXTRACCIÓN DE LAS RODAJAS DEL FUSTE PRINCIPAL.	27
FIGURA 15. OBTENCIÓN DEL VOLUMEN DEL PARALELEPÍPEDO.	27
FIGURA 16. MUESTREO: REGLA DE SHELLMAN.	28
FIGURA 17. PESADO DE SECCIONES DE RAMAS.	29
FIGURA 18. COLECTA DE LA TOTALIDAD DEL FOLLAJE.	29
FIGURA 19. USO DEL SISTEMA WINCH PARA EL PESADO DEL FOLLAJE.	30
FIGURA 20. SECADO PARCIAL DE LAS MUESTRAS EN EL INVERNADERO.	31
FIGURA 21. TOMA DE LAS SUB-MUESTRAS DE LAS RODAJAS.	32
FIGURA 22. TOMA DE LAS SUB-MUESTRAS DE LOS BRAZUELOS.	32
FIGURA 23. SECADO DE MUESTRAS.	33
FIGURA 24. DISPERSIÓN DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	44
FIGURA 25. HISTOGRAMA DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	44
FIGURA 26. PLOT DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	45
FIGURA 27. BIOMASA OBSERVADA (KG) CONTRA BIOMASA ESTIMADA (KG).	46
FIGURA 28. DISPERSIÓN DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	49
FIGURA 29. HISTOGRAMA DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	50
FIGURA 30. PLOT DE LOS RESIDUALES DERIVADOS DEL MODELO	51
FIGURA 31. CARBONO OBSERVADO (KG) CONTRA CARBONO ESTIMADO (KG).	52

Índice de cuadros

CUADRO 1. TIPOS DE SUELO PRESENTES EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	21
CUADRO 2. APROVECHAMIENTO ACTUAL DEL SUELO EN SAN JOSÉ DEL RINCÓN.	23
CUADRO 3. CATEGORÍAS DIAMÉTRICAS.	26
CUADRO 4. MODELOS NO LINEALES Y LINEARIZADOS EVALUADOS EN EL ESTUDIO.	35
CUADRO 5. PARÁMETROS OBTENIDOS EN CAMPO	36
CUADRO 6. ESTADÍSTICOS BÁSICOS DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.	37
CUADRO 7 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.	39
CUADRO 8. ESTADÍSTICOS DE BONDAD DE AJUSTE Y DE NORMALIDAD DE LOS MODELOS EVALUADOS PARA BIOMASA.	43
CUADRO 9. PRUEBAS DE HIPÓTESIS E INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS PARÁMETROS DE LO MODELOS EVALUADOS PARA BIOMASA.	43
CUADRO 10. ESTADÍSTICOS DE AJUSTE Y NORMALIDAD DE LOS MODELOS EVALUADOS PARA CARBONO.	48
CUADRO 11. PRUEBAS DE HIPÓTESIS E INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS EVALUADOS PARA CARBONO.	48

Introducción.

El efecto invernadero es un fenómeno en el que determinados gases presentes de forma natural en la atmósfera retienen parte de la energía reflejada por el suelo, lo cual permite regular la temperatura del planeta (Margulis & Lovelock, 1989). Sin embargo, el aumento de algunos de estos gases como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ozono (O₃), entre otros, llamados también gases de efecto invernadero (GEI), han provocado un aumento progresivo en la temperatura a una tasa de 0.2° C cada decenio, lo que contribuye en mayor proporción al cambio climático (CC); éste fenómeno se refiere a fluctuaciones en el estado del clima que pueden ser identificadas por las variaciones en la media y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado de tiempo, mismo que se manifiesta en el incremento de la temperatura y eventos climáticos extremos, la desertificación y erosión (IPCC, 2000; IPCC, 2007; EPA, 2008), (Figura 1).

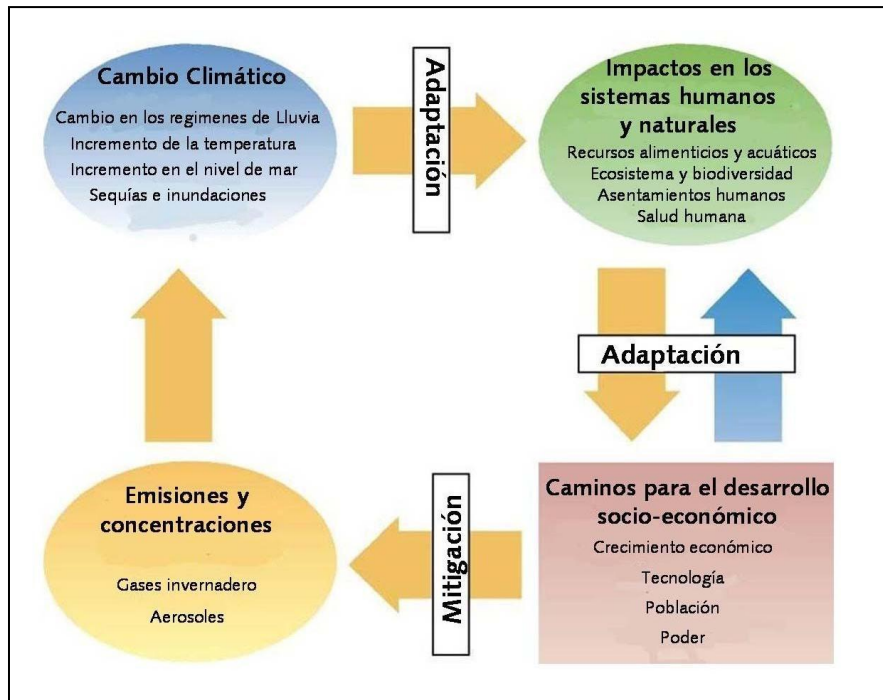


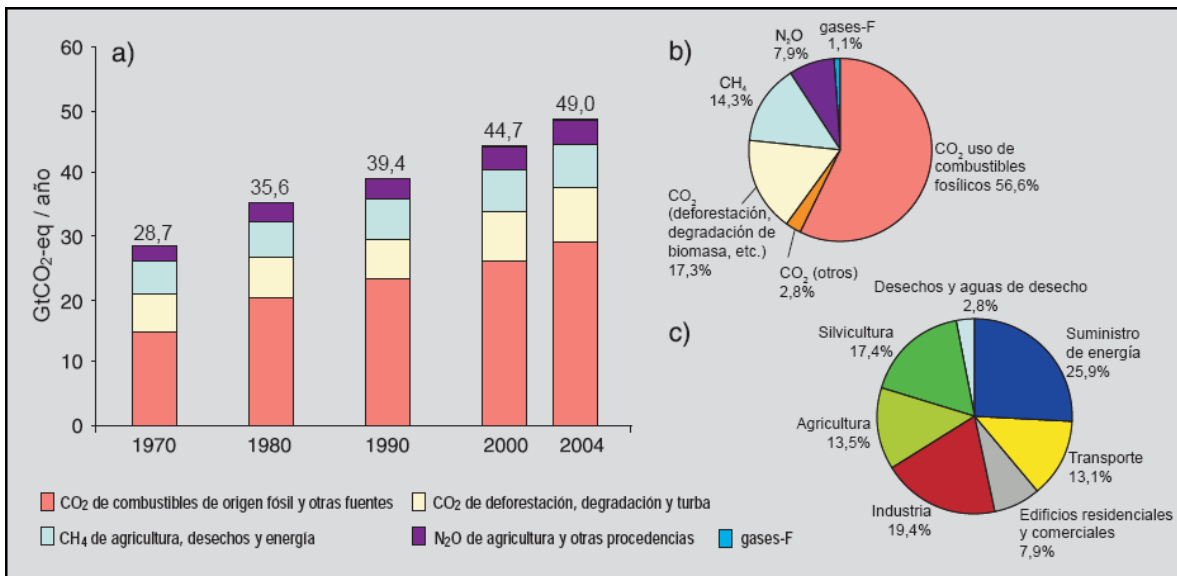
Figura 1. Cambio climático, cuadro de referencia.

A pesar de que el CO₂ tiene una función esencial para la habitabilidad de la Tierra, también es el mayor componente de los gases de invernadero y considerado el causante del cambio climático, por lo que su aumento en la atmósfera es una preocupación mundial.

Los factores responsables de acumulación de CO₂ en la atmósfera corresponden principalmente a actividades humanas relacionadas con el consumo de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo, entre las que destacan la

agricultura, silvicultura, industria, suministro de energía y transporte (Houghton, Jenkins, & Ephraums, 1990; Bueno M. & Helene M., 1991; IPCC, 2007).

Se estima que a partir de mediados del siglo XIX, la actividad humana ha incrementado de forma acelerada la concentración atmosférica del carbono de 280 partes por millón en 1860 a 348 partes por millón en 1990, un incremento del 25% (Worldwatch Institute, 2002), (Figura 2).



Los científicos predicen que un incremento como éste podría causar un incremento en la temperatura global que produciría un patrón climático impredecible. Es muy probable que ocurran más inundaciones, sequías, incendios y ondas de calor junto con la temperatura global. Habrá escasez de agua de forma crónica en más de 80 países, donde habitan más del 40% de la población mundial (Worldwatch Istitute, 2002).

El carbono

El Carbono (C) es el elemento clave para la vida sobre la tierra. En la naturaleza se encuentra presente en el agua bajo la forma de compuesto carbónico disuelto (carbonatos), o en el aire, como dióxido de carbono. La propiedad del átomo de carbono para formar largas cadenas y anillos covalentes es la base de la química orgánica; ésta se encuentra en todos los organismos vivos y forma parte de los

fisiológicas y estructurales. Esta asignación determina las rutas por las cuales se dará posteriormente el flujo de C al suelo. Cada especie de planta asignará más o menos C para producir biomasa en la parte aérea o en la parte subterránea. (Castellanos, Maass, & Kummerow, 1991).

Almacenes de carbono

Los bosques juegan un papel muy importante en el ciclo y en el secuestro de carbono, ambos a escala local y global (Dixon, Solomon, Brown, Houghton, Trexier, & Wisniewski, 1994). Esto ha llevado al estudio de la captura y almacenamiento de carbono en los bosques, haciéndolos parte del amplio abanico de opciones para reducir los índices de dióxido de carbono a la atmósfera. El reconocimiento del aumento de CO₂ atmosférico ha llevado a la valoración económica del secuestro de carbono como una importante función de los bosques, (NRC, 2000); ya que estos constituyen un factor clave para la mitigación de los efectos del cambio climático; sin embargo, estos también pueden verse afectados al producirse aumentos en la temperatura, cambios en el ciclo hidrológico y la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos (Forestal, 2007).

Los ecosistemas forestales cubren más de 4.1×10^9 hectáreas de la superficie terrestre. Los suelos y vegetación forestales contienen alrededor de 1146 petagramos de carbono. El 37% en bosques de bajas latitudes, 14% en medias latitudes y 49% en altas latitudes. Más de dos tercios de del carbono almacenado en los bosques se encuentra asociado al suelo en forma de turba. En 1990 la deforestación en bosques de bajas latitudes emitió 1.6 ± 0.4 petagramos de carbono al año, cabe destacar que la expansión y el crecimiento de los bosques de media y alta latitud secuestran 0.7 ± 0.2 petagramos de carbono al año, (Dixon, Solomon, Brown, Houghton, Trexier, & Wisniewski, 1994).

Los bosques están sujetos a la influencia de fuerzas naturales y humanas que incluyen su aprovechamiento y degradación, grandes incendios forestales, aparición de plagas y enfermedades y transformación para uso no forestal, (especialmente agricultura y pastos). Estas perturbaciones motivan que con frecuencia los bosques se conviertan en fuentes de CO₂ debido a que la tasa de productividad primaria neta sobrepasa la respiración total u oxidación de las plantas, el suelo y la materia orgánica muerta (producción neta del ecosistema [NEP] < 0). No obstante, algunas áreas de bosques aprovechadas y degradadas (terrenos agrícolas y pastizales), son abandonadas y se renuevan de forma natural o se convierten en plantaciones, transformándose de esta forma en sumideros de C, es decir la tasa de respiración de las plantas, el suelo y la materia orgánica muerta es sobrepasada por la productividad primaria neta (NEP > 0).

El papel actual de los bosques en el ciclo global del C no está sólo en función del uso actual de los terrenos forestales, sino también del uso y las perturbaciones mencionadas anteriormente. En la primera mitad del siglo XIX, las emisiones de CO₂ procedentes de los cambios de uso de las tierras forestales ocasionadas principalmente por la expansión agrícola en países de latitudes medias y elevadas, eran superiores a las aquellas procedentes de la quema de combustibles fósiles (Houghton & Skole, 1990).

Desde principios de siglo XX hasta los años 30, las emisiones globales de CO₂ procedentes de los cambios de uso de las tierras forestales eran similares en magnitud a las procedentes de la quema de combustibles fósiles. A partir de los 40's, aproximadamente, la utilización mundial de combustibles fósiles ha aumentado de manera considerable (Houghton, et al., 1987).

El reservorio de carbono más pequeño y dinámico (700-760 Gt C) se encuentra en la atmósfera, interactúa con los océanos y los ecosistemas terrestres reabasteciéndose constantemente gracias a los procesos de fotosíntesis y respiración que activan los flujos de C (Chapin, Mooney, Chapin, & Matson, 2002)-

El carbono ocupa un lugar importante en el suelo, ya que participa en el uso, transformación, movimiento y reutilización de moléculas inorgánicas y orgánicas integrando el carbono presente en la atmósfera, por lo tanto, la cantidad y tipo de carbono orgánico refleja y controla el desarrollo del suelo y la productividad del ecosistema. (FAO, 2002)

Este elemento se presenta en el suelo como carbono orgánico (COS) y como carbono inorgánico (CIS); el primero es el principal componente de la materia orgánica del suelo y tiene una influencia sustancial en su productividad, ya que contiene muchos nutrientes (FAO, 2002).

La captura de carbono en el suelo implica la transferencia del dióxido de carbono de la atmósfera de manera que no sea liberado inmediatamente. El secuestro de carbono en el suelo incluye el incremento tanto del carbono orgánico como del inorgánico.

El potencial de captura de C va de la mano con la restauración de suelos y ecosistemas degradados (Silver, Ryals, & Eviner, 2000). La tasa de retención de C en carbonatos secundarios es baja (5 a 150 kg C / ha por año) y se acentúa con los procesos biogénicos y la lixiviación de los carbonatos en el agua subterránea (Levy, 1984; Nordt, Wilding, & Drees, 2001).

Los océanos contienen cerca de 50 veces más carbono que la atmósfera, principalmente como carbono inorgánico disuelto. Anualmente entre la atmósfera y

los océanos se intercambian alrededor de 90 Gt C. La asimilación de carbono por los océanos está limitada por la solubilidad del CO₂ en el agua de mar, el tiempo en que se mezclan las aguas superficiales y profundas y la cantidad de cationes disponibles, entre otros factores (Falkowski, 2000)

La absorción neta de CO₂ por el océano es de 2 Gt de carbono al año. El flujo neto del océano es afectado por la muerte del fitoplancton. El CO₂ entra al océano como resultado del aumento en la concentración de este en la atmósfera y se disuelve causando acidificación y disolución de carbonatos marinos (Sundquist, 1985).

La biota marina representa un almacén pequeño (2 Gt C), aunque por ella circula anualmente tanto carbono como en la vegetación terrestre. Los restos orgánicos de carbonato de calcio se hunden lenta pero constantemente en las aguas profundas de los océanos, este proceso conocido como “bomba biológica” transporta el carbono a depósitos donde permanece almacenado por cientos o miles de años.

La Figura 4 muestra la dinámica del carbono entre los diferentes ecosistemas terrestres según Sundquist (1985)

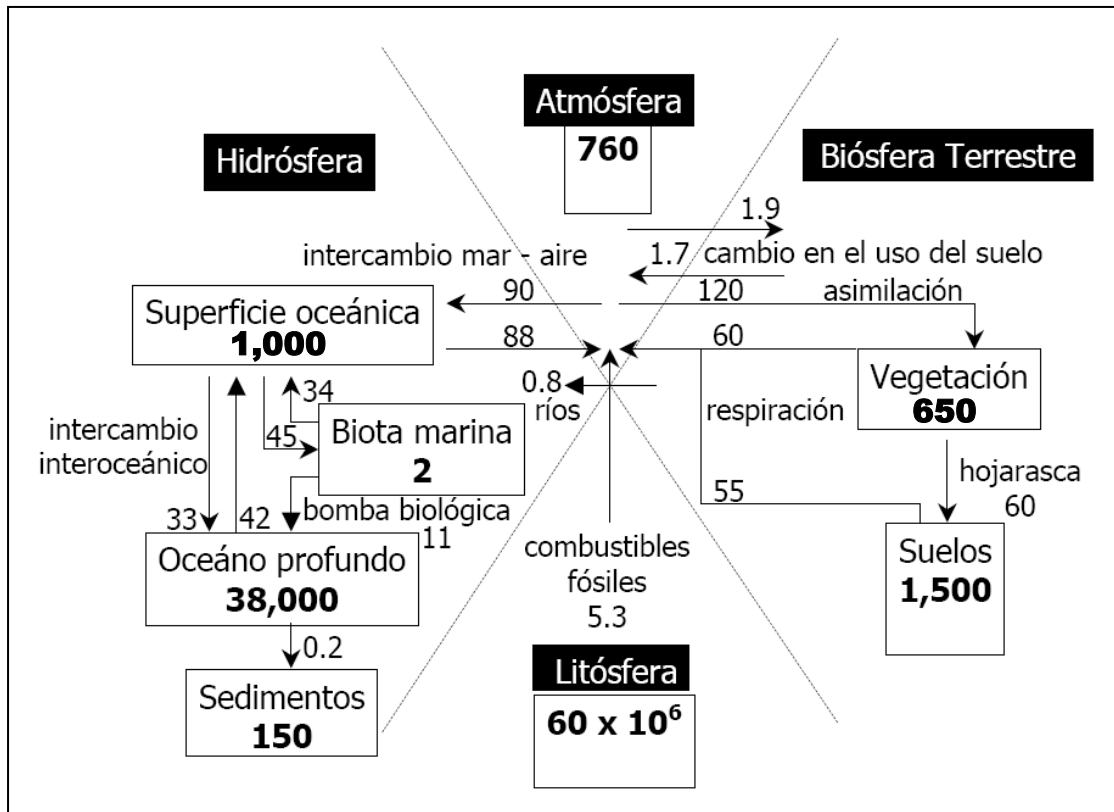


Figura 4. Ciclo global del carbono con almacenes y flujos expresados en Gt C y Gt C año-1 respectivamente

(Modificado por Sundquist (1985) a partir de: Schlesinger, 1991; Holmén, 2000; Chapin, 2002)

Thompson (1917) y Huxley (1932) sentaron las bases del escalamiento alométrico en biología, que se resume en la forma $Y=aX^b$, donde la variable biológica Y depende de la masa del cuerpo X a través del exponente de escalamiento b y de una constante a que es característica de la clase de organismo. Aunque este enfoque ha prevalecido en los estudios sobre animales, trabajos recientes han demostrado el poder del análisis alométrico para interpretar variaciones en las plantas. Su uso en la biología vegetal ha consistido principalmente en el desarrollo de relaciones correlativas entre variables vinculadas al tamaño del organismo y ha tenido aplicaciones en la agricultura, funcionamiento de ecosistemas y manejo de bosques (Niklas & Enquist, 2002).

Las ecuaciones alométricas que relacionan al diámetro normal (DN) con otros atributos, tales como biomasa, carbono y área foliar, además de ser una herramienta importante usada en investigaciones ecológicas (Martin, Kloeppel, Schaefer, Kimbler, & McNulty, 1998).

Con las ecuaciones alométricas se puede obtener una estimación más confiable y directa de la biomasa y C en los sistemas vegetales porque tal estimación es en

primera instancia individual y después mediante la sumatoria, se obtiene una estimación global por sistema (Acosta, 2003).

Se estima que en México, cada habitante emite alrededor de 3.70 toneladas de CO₂, cifra que se encuentra 4.02 toneladas por debajo del promedio mundial. Alrededor de dos tercios de esta cifra corresponden a los diversos procesos de combustión en los sectores energético, industrial, de transporte y de servicios. El resto, se origina de los procesos de deforestación, cambio de uso de suelo y quema de leña (Carabias & Tudela, 2000).

La valoración económica de la captura de carbono se realiza mediante el uso de métodos validados y reconocidos, a través de los cuales se puede calcular la diferencia entre la pérdida de carbono fijado esperada (por efecto de la deforestación) y lo que sucedería con la aplicación de proyectos de conservación, aumento de la masa forestal, principalmente por agroforestería, así como el aumento de materia orgánica. Esta información se utiliza para realizar una negociación entre las empresas que quisieran “comprar” este servicio ambiental y las comunidades; sin embargo, hasta el momento no existe un precio unificado por la tonelada de carbono capturado, ya que varía de país a país según las decisiones gubernamentales.

Antecedentes.

La estrategia nacional de cambio climático (ENACC) es una iniciativa gubernamental que identifica medidas y propone los estudios necesarios para definir medidas de mitigación contra el CC y la captura de carbono es una de estas (Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2007).

A partir del protocolo de Kyoto, se establecieron compromisos vinculantes de reducción de las emisiones de los GEI por parte de los países industrializados, empleando el mecanismo de flexibilidad existente; siendo uno de ellos el proyecto llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que a través de los cuales se podrían incentivar las plantaciones agroforestales y forestales con fines de captura de carbono (CONAM, 2001), estas a su vez pueden beneficiarse ambientalmente mediante el secuestro de carbono, disminuyendo la presión de los bosques naturales, regulando el clima; mejorando la calidad de agua, el paisaje y la biodiversidad. También previniendo desastres naturales, realizando funciones de refugio de especies animales, generando socialmente empleos y produciendo bienes, entre otros (Concha, Alegre, & Pocomucha, 2007).

Desde 1994, México se convirtió en un miembro de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) así como del Tratado de Libre

comercio de América del Norte (TLCAN) por lo que ha sido sujeto de presiones para poner un límite a sus emisiones futuras de GEI o el incremento de las mismas (Martin, Gower, Plaut, & Holmes, 2005).

El 30 de mayo de 2001, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el Decreto del plan Nacional de Desarrollo 2001-2006, en el cual se establece que el medio ambiente es prioritario para el Gobierno Federal. Sin embargo, existe una gran interrogante respecto a quién está dispuesto a pagar los servicios ambientales provenientes del bosque; la respuesta estará en función del tipo de beneficio que se quiera obtener (Grieg-Gran, Porras, & Wunder, 2005). Así mismo, el Programa Nacional Forestal 2001-2006 establece que en el ámbito nacional, existe un gran potencial para aprovechar el mercado de los servicios ambientales

Con el propósito de iniciar un mercado de servicios ambientales en México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) promueve un programa de pago por captura de carbono (PSA-CABSA) donde se estimula económicamente a los poseedores del bosque, motivando la conservación de sus recursos forestales. Los fondos destinados al financiamiento de este Programa provienen de un préstamo del Banco Mundial de 45 millones de dólares para México y una donación de 15 millones de dólares procedentes del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM).

En 1997, se estableció en México el Proyecto Piloto Internacional para la Captura de Carbono y Desarrollo Silvicultural Comunitario. Al iniciarse el desarrollo de éste se encontró que existe un potencial de secuestro de carbono de 17.6 a 176.3 Mg C ha⁻¹ cuando se manejan las áreas con sistemas agroforestales, tales como, cercos vivos, café con sombra, plantaciones, enriquecimiento de fajas al contorno con árboles (De Jong, Tipper, & Taylor, 1997).

En México, De Jong et al. (1999) estimaron el flujo del carbono en la región central de Chiapas, durante un periodo de 16 años. Los autores reportan el contenido de carbono en tipos de vegetación como: bosques mesófilos de montaña o nublados, bosques de encino, bosques de pino, bosques de pino - encino, bosques fragmentados, zonas de cultivo y pastizales.

En 1997 la Federation Internationale De L'Automobile (FIA) de la Fórmula Uno (corredores de autos) se interesó en comprar bonos de captura de carbono en Chiapas. Se inició la compra con 5500 ton C anuales, considerando el precio de la tonelada de carbono capturada a US\$ 10.

A finales del año 2006 Pronatura México A.C. diseño un programa institucional de cambio climático, que tiene por objeto reducir los impactos de este problema global en los ecosistemas prioritarios de este país.

Masera *et al.*, (2001) utilizo un modelo para estimar la captura de carbono del año 2000 a 2030 en el que se dividió el uso de suelo en el país en 21 clases, incluyendo bosques, selvas, zonas áridas y usos no forestales para luego construir dos escenarios: uno de referencia que considera un futuro en el que se mantienen las tasas de deforestación actuales por tipo de bosque como porcentaje del área forestal remanente; asimismo, los esfuerzos en conservación y en restauración continúan pero a ritmo limitado; y un escenario de políticas basado en considerar que la captura de carbono en el sector forestal de México debe ser un subproducto de las prioridades de desarrollo sustentable del país.

De esta manera, México podría tener la posibilidad de capturar aproximadamente 46 millones de Mg/año entre los años 2000 y 2030. Una buena parte de esta mitigación se debería a la disminución de la deforestación, el manejo ordenado de los bosques naturales, la restauración de las áreas degradadas y la conservación de los bosques ubicados en las áreas naturales protegidas (Martínez & Fernández, 2004).

Díaz y otros (2007) generaron dos ecuaciones para estimar la biomasa aérea y carbono en *Pinus patula* Schl. en el Ejido Mariano Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala, México. Seleccionaron 35 especímenes para determinar biomasa y carbono en su estrato aéreo (fuste, ramas y follaje), los cuales tenían un diámetro normal (DN) entre 6.7 y 64.1 cm. Para determinar el contenido de biomasa y carbono de cada uno de los componentes se tomaron 240 muestras del fuste, 70 de ramas y 74 de follaje. Las ecuaciones resultantes son:

$$B = 0.0357 * DN^{2.6916}$$

Donde:

B: biomasa total (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo una R^2 de 0.98

$$CC = 0.021 * DN^{2.6451}$$

Donde:

CC: contenido de carbono (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo un R^2 de 0.98

Acosta y otros (2002), generaron seis ecuaciones para la estimación de biomasa aérea en seis especies forestales del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino en tres microcuencas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca. En el estudio se determinó la biomasa del fuste, ramas y follaje de diez especímenes de *Alnus glabrata* Fernald., ocho de *Quercus peduncularis* Née., seis de *Rapanea myricoides* Schl., seis de *Clethra hartwegii* Britt., diez de *Liquidambar macrophylla* Oerst. y doce de *Inga sp.* Con diámetros entre 3.9 y 23.5, 3.4 y 22.6, 4.3 y 20.6, 3.5 y 18.8, 3.3 y 23.9, 8.4 y 25.0 cm respectivamente. Para determinar la biomasa aérea de cada uno de los componentes se obtuvieron siete rodajas de cada espécimen, una muestra de rama y follaje de cada sección de la copa. Las ecuaciones resultantes son:

Alnus glabrata Fernald. $Y=0.11765484(DN)^{2.23}$
Se obtuvo un R^2 de 0.97

Clethra hartwegii Britt. $Y=0.14956862(DN)^{2.15}$
Se obtuvo un R^2 de 0.99

Rapanea myricoides Schl. $Y=0.13669543(DN)^{2.26}$
Se obtuvo un R^2 de 0.99

Quercus peduncularis Née. $Y=0.10331218(DN)^{2.39}$
Se obtuvo un R^2 de 0.99

Liquidambar macrophylla Oerst. $Y=0.10860911(DN)^{2.45}$
Se obtuvo un R^2 de 0.99

Inga sp. $Y=0.17204486(DN)^{2.26}$
Se obtuvo un R^2 de 0.97

Donde:

Y: biomasa total (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Case y Hall (2008), generaron ecuaciones para la estimación de biomasa total en diez especies de árboles en 119 sitios distribuidos en la porción este-central canadiense. Los datos dasométricos y biomasa de los especímenes fueron tomados por el "Ecological Stratification Working Group 1995" como parte del "Energy From the Forest Research Project" del Servicio Forestal Canadiense en los años 80's. Para el estudio tomaron 415 especímenes de *Picea glauca* (Moench) Voss., 383 de *Picea mariana* (Mill.) BSP., 172 de *Pinus contorta* Dougl. var. *Latifolia* Engelm., 112 de *Pinus banksiana* Lamb., 112 de *Larix laricina* (Du Roi) K. Koch., 60 de *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt., 60 de *Abies balsamea* (L.) Mill., 266 de *Populus tremuloides* Michx., 101 de *Populus balsamifera* L. y 55 de

Betula papyrifera Marsh. Con diámetros entre 20 y 45.3, 3.4 y 38.9, 2.5 y 37.2, 2.4 y 54.3, 2.5 y 39.0, 1.8 y 39.0, 3.0 y 38.0, 2.1 y 44.3, 1.5 y 39.0, 2.1 y 36.5 cm. Las ecuaciones resultantes son:

<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss.	$Y=0.08509389(DN)^{2.366}$ Se obtuvo un R^2 de 0.94
<i>Picea mariana</i> (Mill.) BSP.	$Y=0.10269416(DN)^{2.371}$ Se obtuvo un R^2 de 0.93
<i>Pinus contorta</i> Dougl. var. <i>Latifolia</i> Engelm.	$Y=0.13252288(DN)^{2.274}$ Se obtuvo un R^2 de 0.94
<i>Pinus banksiana</i> Lamb.	$Y=0.10688519(DN)^{2.355}$ Se obtuvo un R^2 de 0.95
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch.	$Y=0.08517903(DN)^{2.446}$ Se obtuvo un R^2 de 0.97
<i>Abies lasiocarpa</i> (Hook.) Nutt.	$Y=0.13439124(DN)^{2.279}$ Se obtuvo un R^2 de 0.97
<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	$Y=0.09623136(DN)^{2.372}$ Se obtuvo un R^2 de 0.97
<i>Populus tremuloides</i> Michx.	$Y=0.06310218(DN)^{2.524}$ Se obtuvo un R^2 de 0.94
<i>Populus balsamifera</i> L.	$Y=0.11789039(DN)^{2.430}$ Se obtuvo un R^2 de 0.96
<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	$Y=0.11259027(DN)^{2.325}$ Se obtuvo un R^2 de 0.97

Donde:

Y: biomasa total (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Ares y otros (2002), obtuvieron 3 ecuaciones para la estimación de biomasa en follaje, tallo y peciolo de 18 especímenes de *Bactris gasipaes* en Guápiles, Costa Rica. Para la determinación de biomasa se midió el diámetro basal (DB). Las ecuaciones resultante son:

$$Y= 6.8414(DB)^{2.086}$$

Donde:

Y: biomasa del follaje (g)

DB: diámetro basal (cm)

Se obtuvo un R^2 de 0.79

$$Y = 2.7340(DB)^{2.1837}$$

Donde:

Y: biomasa del tallo (g)

DB: diámetro basal (cm)

Se obtuvo un R^2 de 0.89

$$Y = 2.7402(DB)^{1.9408}$$

Donde:

Y: biomasa del peciolo (g)

DB: diámetro basal (cm)

Se obtuvo un R^2 de 0.67

Alvares (2008), generó cuatro ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea de *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* en los municipios de Villa Tunari, Chimoré, Puerto Villarroel y Entre Ríos del departamento de Cochabamba, Bolivia. En el estudio se determinó la biomasa total de fuste, ramas y follaje de 26 especímenes de *Centrolobium tomentosum* con un diámetro normal entre 10.1 y 36.6 y 25 de *Schizolobium parahyba* con un diámetro normal entre 13.4 y 54.4. Para determinar la biomasa y el contenido de carbono se obtuvieron 5 muestras de madera de cada espécimen: tres de fuste y dos de ramas. También se obtuvieron tres muestras de follaje. Las ecuaciones resultantes son:

$$Y = 185.149 + 22.447(DN) + 1.012(DN)^2$$

Donde:

Y: biomasa total de *Centrolobium tomentosum* (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo un R^2 ajustado de 0.93

$$Y = 78.344 + 0.019(DN)^3$$

Donde:

Y: biomasa total de *Centrolobium tomentosum* (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo un R^2 ajustado de 0.93

$$Y = (4.59 + 0.014DN^2 + 0.234HT)^2$$

Donde:

Y: biomasa total de *Schizolobium parahyba* (kg)

DN: diámetro normal (cm)

HT: altura total (m)

Se obtuvo un R^2 ajustado de 0.98

$$Y = (7.692 + 0.015(DN)^2)^2$$

Donde:

Y: biomasa total de *Schizolobium parahyba* (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo un R^2 ajustado de 0.97

Martin y otros (2005), construyeron ecuaciones para la estimación de biomasa total en la parte aérea de 20 *Populus tremuloides* Michx., 18 *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., 18 *Pinus banksiana* Lamb. Y 6 *Populus balsamifera* L. con una edad de 30 años en Wabowden Manitoba, Canada. Para la determinación de la biomasa se tomo una rodaja cada 2 m y 5 muestras de ramas y follaje tomadas al azar. Las ecuaciones resultantes son:

<i>Populus tremuloides</i> Michx.	$Y = 0.28938422(DN)^{1.700}$ Se obtuvo una $R^2 = 0.723$
<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	$Y = 0.53419198(DN)^{1.743}$ Se obtuvo una $R^2 = 0.954$
<i>Pinus banksiana</i> Lamb.	$Y = 0.28083162(DN)^{2.089}$ Se obtuvo una $R^2 = 0.958$
<i>Populus balsamifera</i> L.	$Y = 0.19691168(DN)^{2.421}$ Se obtuvo una $R^2 = 0.884$

Donde:

Y: biomasa total (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Avendaño y otros (2009), generaron dos ecuaciones para determinar biomasa y carbono total en la parte aérea de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el predio "El Innominado" en San Felipe Hidalgo Nanacamilpa, Tlaxcala, México. En el estudio se determinó la biomasa del fuste, ramas y follaje de 26 árboles, los cuales tenían un diámetro normal (DN) entre 60.5 y 79 cm. Para determinar el porcentaje de carbono en cada uno de estos componentes se seleccionaron al azar 10 rodajas del fuste, 10 muestras de ramas y 6 muestras de follaje. Las ecuaciones resultantes son:

$$Y = 0.0713(DN)^{2.5104}$$

Donde:

Y: biomasa aérea total (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Se obtuvo una $R^2 = 0.9934$

$$Y = 0.0332(DN)^{2.5104}$$

Donde:

Y: Contenido total de Carbono (kg)

DN: Diámetro normal (cm)

Se obtuvo una $R^2 = 0.9934$

Objetivo.

Evaluar de forma cuantitativa el carbono secuestrado en la biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en un bosque de coníferas de San José del Rincón, Estado de México.

Objetivos particulares.

Generar dos modelos alométricos; uno para la estimación de la biomasa total y otro para la estimación de carbono total a partir del diámetro normal.

Generar dos modelos alométricos; uno para la estimación de la biomasa total y otro para la estimación de carbono total a partir del diámetro normal al cuadrado por la altura.

Generar dos modelos alométricos; uno para la estimación de la biomasa total y otro para la estimación de carbono total a partir del diámetro normal y la altura total.

Comparar estadísticamente los modelos generados tanto para biomasa como para carbono.

Hipótesis

Las variables diámetro normal y altura total del árbol, están ampliamente relacionadas con su biomasa y carbono, por lo que es posible estimar las segundas a partir de las primeras y con ello la cantidad de carbono secuestrado por árbol en un bosque de coníferas, a través del uso de modelos estadísticos.

Material y método.

Área de estudio

El estudio se realizó en un predio bajo aprovechamiento forestal ubicado en el Municipio de San José del Rincón, Estado de México el cual se encuentra ubicado en la parte Noroeste del Estado de México y colinda al Norte con el Estado de Michoacán y el municipio de El Oro; al Sur, con los municipios de Villa Victoria y Villa de Allende; al Este con el Municipio de San Felipe del Progreso y al Oeste con el Estado de Michoacán.

Los datos de campo se tomaron en el predio particular denominado La Sabaneta (Figura 5). Éste cuenta con una superficie de 163.26 hectáreas y está localizado en la sección noroeste del municipio.

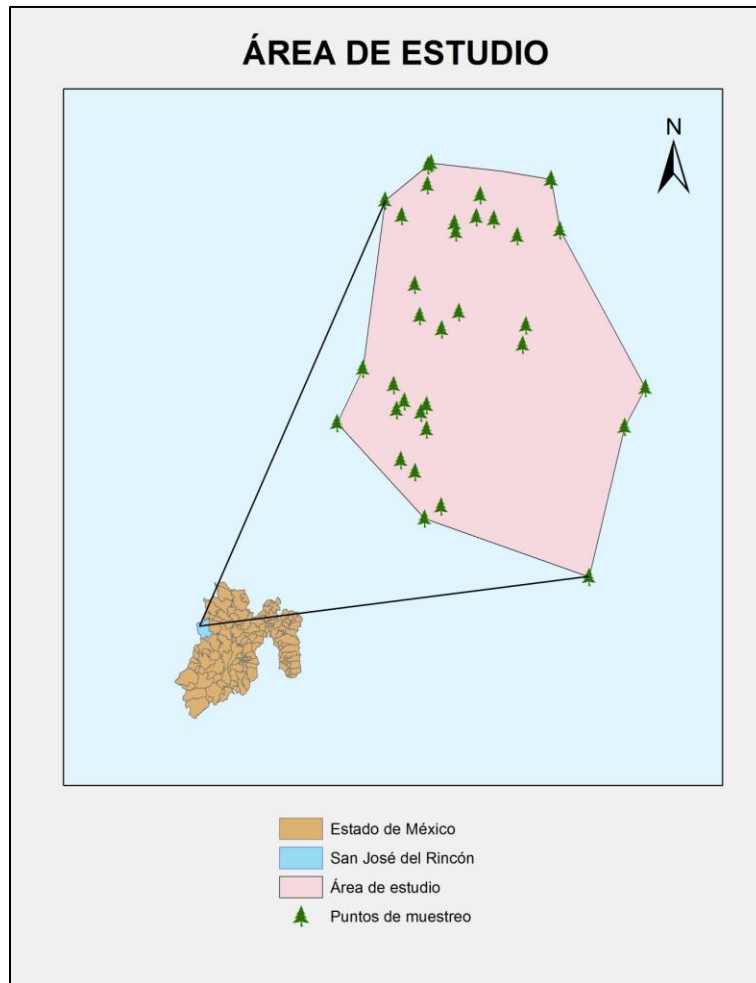


Figura 5. Ubicación del Área de Estudio.

Climas

En San José del Rincón predominan dos tipos de clima. El primero es el C(E)(w2)(w), que corresponde al semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad, la temperatura media anual oscila entre los 8° y 12°C y la precipitación total anual entre los 1,000 y 1,200 mm; este clima es característico de las Sierras Rancho Verde y El Campanario (30.35 %). El segundo es el C(w2)(w), subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad, el cual se caracteriza por una precipitación total anual mayor a los 700 mm y su temperatura media anual varía de 12° a 18°; es representativo del Oeste del área de estudio (69.65%) (Figura 6) (SEDUR, 2004).

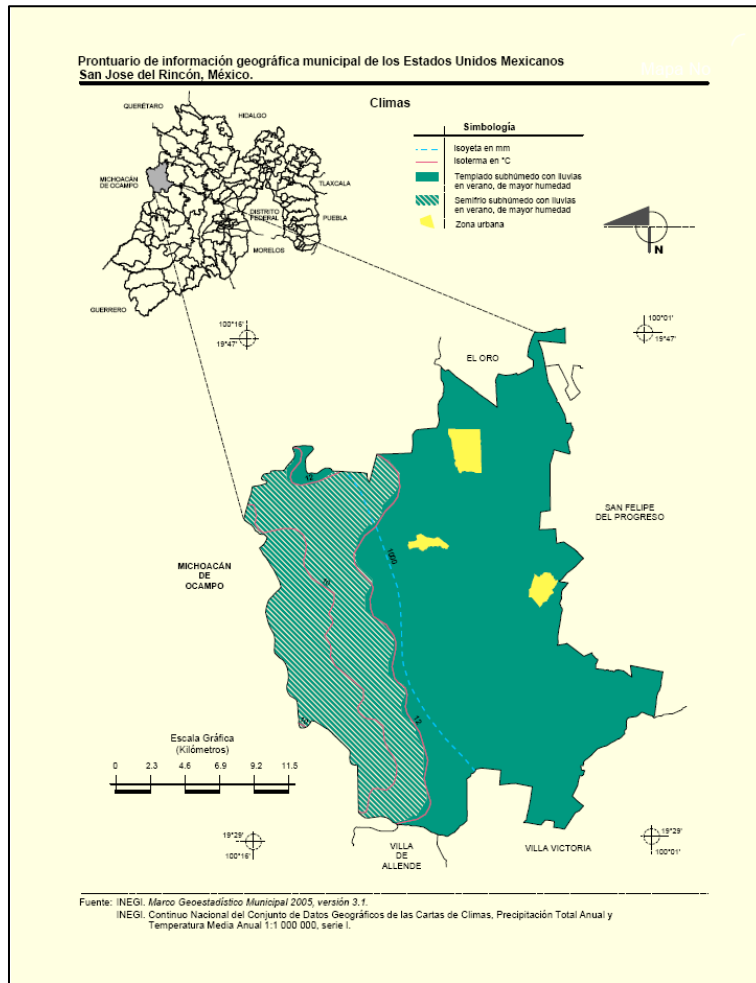


Figura 6. Climas del municipio de San José del Rincón.

Geomorfología y relieve

El conocimiento del marco geológico de la zona de estudio así como las alteraciones de los factores geológicos y geomorfológicos es fundamental para dar un marco de referencia del terreno donde se encuentra el área de estudio.

Características geomorfológicas

La superficie municipal está constituida principalmente por tres tipos de Topoformas; en la parte Oeste, en la cual se encuentran las comunidades San Jerónimo Pilitas, Palo Amarillo, Rosa de Palo Amarillo, San Felipe de Jesús, La Mesa, Los Lobos y Las Rosas, se tiene una sierra compleja con pendientes superiores al 25%. En la porción este, en localidades de San José del Rincón Centro, La Soledad, San Miguel Agua Bendita, Jaltepec, San Antonio Pueblo Nuevo y El Depósito Providencia, la topoforma predominante corresponde a valle de laderas tendidas (SEDUR, 2004).

El Municipio de San José del Rincón se ubica en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal. Está caracterizada como una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos que se iniciaron a mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) y que continúan hasta el presente.

El territorio municipal está dividido en dos partes, la oeste, que pertenece a la Subprovincia Mil Cumbres, y la Este, que se encuentra dentro de la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac; además, la Cordillera de las cumbres de Anganguero, cruza de Sur a Norte y tiene una extensión de 76 kilómetros y una altitud que supera en algunos puntos los 3,000 msnm.

En el municipio predominan sierras, lomas y valles. Los principales cerros en promedio alcanzan 3,000 msnm; al sur, sobresalen el cerro de las Cebollas (3,060 msnm) y el cerro Cabrero (3,260 msnm); al este se encuentra el cerro de Jaltepec (2,960 msnm); en el noroeste el cerro Silguero (3,160 msnm) y en el norte el cerro El Cedral (3,000 msnm) (SEDUR, 2004).

Hidrología

El municipio forma parte de dos Regiones Hidrológicas. Al norte pertenece a la Región Hidrológica 12 (RH12) Lerma–Santiago, a la cuenca Río Lerma–Toluca y a su vez a las subcuencas A. Gauchi y Río Jaltepec; los principales afluentes corren en dirección oeste–este, de las partes altas de la sierra hacia el Municipio de San Felipe del Progreso, así como el manantial del Sanacoche. Al sur pertenece a la Región Hidrológica 18 (RH18) Balsas, a la cuenca del Río Cutzamala y a las subcuencas Río Tilostóc y Río Tuxpan. Las principales corrientes son Chicoti, Purungueo, la Trinidad, El Cedro, Rechivati, la Trampa, las Rosas, Palo Seco, todos ellos desembocando al sureste del municipio en el llamado Arrollo Grande (SEDUR, 2004), (Figura 7).

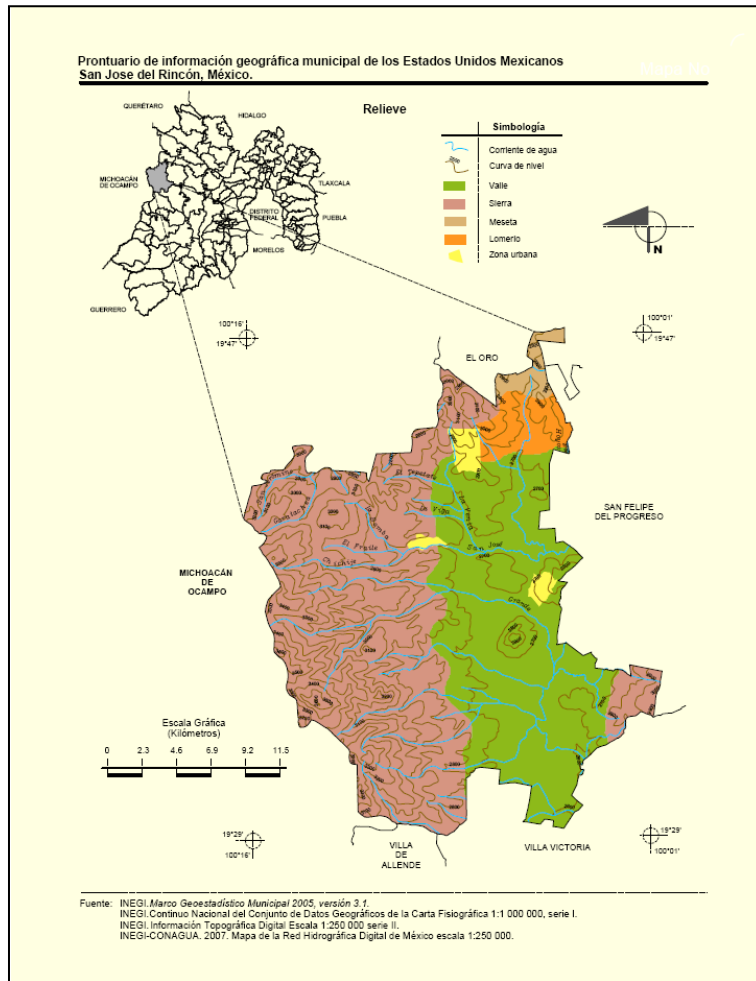


Figura 7. Relieve e Hidrología del Municipio de San José del Rincón.

Geología

La Era Geológica de formación del suelo municipal corresponde al Cenozoico, al periodo terciario superior y su tipo de roca o suelo es ígnea extrusiva como lo son el basalto, la andesita y la toba ácida. En el municipio se encuentran numerosas fracturas, principalmente en las zonas boscosas de las sierras Rancho Verde y El Campanario, así como dos fallas geológicas, ambas ubicadas al Norte del municipio, una que se encuentra en la parte suroeste de la comunidad de San Miguel del Centro y otra en las cercanías de San Jerónimo Pilitas y Guarda La Lagunita, además de existir cinco aparatos volcánicos, dos de los cuales se encuentran en las proximidades de dichas fallas (SEDUR, 2004), (Figura 8).

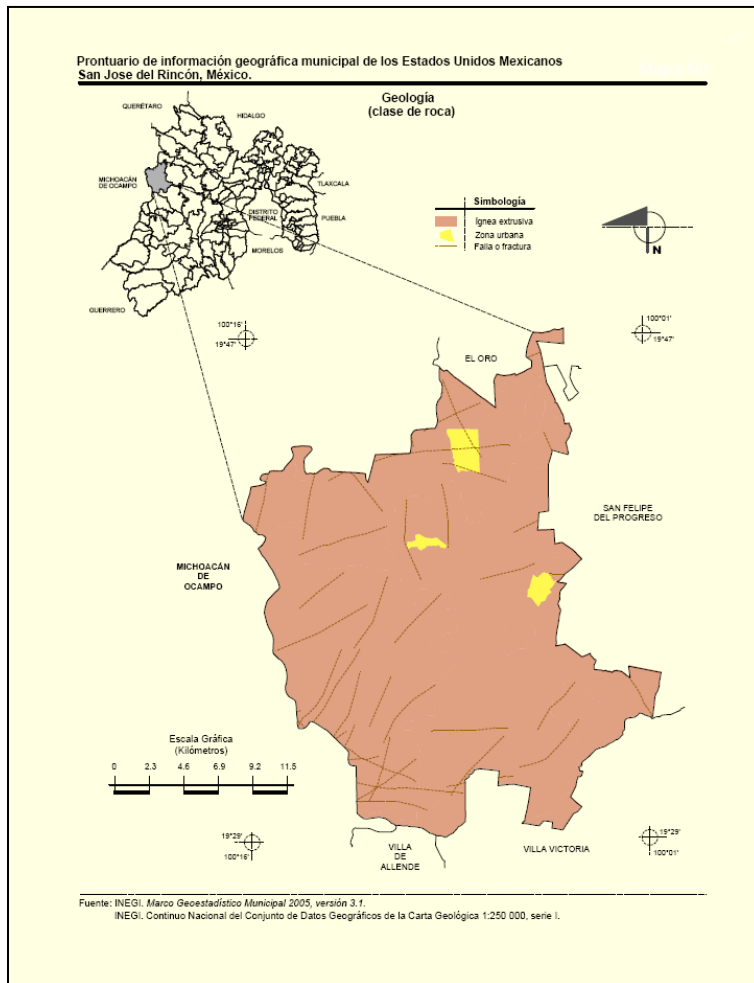


Figura 8. Geología del municipio de San José del Rincón.

Suelos

De acuerdo al sistema de clasificación del suelo de FAO/UNESCO/ versión 1988, en el Cuadro 1 se muestran los tipos de suelo presentes en el municipio siendo el andosol el tipo de suelo presente en el área de estudio (SEDUR, 2004), (Figura 9).

Cuadro 1. Tipos de Suelo Presentes en el Municipio de San José del Rincón.

Tipo de suelo	Porcentaje (%)
Andosol	94.28
Luvisol	0.81
Planosol	2.3
Umbrisol	0.68

Fuente: Plan municipal de desarrollo urbano San José del Rincón

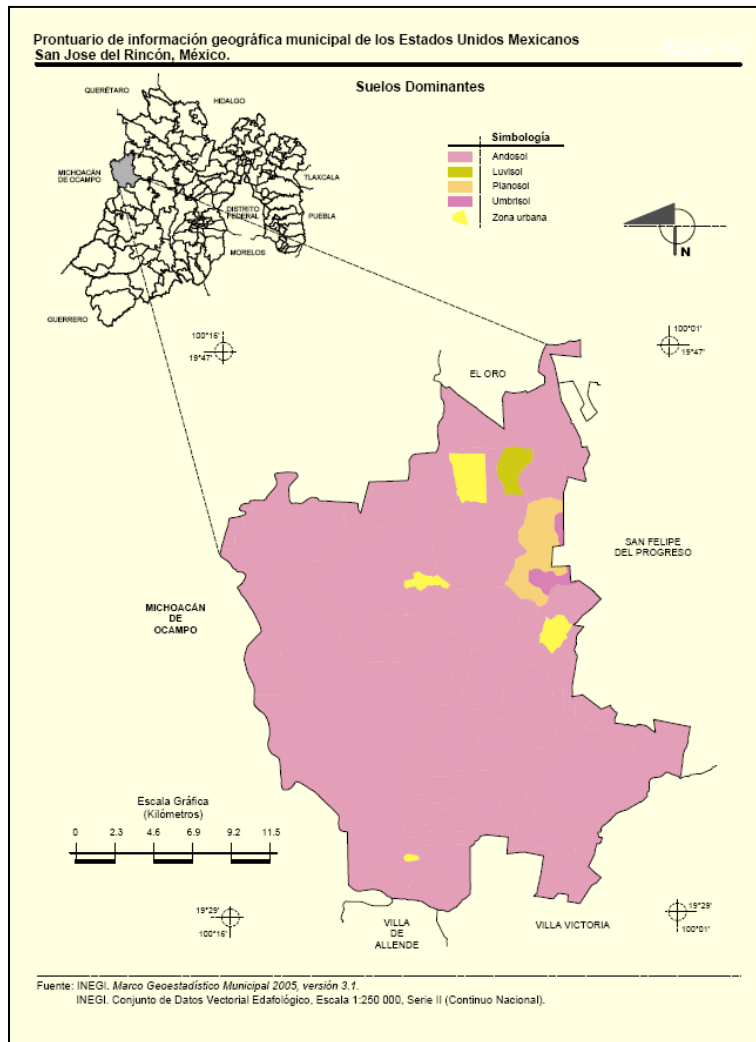


Figura 9. Tipos de Suelo Presentes en el Municipio de San José del Rincón.

Aprovechamiento actual del suelo

El suelo municipal es utilizado de cuatro formas diferentes. El forestal, que ocupa 15,200.00 ha y corresponde a la Sierra “El Campanario” al oeste del municipio; pastizales inducidos, con una superficie de 9,495.00 ha; agrícola de temporal con 24,715.99 has y urbano con 79.76 ha (SEDUR, 2004). El uso de suelo agrícola ocupa alrededor del 50% del municipio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Aprovechamiento actual del suelo en San José del Rincón.

USO	HECTAREAS	%
Forestal	15,200.00	30.71%
Pastizales Inducidos para actividades pecuarias	9,495.95	19.19%
Agrícola	24,715.99	49.94%
Urbano	79.76	0.16%
Total	49,491.70	100.00%
Fuente: Plan municipal de desarrollo urbano San José del Rincón		

Especie de estudio

La especie arbórea que compete a este estudio es el *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Árbol de 15 a 40m. Fuste recto, libre de ramas de 30 a 50% de su altura. Las ramas a menudo son horizontales, copa espesa; corteza áspera, grisácea (Figura 10). Cerca de la copa la corteza se hace suave y rojiza a café grisácea. Follaje verde oscuro, acículas en grupos de 5 raramente 4 a 6; de 16 a 35 cm de largo y 0.75 a 1.25cm de ancho extendidas o péndulos, con vainas persistentes de 15 a 25 mm de largo (Figura 11). De 2 a 4 canales resiníferos, usualmente medios.



Figura 10. Aspecto de la corteza de *Pinus pseudostrobus*.



Figura 11. Aspecto del follaje de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

La madera es de color amarillo claro, grano recto, textura fina. Su peso específico varía de 0.44 a 0.48 g/cm³ moderadamente liviana, suave y poco resinosa. Es utilizada en construcción, ventanas flexibles, muebles, ebanistería, artesanías, pulpa para papel.



Figura 12. Madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Distribución y hábitat

Se distribuye escasamente en el norte de México (de Sinaloa a Jalisco), pero es común en la planicie central y en Chiapas. Su rango altitudinal varía de 2400 a

2800 msnm, con precipitaciones anuales de 800 a 2800 mm, temperaturas de 18 a 21°C. Crece en suelos profundos derivados de material volcánico, ácidos a moderadamente ácidos (pH de 5.5 a 6.5); no crece en suelos con problemas de drenaje.

Floración y fructificación

Frutos: Conos de ovoides a cilíndricos color café claro, de 10 a 15 cm de largo y 6 a 8 cm de ancho, planos. Los conos se agrupan de dos a tres al final de las ramas (Figura 13).

Semillas: pequeñas de 6mm de largo, café oscuras, con un ala articulada de 20 a 23mm de largo. La semilla contiene de seis a nueve cotiledones.



Figura 13. Cono de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Metodología de campo

Dado que la cuantificación directa del carbono y biomasa de todo el árbol demandaría de un proceso costoso y tardado; usualmente se recurre a la cubicación de la parte maderable y al pesado en seco de muestras de estructuras lignificadas o leñosas. El peso verde total del follaje y el peso seco de algunas porciones del mismo son datos necesarios para la determinación de la biomasa foliar. Así, el conocimiento indirecto del carbono considera sólo un muestreo de los diferentes componentes del árbol.

Con base en lo anterior, la metodología empleada para determinar el contenido de carbono en árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la siguiente:

Los árboles utilizados para la realización de este estudio se tomaron del predio bajo aprovechamiento forestal autorizado denominado la Sabaneta; esto obedece a que el método utilizado requiere del derribo y seccionado de los ejemplares.

Cuadro 3. Categorías diamétricas.

Categoría Diamétrica	Intervalo
10	7.5 - 12.5
15	12.6 - 17.5
20	17.6 - 22.5
25	22.6 - 27.5
30	27.6 - 32.5
35	32.6 - 37.5
40	37.6 - 42.5
45	42.6 - 47.5
50	47.6 - 52.5
55	52.6 - 57.5
60	57.6 - 62.5
65	62.6 - 67.5
70	67.6 - 72.5
75	72.6 - 77.5
80	77.6 - 82.5
85	82.6 - 87.5
90	87.6 - 92.5
95	92.6 - 97.5

La integración de la muestra representativa de la población arbórea de *Pinus pseudostrobus* Lindl. consideró la distribución diamétrica de los árboles, misma que contempla 18 categorías diamétricas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Se seleccionaron 40 árboles de diferentes tamaños tanto en diámetro normal como en altura total.

De los 40 árboles evaluados, 31 se utilizaron para generar los modelos de biomasa y carbono, y nueve sirvieron para validar estadísticamente las ecuaciones resultantes

Medición del fuste

Previo al derribo del árbol, se midió el diámetro normal (cm) con una cinta diamétrica y la altura total (m) con una pistola Haga; asimismo, se georefirió con un GPS GARMIN GPSmap 60CSx. Posteriormente el árbol se derribó y se desramó. El fuste se seccionó en trozas de tamaño comercial (2.54 m). Se registró el diámetro de los extremos (cm) y la longitud (m) de cada una de las trozas resultantes con una cinta métrica de 50 m Truper de fibra de vidrio.

De la parte inferior de cada troza se obtuvo de manera sistemática (troza1, troza4, troza7...) una rodaja de 5 cm de espesor (Figura 14). Ésta fue rotulada y pesada (kg) con una báscula colgante tipo reloj (capacidad 200 kg) y se registró el diámetro (cm).



Figura 14. Extracción de las rodajas del fuste principal.

Medición de las ramas

En este caso, el volumen se obtuvo mediante la metodología de cubicación de madera apilada. Ésta consiste en colocar las piezas de madera en pilas o montones de manera tal que se formen paralelepípedos (Figura 15). El volumen de cada cuerpo geométrico así generado se determinó mediante el producto de sus tres lados. El volumen del paralelepípedo se multiplicó por el Coeficiente de Apilamiento (CA) (Romahn, Ramirez, & Treviño, 1994).

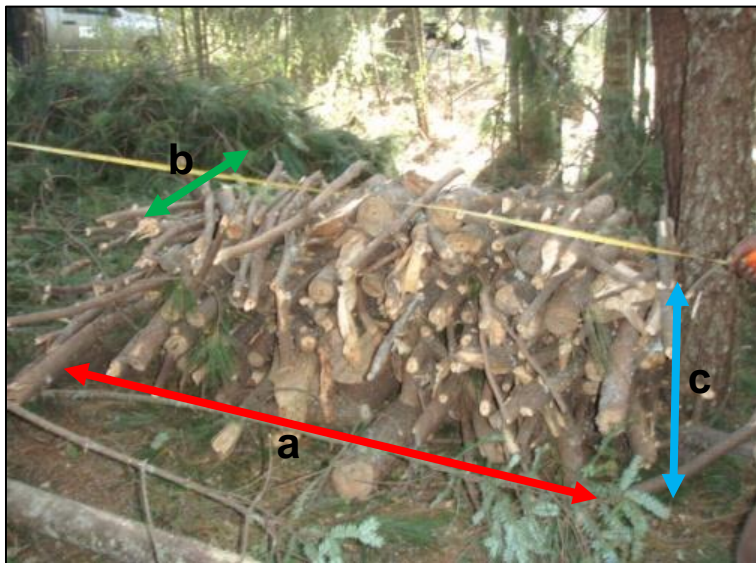


Figura 15. Obtención del volumen del paralelepípedo.

El CA se determinó mediante el método denominado regla de Shellman (Romahn, Ramirez, & Treviño, 1994). En esta técnica se utiliza una regla de 1 metro dividida en 100 partes iguales. La regla se superpone en p puntos de muestreo de la pila y en cada uno de ellos se cuenta el número de divisiones de la regla de Shellman que caen en hueco (n_i) (Figura 16). El estimador del Ca promedio se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$Ca = \frac{\sum Ca_i}{p} = \frac{\sum \frac{100 - n_i}{100}}{p}$$

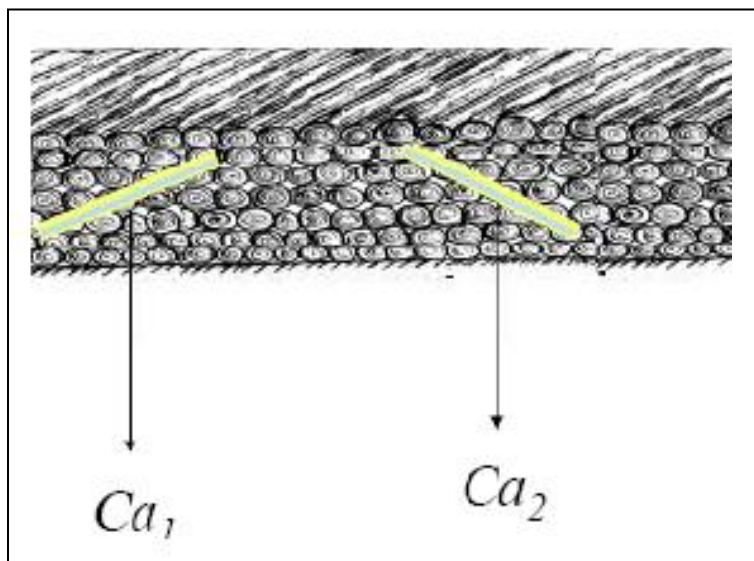


Figura 16. Muestreo: regla de Shellman.

Adicionalmente, se colectaron cinco ejemplares de ramas (50 cm). Cada uno fue rotulado cubicado y pesado en verde (kg) con una bascula colgante tipo reloj de 25 kg marca Esnova (Figura 17)



Figura 17. Pesado de secciones de ramas.

Pesado del follaje

El follaje del árbol se colectó en una lona (Figura 18) y se pesó en una báscula tipo reloj con capacidad de 200 kg. La báscula fue sujeta a una cuerda, que pasaba por un sistema de poleas colocado entre dos árboles, la cual se ató al “Winch” de una camioneta Pick-Up RAM-1500 (Figura 18 y Figura 19). El procedimiento se repitió en varias ocasiones hasta evaluar todas las hojas y ramillas del árbol.



Figura 18. Colecta de la totalidad del follaje.

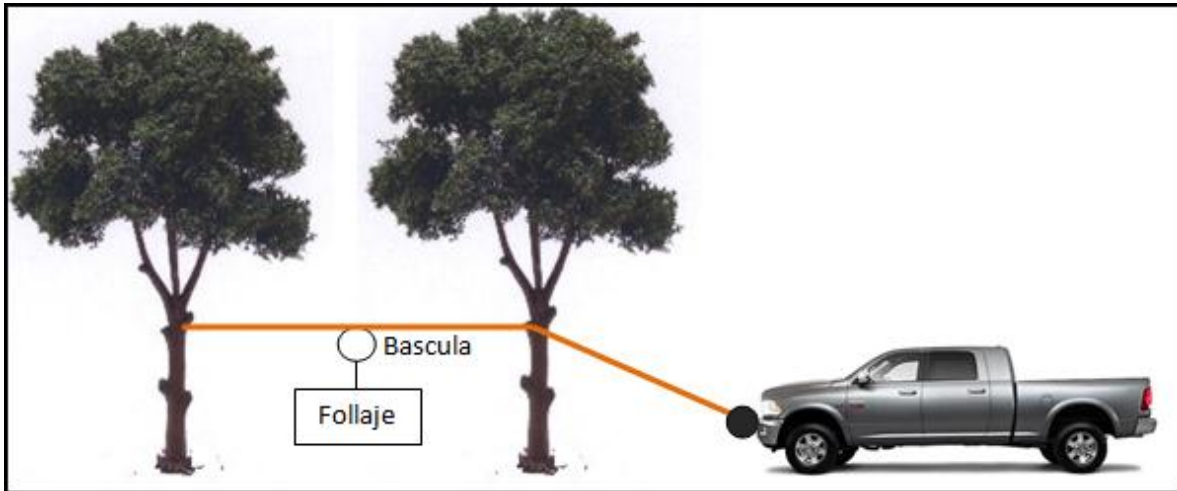


Figura 19. Uso del Sistema Winch Para el pesado del follaje.

Se tomaron cinco porciones del follaje distribuidas a lo largo de la copa del árbol. Cada porción se empaquetó en una hoja de papel estraza y se rotuló y registró su peso verde con una balanza colgante tipo reloj de 25 kg marca Esnova.

Secado de muestras en el invernadero y laboratorio del CENID-COMEF-INIFAP

Todas las rodajas y las muestras de ramas se colocaron en el invernadero del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) del INIFAP (Figura 20) durante un lapso de dos meses a fin de que lograran su peso seco parcial¹.

¹ Se le denomina peso seco parcial debido a que las muestras conservan cierto porcentaje de humedad.



Figura 20. Secado parcial de las muestras en el invernadero.

Una vez que las rodajas y las muestras de las ramas alcanzaron su peso seco parcial; de cada una de ellas se obtuvo una submuestra (Figura 21), con el fin de determinar el peso seco final de tales estructuras leñosas.

Las sub-muestras de las rodajas y de las ramas (Figura 22) incluyeron corteza, duramen e inclusive albura y se obtuvieron con una Sierra Sable Bosch modelo RS5. A cada submuestra se le registró el peso inicial (peso seco parcial) con una balanza digital Ohaus Serie YS con capacidad de 2000 g.



Figura 21. Toma de las sub-muestras de las rodajas.

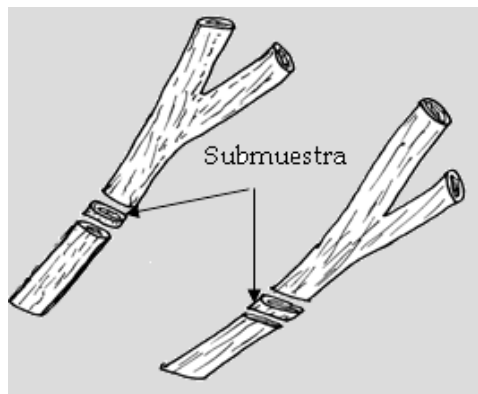


Figura 22. Toma de las sub-muestras de los brazuelos.

Las submuestras de las rodajas y de las ramas se colocaron en una estufa de secado a 65°C por dos semanas. En este tiempo, lograron su peso seco constante, es decir, el peso seco final (Figura 23).



Figura 23. Secado de muestras.

Las muestras del follaje permanecieron en la secadora del Herbario Nacional Forestal del CENID-COMEF-INIFAP durante dos meses. En este tiempo las acículas y ramillas lograron un peso seco final constante.

Las sub-muestras de rodajas, ramas y las muestras de follaje se llevaron al Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados; y mediante un analizador de carbono (TOC) se cuantificó su contenido de carbono.

Trabajo de gabinete

A través de la relación peso seco final de la sub-muestra/peso seco parcial de la sub-muestra se determinó el peso seco final de la rodaja o del brazuelo.

Biomasa del fuste

La biomasa del fuste se obtuvo sumando la biomasa de las trozas.

$$BFU = \sum_{i=1}^t BIT_i = \sum_{i=1}^t \left(VWT_i * \frac{PSR_i}{VVR_i} \right) = \sum_{i=1}^t \frac{L_i (S_{0i} + S_{1i})}{2} * \frac{PSR_i}{VVR_i}$$

Donde:

BFU = Biomasa del fuste (kg)

BIT_i = Biomasa de la troza i (kg)

VVT_i = Volumen en verde de la troza i (m^3).

PSR_i = Peso seco final de la rodaja de la troza i (kg).

VVR_i = Volumen en verde de la rodaja de la troza i (m^3).

L_i = Longitud de la troza i (m).

$S_{0i} = \frac{\pi * D_{0i}^2}{4} = \text{Area de la sección mayor de la troza i (m}^2\text{)}.$

D_{0i} = Diámetro de la sección mayor de la troza i (m).

$S_{1i} = \frac{\pi * D_{1i}^2}{4} = \text{Area de la sección menor de la troza i (m}^2\text{)}.$

D_{1i} = Diámetro de la sección menor de la troza i (m).

El volumen de la i-ésima troza se obtuvo mediante la fórmula de (Romahn, Ramirez, & Treviño, 1994).

La biomasa de las trozas sin rodaja se obtuvo mediante el producto del volumen verde de la troza por el promedio de la razón PSR_i/VVR_i de las rodajas cercanas.

Biomasa de las ramas y del follaje

La biomasa de las ramas se obtuvo mediante el producto volumen verde de la pila por el promedio del cociente peso seco final de la muestra de leña/volumen verde de las muestras de leña.

La biomasa total del follaje del árbol se determinó mediante la multiplicación peso fresco del follaje del árbol por el promedio del cociente peso seco final de la muestra/peso fresco de las muestras.

La biomasa aérea total del árbol se obtuvo de la suma de la biomasa del fuste, ramas y hojas. El contenido de carbono de las trozas se determinó multiplicando

su valor de biomasa (kg) por la proporción de carbono que tuvo la submuestra; de manera similar se procedió para las ramas y el follaje.

La biomasa total del follaje del árbol se estimó con la multiplicación de la relación peso seco/peso fresco de las muestras por el peso fresco de todo el follaje fresco del árbol pesado en campo.

La biomasa aérea total se obtuvo de la suma de todos los componentes aéreos del árbol (fuste, ramas y hojas).

Modelos de biomasa y carbono

Se evaluaron modelos de regresión no lineal. La biomasa y el carbono se consideraron como las variables dependientes y el diámetro normal y la altura total, en diferentes modalidades, como las independientes. Se evaluaron tres tipos de modelos de uso común en el ámbito forestal (Velasco, 2007; Köhl *et al.*, 2010). En el primero se consideró como variable independiente sólo el diámetro normal (m), en el segundo el producto del diámetro normal al cuadrado (m²) por la altura total (m) y en el tercero, el diámetro normal (m) y la altura total (cm). Los parámetros de estos modelos se obtuvieron mediante el PROC REG de SAS, previo a la linearización logarítmica (Cuadro 4). En los tres casos, el término de error en el modelo linearizado es aditivo.

Cuadro 4. Modelos no lineales y linearizados evaluados en el estudio.

Modelo no lineal	Modelo linearizado
$y = \beta_0 (DN)^{\beta_1}$	$\ln(y) = \ln(b_0) + b_1 \ln(DN) + e$
$y = \beta_0 (DN^2 H)^{\beta_1}$	$\ln(y) = \ln(b_0) + b_1 \ln(DN^2 H) + e$
$y = \beta_0 DN^{\beta_1} H^{\beta_2}$	$\ln(y) = \ln(b_0) + b_1 \ln(DN) + b_2 \ln(H) + e$

Los parámetros estimados de los modelos linearizados, transformados mediante la función exponencial, se emplearon en el PROC NLIN de SAS como valores de inicio para obtener los parámetros de los modelos no lineales (Martínez y Martínez, 2002), por lo que en éstos el término de error se consideró aditivo (Sit, 1994), es decir:

$$y = \beta_0 (DN)^{\beta_1} + \varepsilon$$

$$y = \beta_0(DN^2 H)^{\beta_1} + \varepsilon$$

$$y = \beta_0 DN^{\beta_1} H^{\beta_2} + \varepsilon$$

Además de la estimación de los coeficientes de regresión y la prueba de las hipótesis correspondientes, se obtuvo el estadístico de Durbin-Watson, el estadístico Shapiro-Wilk y se graficaron los residuales en contra del valor predicho de la biomasa o carbono del árbol, con el propósito de garantizar, respectivamente, el cumplimiento de los siguientes supuestos: Los errores no están correlacionados, los errores tienen distribución normal y el término de error tiene varianza constante.

Para determinar el modelo que mejor se ajustó a los datos, además de verificar el cumplimiento de los supuestos básicos del modelo de regresión, se consideraron los siguientes criterios: a). Pseudo R^2 (cercano a 1), b). Cuadrado Medio del Error (bajo) y c). Coeficientes de regresión significativos (valor de $p < 0.05$).

Resultados y discusión

Las variables dasométricas obtenidas en campo como son el diámetro y la altura se muestran a continuación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros obtenidos en campo

No. árbol	Diámetro normal (cm)	Altura (m)	No. árbol	Diámetro normal (cm)	Altura (m)
1	94.2	35	21	8.5	19.3
2	74.5	41	22	85.5	43
3	65	38.5	23	35.5	18
4	91.3	38	24	49.5	23
5	74.5	44	25	97	44
6	55.5	20.8	26	77.7	43.6
7	46.8	25	27	84.8	42.3
8	51.9	25.3	28	81.7	41
9	65.4	35.5	29	68	41.2
10	56.5	28	30	61.5	39.2
11	76	40	31	62.5	42.3
12	53	22.4	32	38.5	30
13	14.5	15	33	39.7	27
14	71.5	32	34	9	9.4

No. árbol	Diámetro normal (cm)	Altura (m)	No. árbol	Diámetro normal (cm)	Altura (m)
15	20	27.1	35	35.7	25.5
16	13.8	13.95	36	32	20.5
17	45	13	37	30	27.5
18	47.5	25.6	38	20	22.5
19	20	19	39	25.5	19
20	51	19	40	20.1	20.1

El diámetro normal de los arboles muestreados osciló de 8.5 a 94 cm, su altura de 15 a 43.6 m y su biomasa total de 57.59 a 5527 kg. El Cuadro 6 muestra que el volumen promedio del fuste fue de 84.53% mientras que el de la leña solo alcanzo el 15.47% del total de la biomasa aérea. El peso seco del fuste representó el 72.76% del total mientras que el follaje y la leña el 5.55 y 21.69% respectivamente.

Cuadro 6. Estadísticos básicos de las variables estudiadas.

Variable	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Diámetro normal (m)	31	0.51083	0.22948	0.08500	0.94200
Altura (m)	31	29.05484	8.77173	15.00000	43.60000
Volumen del fuste (m ³)	31	3.46518	3.16401	0.05610	10.24876
Peso seco del fuste(kg)	31	1537.00	1471.00	26.55960	4516.00
Peso fresco follaje (kg)	31	171.01613	125.08400	3.50000	550.00000
Peso seco follaje (kg)	31	82.02387	60.31032	1.79000	242.07000
Volumen de la leña (m ³)	31	0.69072	0.63872	0.00	2.49572
Peso seco de la leña (kg)	31	372.19709	361.59185	2.44501	1277.00
Volumen total(m ³)	31	4.15590	3.72052	0.12471	11.90476
Biomasa total	31	1991.00	1817.00	57.59918	5,527.00

En el Cuadro 7 se señalan las correlaciones entre las variables dasométricas y la biomasa total del árbol. Se observa una correlación de casi 1.00 entre la biomasa total y el peso seco del fuste. La correlación entre el volumen del fuste y la biomasa total es del 0.97; que indica que tan solo con la cubicación del fuste se podría predecir la biomasa del árbol. No obstante que la determinación del volumen del fuste es un proceso costoso y tardado. La correlación entre el diámetro normal y la altura total con la biomasa total es 0.90 y 0.86, respectivamente. Por lo que estas variables, se consideran buenas predictoras de la biomasa total del árbol. Se observa una correlación bastante alta entre la biomasa total y el volumen total del árbol, lo que significa que árboles grandes presentan valores altos de biomasa. En todos los casos, las correlaciones resultaron altamente significativas ($p < 0.05$), además de ser iguales o superiores

0.7, valor que es considerado alto en variables dasométricas (Reimann, Filzmoser, Garret, & Dutter, 2008).

Cuadro 7 Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables estudiadas.

Coeficientes de correlación de Pearson, N=38										
Prob> r suponiendo H0: Rho=0										
	Diámetro Normal	Altura	Volumen del fuste	Peso seco del fuste	Peso fresco follaje	Peso seco follaje	Volumen de la leña	Peso de la leña	Volumen total	Biomasa total
Diámetro Normal	1.00	0.87300 <.0001	0.91329 <.0001	0.90728 <.0001	0.90682 <.0001	0.90643 <.0001	0.86333 <.0001	.79361 <.0001	0.92277 <.0001	0.91671 <.0001
Altura	0.87300 <.0001	1.00	0.88479 <.0001	0.89549 <.0001	0.75695 <.0001	0.76773 <.0001	0.75893 <.0001	0.71559 <.0001	0.88261 <.0001	0.88801 <.0001
Volumen del fuste	0.91329 <.0001	0.88479 <.0001	1.00	0.98249 <.0001	0.83358 <.0001	0.84325 <.0001	0.85474 <.0001	0.79225 <.0001	0.99710 <.0001	0.97565 <.0001
Peso seco del fuste	0.90728 <.0001	0.89549 <.0001	0.98249 <.0001	1.00	0.83656 <.0001	0.84539 <.0001	0.86121 <.0001	0.80922 <.0001	0.98279 <.0001	0.99315 <.0001
Peso fresco follaje	0.90682 <.0001	0.75695 <.0001	0.83358 <.0001	0.83656 <.0001	1.00	0.99460 <.0001	0.88125 <.0001	0.78157 <.0001	0.85591 <.0001	0.85973 <.0001
Peso seco follaje	0.90643 <.0001	0.76773 <.0001	0.84325 <.0001	0.84539 <.0001	0.99460 <.0001	1.00	0.88245 <.0001	0.79157 <.0001	0.86451 <.0001	0.86896 <.0001
Volumen de la leña	0.86333 <.0001	0.75893 <.0001	0.85474 <.0001	0.86121 <.0001	0.88125 <.0001	0.88245 <.0001	1.00	0.93671 <.0001	0.89178 <.0001	0.90514 <.0001
Peso de la leña	0.79361 <.0001	0.71559 <.0001	0.79225 <.0001	0.80922 <.0001	0.78157 <.0001	0.79157 <.0001	0.93671 <.0001	1.00	0.82802 <.0001	0.87166 <.0001
Volumen total	0.92277 <.0001	0.88261 <.0001	0.99710 <.0001	0.98279 <.0001	0.85591 <.0001	0.86451 <.0001	0.89178 <.0001	0.82802 <.0001	1.00	0.98326 <.0001
Biomasa total	0.91671 <.0001	0.88801 <.0001	0.97565 <.0001	0.99315 <.0001	0.85973 <.0001	0.86896 <.0001	0.90514 <.0001	0.87166 <.0001	0.98326 <.0001	1.00

El presente estudio constituye el primer grupo de funciones predictoras de carbono y biomasa para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el Estado de México.

La aplicación de modelos no lineales (Pinheiro & Bates, 2000) ha sido utilizado ampliamente en estudios forestales tales como el calculo del diámetro normal (Lindstrom & Bates, 1990), altura total (Fang & Bailey, 2001; Hall & Bailey, Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models , 2001; Calama & Montero, 2004; Calegario, Daniels, Maestri, & Neiva, 2005), volumen con y sin corteza (Gregoire & Schabenberger, 1996; Zhao, Wilson, & Borders, 2005), rendimiento comercial y biomasa (Wirth, Schumacher, & Schulze, 2004)

Modelos para biomasa

Los tres modelos analizados cumplen con el supuesto de normalidad, puesto que en todos los casos, el valor de p correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilks es mayor a 0.05, de manera particular, se observa un valor alto de p en el modelo que considera en forma separada el diámetro normal y la altura total . Si bien es cierto que los tres modelos presentan una dispersión de residuales en forma de embudo, en los modelos que consideran el diámetro normal y la altura total la amplitud del embudo (medida como la desviación típica de los residuales) es casi un 30% menor en comparación con el modelo que considera sólo el diámetro normal además de explicar solamente el 86% de la variabilidad. Ayala *et al.* (2001) obtuvieron dos ecuaciones para la estimar peso seco total, la primera para *Pinus ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. Pseudostrobus*, *P. Oaxacaca* utilizando el diámetro normal como variable independiente, la segunda para *Quercus crassifolia*, *Q. Chrysophylla*, *Q. laurina* y *Q. Rugosa*, utilizando el DN^2H como variable regresora; obteniendo coeficientes de determinación altos, de 0.97 y 0.95 respectivamente. Sin embargo, en algunos casos los resultados son menos satisfactorios; Geron y Ruark (1988) calcularon una R^2 de 0.62 cuando se utilizo el DN como variable predictora de la biomasa en *Pinus radiata* Diversos estudios concluyen que el diámetro es una buena variable predictora además de reducir los costos del muestreo (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997; Grier & Waring, 1974; Geron & Ruark, 1988) sin embargo se corre el riesgo de sobreestimar la biomasa de los arboles mas grandes (West, Brown, & Enquist, 1999). Por lo que el uso de 2 o mas variables predictoras es deseable tal como lo reportan Moret y Ruiz (1998) quienes coinciden en seleccionar como los mejores modelos para estimar la biomasa, a la combinación de dos variables independientes (en este caso el diámetro normal y la altura) (Schmitt & Grigal, 1981; Ker, 1984; Ker, 1984; Harding & Grigal, 1985).

Los valores de p correspondientes a la prueba de F indican que de manera global en los tres modelos al menos uno de los parámetros es distinto de cero (Cuadro 8), sin embargo, las pruebas de hipótesis para los parámetros individuales señalan que β_0 para el tercer modelo puede ser igual a cero, ya que el valor de p de la prueba de t es mayor a 0.05 (Cuadro 9). El intervalo de confianza al 95% confirma este hecho (Cuadro 9).

Los modelos que incluyen como variables independientes al diámetro normal y la altura total presentan un cuadrado medio del error menor de casi el 50% en relación al modelo que considera únicamente el diámetro normal. Los modelos que consideran la altura total y el diámetro normal tienen una Pseudo R^2 mayor respecto al que toma en cuenta sólo el diámetro normal; este incremento es de casi un 7% (Cuadro 8). Sin embargo, el modelo que considera separadamente al diámetro normal y la altura total presenta la dificultad que el parámetro β_0 puede ser igual a cero (Cuadro 9),

La selección de la función mas apropiada debe ser la que prediga mejor la variable, si bien las funciones predictoras de biomasa pueden utilizar un gran numero de variables independientes siempre es deseable ocupar el mínimo posible de ellas para de esta manera reducir la variabilidad de las predicciones (Wirth, Schumacher, & Schulze, 2004). El modelo que estima la biomasa en función del producto diámetro normal al cuadrado por la altura es el que mejor se ajusta al conjunto de datos estudiado. Chave, y otros (2005) utilizaron modelos que utilizan el diámetro como única variable y combinado con la altura de la forma D^2H en distintos tipos de bosque (húmedo y templado) en America, Asia y Oceanía encontrando que el segundo reduce el cuadrado medio del error en un 40% a diferencia del modelo que utiliza solo el diámetro además de que puede ser usado para distintos sitios de muestreo. De igual manera Baker y otros (1998) generó dos modelos para la estimación de biomasa en *Pinus radiata* en Nueva Zelanda, usando el DN y el DN^2H como variables predictoras encontrando que el uso del diámetro y la altura como variable combinada redujo el cuadrado medio del error en un 66% ambos explicando el 98% de la variación

Aun cuando la dispersión de los residuales, correspondiente al modelo elegido, presenta un patrón no tan deseable desde punto de vista estadístico (Figura 24), la prueba de normalidad es superada, puesto que en general los residuales se ajustan a una campana de Gauss (Figura 25) y se desvían ligeramente de una recta que pasa por el origen y que tiene pendiente 1 (Figura 26).

La Figura 27 muestra la validación y desempeño del modelo seleccionado utilizando la validación cruzada (Davidson & Hinkley, 1997) de los 9 ejemplares

separados anteriormente observando que predice bastante bien la biomasa como una función del diámetro al cuadrado por la altura con un valor de p correspondiente a la prueba de t apareada

Cabe destacar, que la biomasa acumulada en el fuste y otros componentes del árbol depende en su mayoría de las características de cada especie, la edad y el manejo dado al sitio. Sucesos tales como las podas y los raleos, afectan la distribución de biomasa de los componentes (Alvarez, 2008). Por esta razón las ecuaciones obtenidas en este trabajo pueden aplicarse solo a la especie y sitio en cuestión.

Desde el punto de vista estadístico los modelos generados sólo son aplicables a *Pinus pseudostrobus* Lindl. , varias especies del mismo género presentan un patrón de crecimiento similar por lo que cada modelo podría ajustarse a un mayor número de especies. Sin embargo si se desea extrapolar los modelos obtenidos en este estudio a otras especies será necesario tomar en consideración el nivel de error de la estimación tanto para biomasa como para carbono.

Cuadro 8. Estadísticos de bondad de ajuste y de normalidad de los modelos evaluados para biomasa.

Modelos	CME	Fcal	Prob F	Pseudo R ²	DR	W	Prob W
$\hat{B} = 7,027.00(DN)^{2.1914}$	444,380.00	235.16	<.0001	0.869852	Embudo (DT=654.71667)	0.951992	0.1771
$\hat{B} = 229.50(DN^2H)^{0.9256}$	232,464.00	462.76	<.0001	0.931917	Embudo (DT=474.03141)	0.952131	0.1787
$\hat{B} = 68.2663DN^{1.6848}H^{1.2468}$	225,693.00	318.39	<.0001	0.936180	Embudo (DT=458.91940)	0.968032	0.4666

CME: Cuadrado Medio del Error, Fcal: Valor de F calculada, Prob F: Probabilidad exacta de F, Pseudo R²: Pseudo coeficiente de determinación, DR: Dispersión de los residuales, DT: Desviación típica de los residuales, W: Estadístico de Shapiro-Wilk y Prob W: Probabilidad de W.

Cuadro 9. Pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para los parámetros de lo modelos evaluados para biomasa.

Modelos	Parámetro estimado	Estimación	Error estándar	Valor t	Prob t	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
$\hat{B} = 7,027(DN)^{2.1914}$	$\hat{\beta}_0$	7,027.0	543.60	12.93	<.0001	5,915.3	8,138.8
	$\hat{\beta}_1$	2.1914	0.2215	9.89	<.0001	1.7384	2.6445
$\hat{B} = 229.50(DN^2H)^{0.9256}$	$\hat{\beta}_0$	229.50	51.6217	4.45	0.0001	123.90	335.10
	$\hat{\beta}_1$	0.9256	0.0724	12.78	<.0001	0.7775	1.0737
$\hat{B} = 68.2663DN^{1.6848}H^{1.2468}$	$\hat{\beta}_0$	68.2663	64.0444	1.07	0.2956	-62.9216	199.50
	$\hat{\beta}_1$	1.6848	0.1932	8.72	<.0001	1.2890	2.0806
	$\hat{\beta}_2$	1.2468	0.2515	4.96	<.0001	0.7316	1.7621

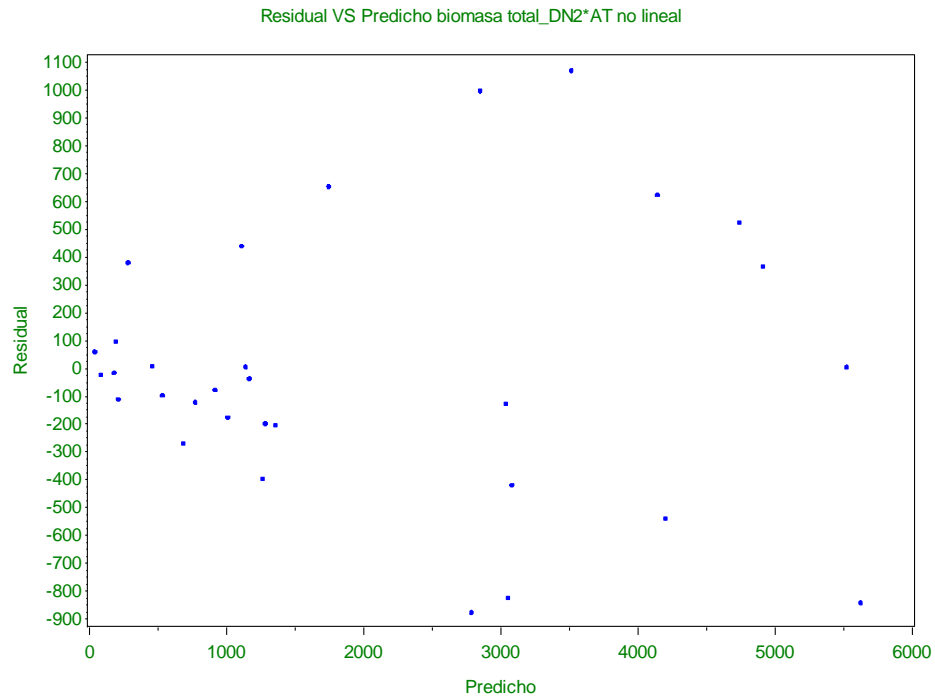


Figura 24. Dispersión de los residuales derivados del modelo $\hat{B} = 229.50(DN^2H)^{0.9256}$

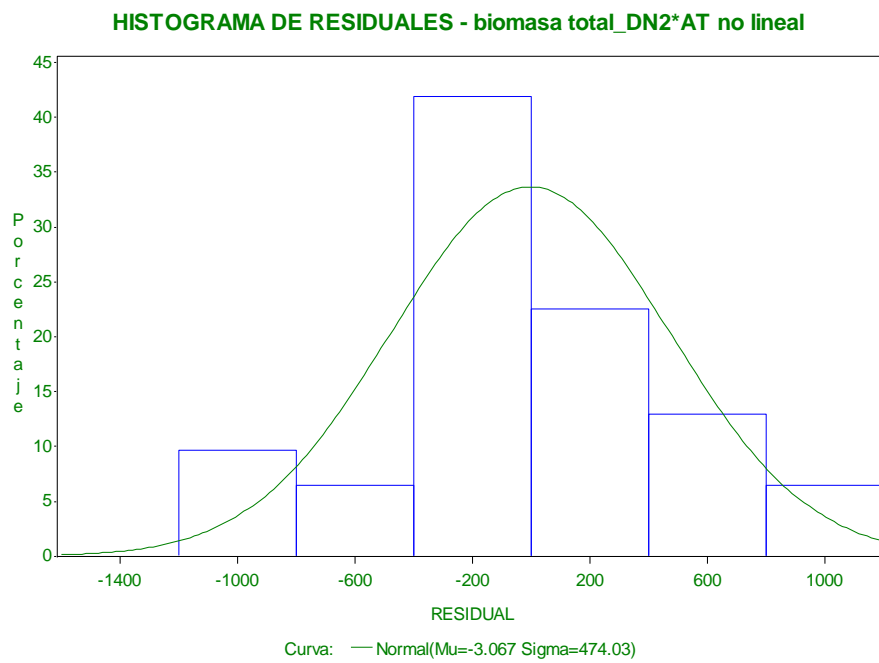


Figura 25. Histograma de los residuales derivados del modelo $\hat{B} = 229.50(DN^2H)^{0.9256}$

PLOT DE RESIDUALES -biomasa_DN2*AT no lineal

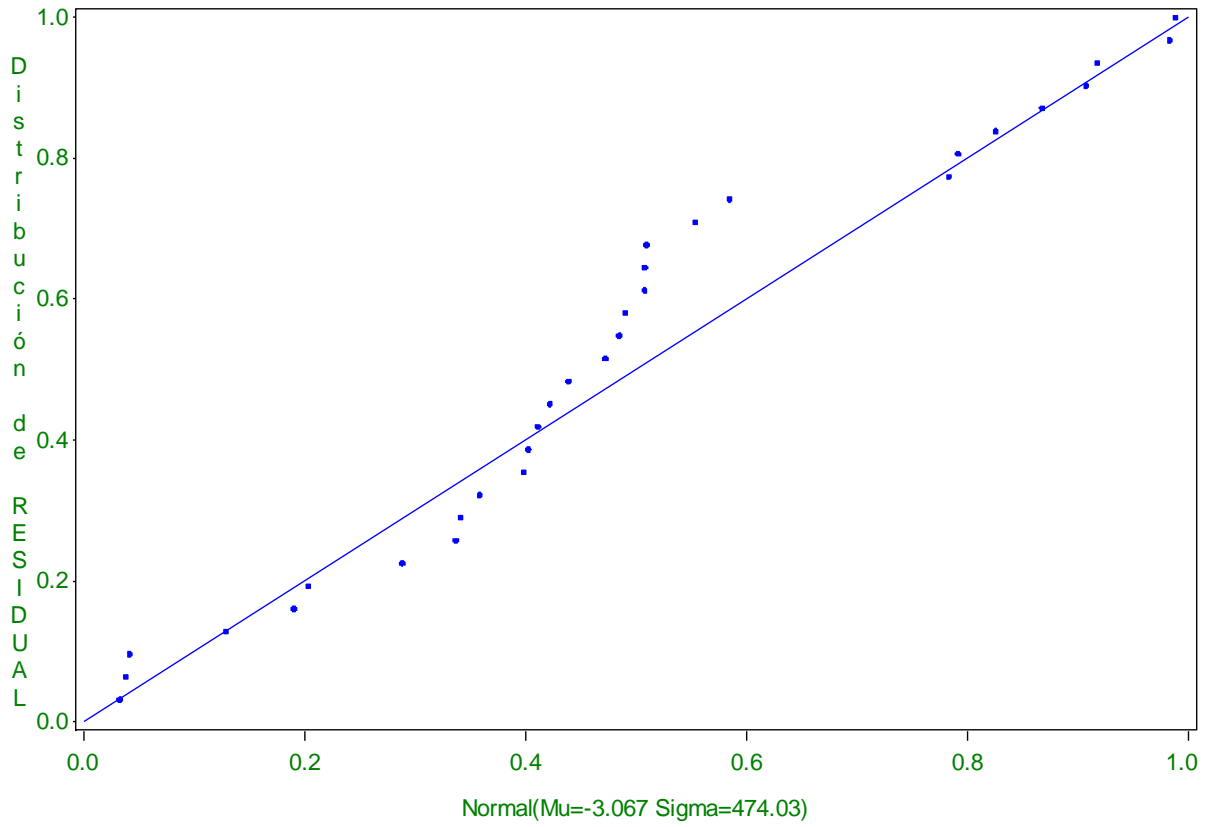


Figura 26, Pplot de los residuales derivados del modelo $\hat{B} = 229.50(DN^2 H)^{0.9256}$

Biomasa estimada VS biomasa observada $c=f(dn^2 \cdot h)$

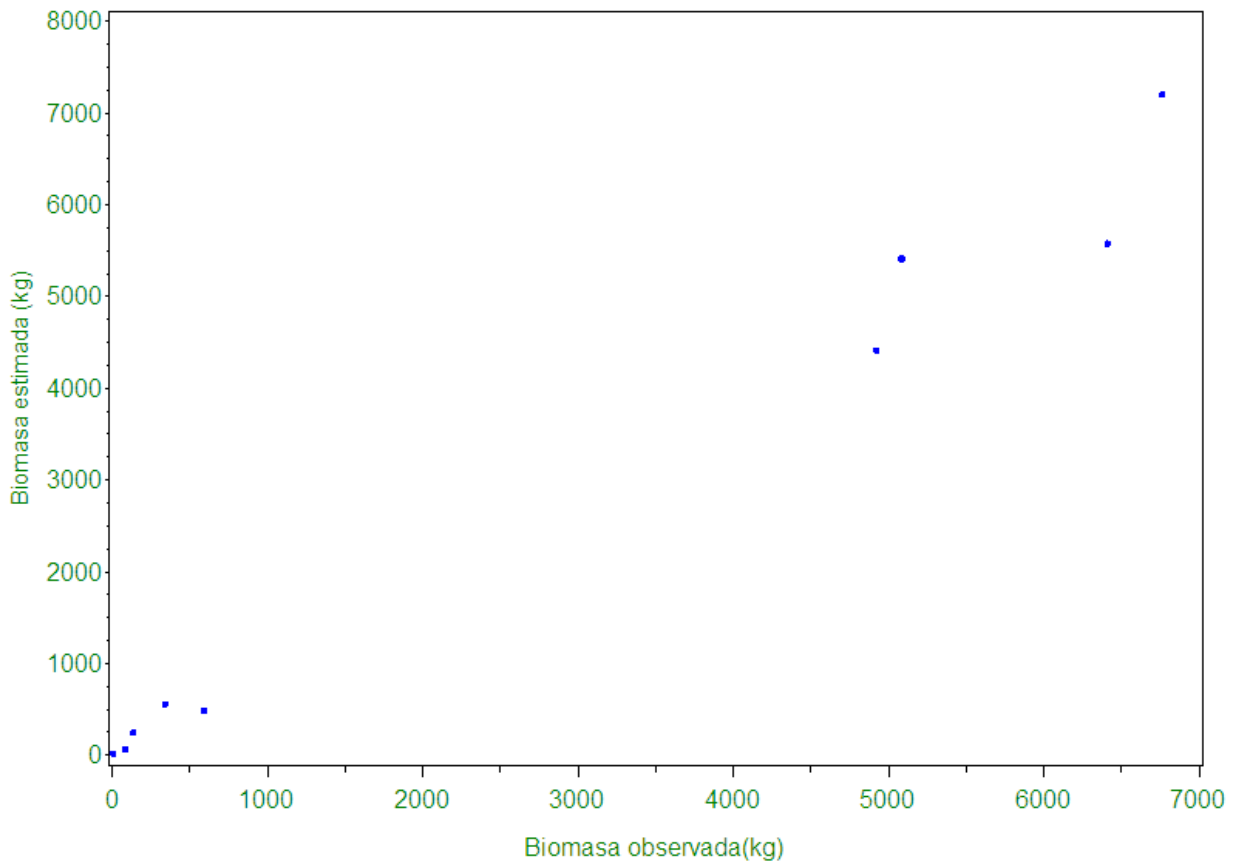


Figura 27. Biomasa observada (kg) contra biomasa estimada (kg).

Modelos para carbono

La determinación de ecuaciones alométricas para la estimación del carbono secuestrado en los bosques ha ganado mucho interés en la última década en el marco del cambio climático y los efectos de la deforestación (Brown, 2002). No obstante la mayoría de los estudios realizados hacen estimaciones por hectárea mientras que el presente las hace por individuo. Estas estimaciones pueden alcanzar a cubrir un sistema forestal si se hace la sumatoria de todos los individuos del mismo (Acosta, Vargas, Velázquez, & Etchevers, 2002). Cabe mencionar que el comportamiento de los parámetros estimados son muy similares a los discutidos para biomasa ya que existe una estrecha relación entre el contenido de biomasa y el de carbono, pudiendo éste alcanzar aproximadamente el 50% de la biomasa total (Huete, Didan, Miura, Rodriguez, Gao, & Ferreira, 2002; IPCC, 2007), dicho porcentaje suele variar, por lo

que la generación de ecuaciones por especie deja de lado el uso del factor 0.5 que suele ser usado para pasar de biomasa a carbono (Elias & Porvin, 2003).

Los tres modelos generados cumplen con el supuesto de normalidad al arrojar valores de p correspondientes a la prueba de Shapiro-Wilk mayor a 0.05. Todos los modelos presentan una distribución de residuales en forma de embudo, sin embargo en los modelos que toman en cuenta el diámetro y la altura como variables regresoras esta tendencia disminuye en un 28.01% tomando como parámetro la desviación típica de los residuales en contraste con el que usa solo el diámetro normal.

De los tres modelos al menos uno de los parámetros es distinto de cero, esto se confirma ya que los valores de p correspondientes a la prueba de F son mayores de 0.001 (Cuadro 10), sin embargo el valor de β_0 para el tercer modelo puede ser cero ya que el valor de p de la prueba de t es mayor a 0.05 al realizar las pruebas de hipótesis para cada parámetro (Cuadro 11).

Al incluir la variable altura el Cuadrado Medio del Error se redujo drásticamente en un 50%, esto coincide con lo reportado por (Jokela, Shannon, & White, 1981) ya que al incluir la variable altura se reduce el cuadrado medio del error, además de tener una Pseudo R^2 un 6% mas alta respecto al modelo 1 que toma en consideración solo el diámetro normal (Cuadro 10). Sin embargo el modelo que considera el diámetro normal y la altura de forma separada presenta la particularidad de que el parámetro β_0 puede ser igual a cero (Cuadro 11). Por lo tanto el modelo elegido como el mejor predictor del carbono fue el que incluye al diámetro normal y la altura de forma apareada.

En cuanto a la dispersión de los residuales del modelo elegido, ésta presenta un patrón no del todo deseable desde el punto de vista estadístico (Figura 28), sin embargo, supera la prueba de normalidad ya que en general los residuales se ajustan a una distribución normal (Figura 29) además de desviarse muy poco de una recta que pasa por el origen y tiene como pendiente la unidad (Figura 30).

La validación cruzada (Figura 31) demuestra que el modelo elegido es un buen predictor del contenido de carbono como una función del producto del diámetro normal al cuadrado por la altura, de hecho el valor de p correspondiente a la prueba de t apareada es de 0.9504, significativamente mayor del 0.05.

Desafortunadamente no existen muchos estudios para comparar los resultados obtenidos en cuanto a la estimación de contenido de carbono por árbol, por lo que este trabajo es una contribución a los trabajos de esa índole.

Cuadro 10. Estadísticos de ajuste y normalidad de los modelos evaluados para carbono.

Modelos	CME	Fcal	Prob F	Pseudo R ²	DR	W	Prob W
$\hat{C} = 3,553.1(DN)^{2.2245}$	109,555	239.41	<.0001	0.872982	Embudo (DT=325.12000)	0.94806	0.1380
$\hat{C} = 110.20(DN^2H)^{0.9392}$	58,101.4	464.27	<.0001	0.932637	Embudo (DT=236.99069)	0.951486	0.1715
$\hat{C} = 37.6376DN^{1.7317}H^{1.2239}$	57,230.30	314.70	<.0001	0.935935	Embudo (DT=231.08285)	0.969951	0.5177

CME: Cuadrado Medio del Error, Fcal: Valor de F calculada, Prob F: Probabilidad exacta de F, Pseudo R²: Pseudo coeficiente de determinación, DR: Dispersión de los residuales, DT: Desviación típica de los residuales, W: Estadístico de Shapiro-Wilk y Prob W: Probabilidad de W.

Cuadro 11. Pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para los parámetros de los modelos evaluados para carbono.

Modelos	Parámetro estimado	Estimación	Error estándar	Valor t	Prob t	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
$\hat{C} = 3,553.1(DN)^{2.2245}$	$\hat{\beta}_0$	3,553.1	272.1	13.06	<.0001	2,996.6	4,109.6
	$\hat{\beta}_1$	2.2245	0.2214	10.05	<.0001	1.7717	2.6774
$\hat{C} = 110.20(DN^2H)^{0.9392}$	$\hat{\beta}_0$	110.20	25.1146	4.39	0.0001	58.8716	161.6
	$\hat{\beta}_1$	0.9392	0.0732	12.82	<.0001	0.7894	1.0890
$\hat{C} = 37.6376DN^{1.7317}H^{1.2239}$	$\hat{\beta}_0$	37.6376	35.5616	1.06	0.2989	-35.2065	110.5
	$\hat{\beta}_1$	1.7317	0.1948	8.89	<.0001	1.3325	2.1308
	$\hat{\beta}_2$	1.2239	0.2535	4.83	<.0001	0.7046	1.7432

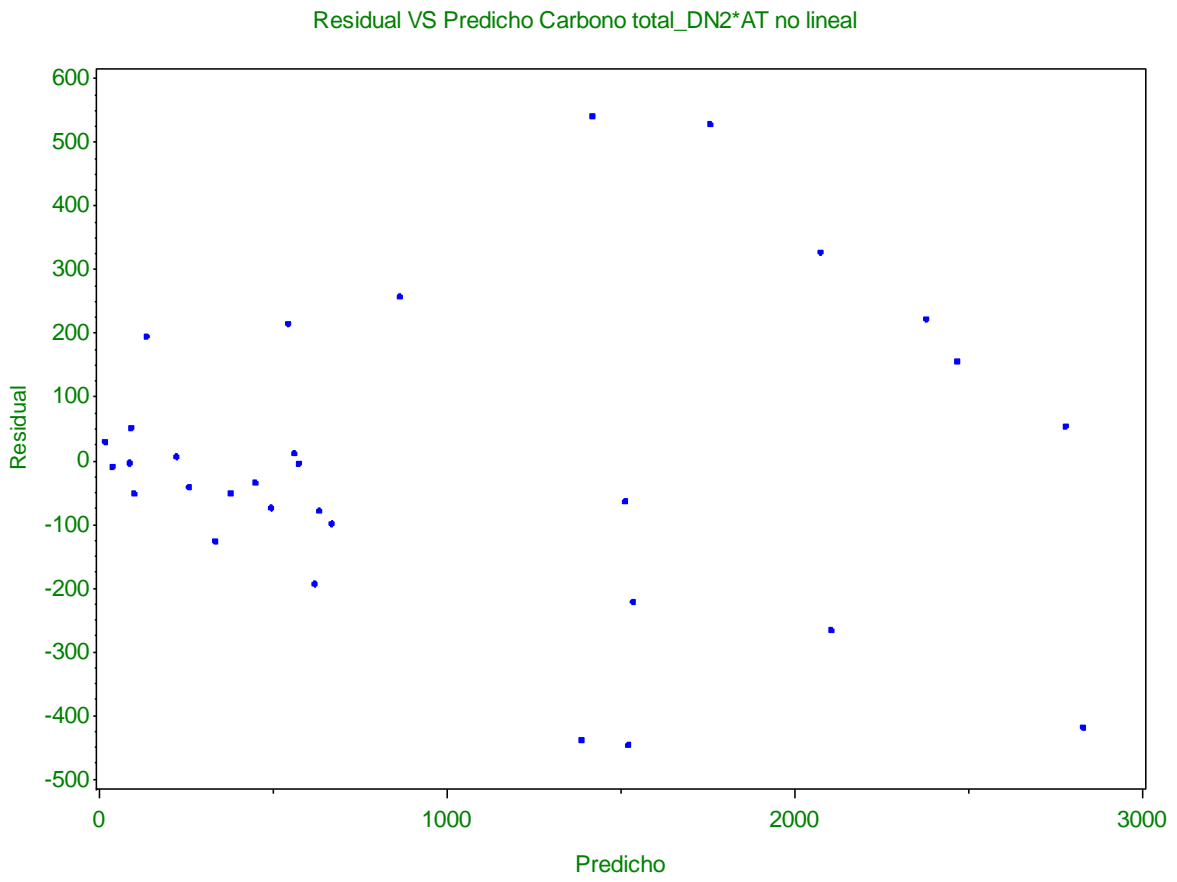


Figura 28. Dispersión de los residuales derivados del modelo $\hat{C} = 110.20(DN^2 H)^{0.9392}$

HISTOGRAMA DE RESIDUALES - Carbono total_DN2*AT no lineal

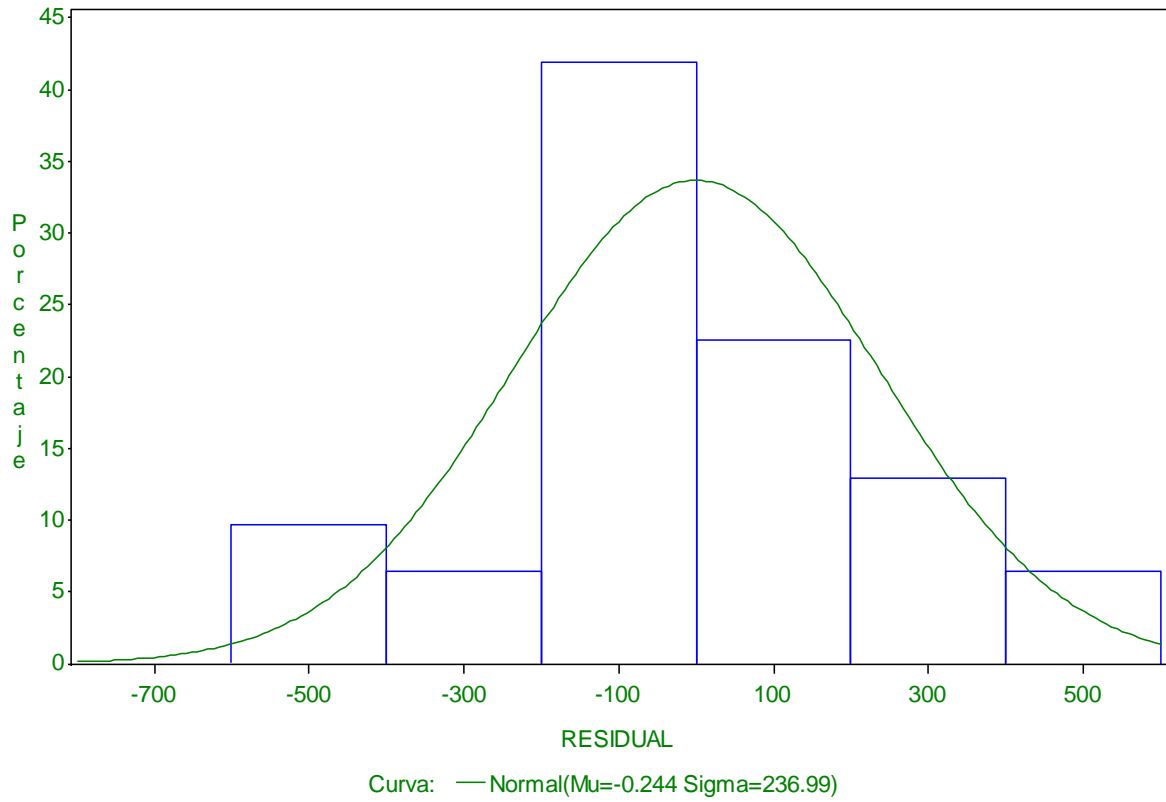


Figura 29. Histograma de los residuales derivados del modelo $\hat{C} = 110.20(DN^2H)^{0.9392}$

PLOT DE RESIDUALES -Carbono_DN2*AT no lineal

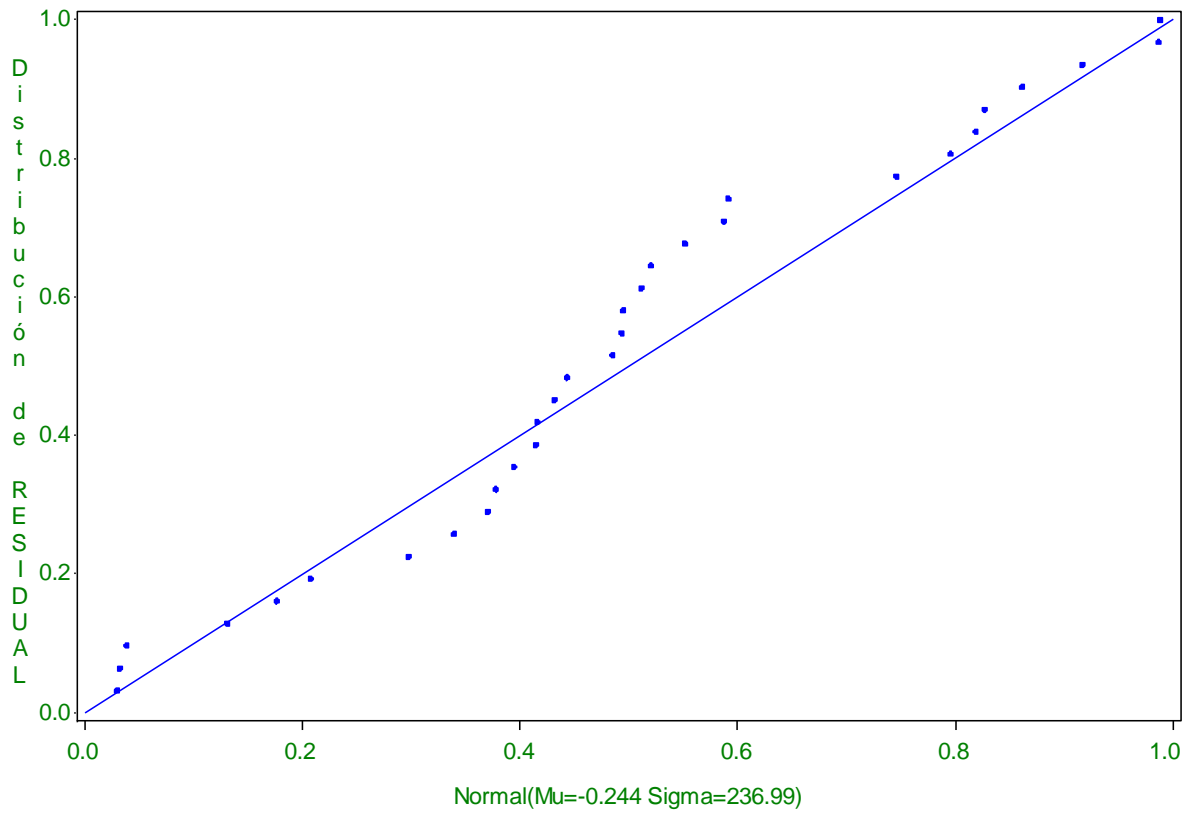


Figura 30. Pplot de los residuales derivados del modelo $\hat{C} = 110.20(DN^2 H)^{0.9392}$

Carbono estimado VS carbono observado $c=f(dn^2 \cdot h)$

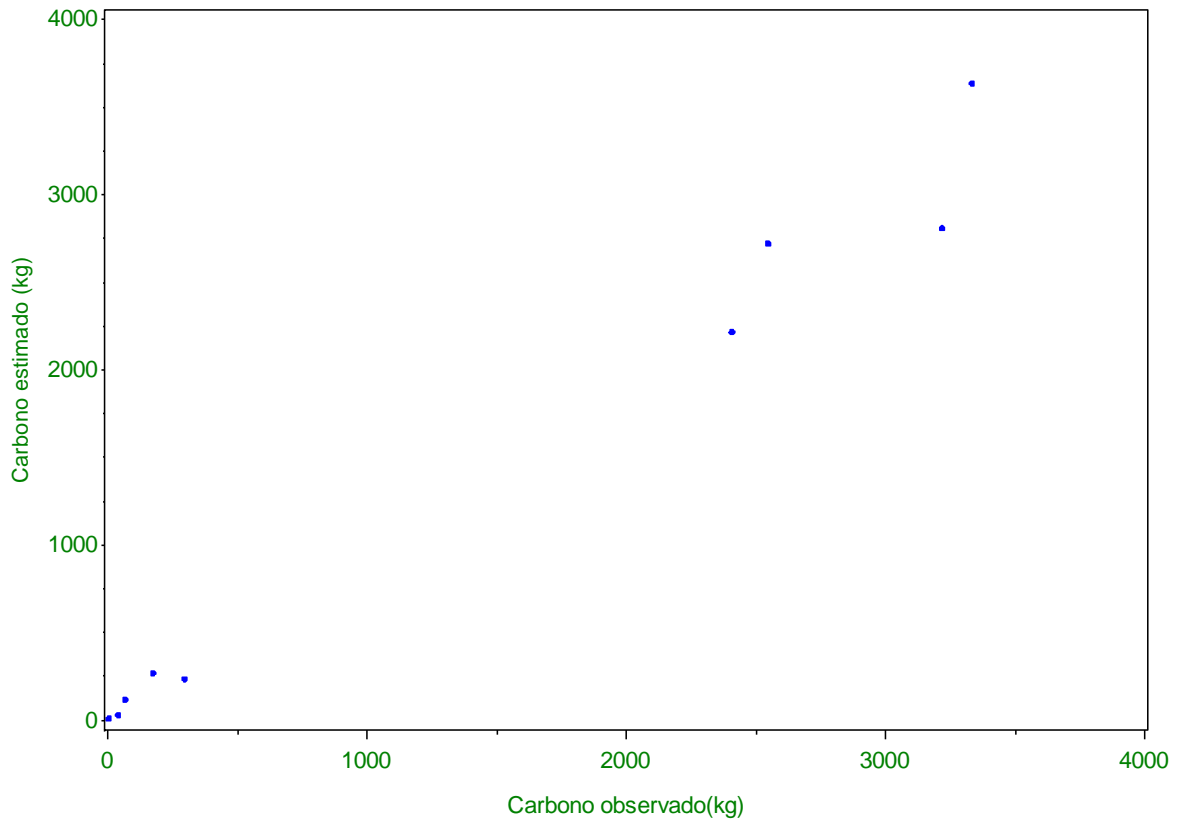


Figura 31. Carbono observado (kg) contra carbono estimado (kg).

Conclusiones

- La inclusión de la variable altura mejora significativamente los modelos para la estimación de biomasa y carbono.
- El modelo que usa el DN^2H fue el mejor predictor para biomasa con una pseudo R^2 0.93.
- El modelo que usa el DN^2H fue el mejor predictor del contenido de carbono con una pseudo R^2 0.93.

Bibliografía

Calama, R., & Montero, G. (2004). Interregional nonlinear height diameter model with random coefficients for stone pine in Spain . *Canadian Journal of Forest Research* , 18:264-276.

Calegario, N., Daniels, R., Maestri, R., & Neiva, R. (2005). Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study . *Forest Ecology Management* , 204:11-20.

Castellanos, J., Maass, J. M., & Kummerow, J. (1991). Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil* , 131: 225-228.

Chave, J., Andalo, S., Brown, M., Cairns, J., Chambers, D., Eamus, H., et al. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests . *Ecosystem Ecology* , 145:87-99.

Chapin, F. S., Mooney, H. A., Chapin, M. C., & Matson, P. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Estados Unidos: Springer.

Carabias, L. J., & Tudela, A. (2000). *El cambio climático: una amenaza global*. Mexico: SEMARNAP.

Levy, R. (1984). *Chemistry of Irrigated Soils*. New York: Van Nostrand-Reinhold.

Lindstrom, M., & Bates, D. (1990). Nonlinear mixed effects models for repeated measures data . *Biometrics* , 46:673-687.

Concha, J. Y., Alegre, J. C., & Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el departamento de San Martín Perú. *Ecología Aplicada* , No 1/2 75-82.

CONAM. (2001). *Primera comunicación nacional del Perú para convención de las naciones unidas sobre cambio climático*. Lima.

Schimel, D. (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* , 1: 77-91.

Schmitt, M., & Grigal, D. (1981). Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. *Forest Research* , 11:837-840.

Sundquist, E. T. (1985). *Geological perspectives on carbon dioxide and the carbon cycle. in the carbon cycle and atmospheric CO₂: Natural variations archean to present* (Vol. Geophysical Monograph 32). (E. T. Sundquist, & W. S. Broecker, Eds.)

SEDUR. (2004). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de San José del Rincón, Estado de México*. Gobierno del Estado de México.

Silver, W. L., Ryals, R., & Eviner, V. (2000). Soil Carbon Pools in California's Annual Grassland Ecosystems. *Rangeland Ecology & Management* , 63(1): 128-136.

Smith, T., Cramer, W., Dixon, R., Leemans, R., Neilson, R., & Solomon, A. (1993). The global terrestrial carbon cycle. *Air and Soil Pollution* , 70: 3-15.

West, G., Brown, J., & Enquist, B. (1999). A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* , 400:664-667.

Wirth, C., Schumacher, J., & Schulze, D. (2004). Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe a meta analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* , 24:121-139.

Worldwatch Institute. (2002). Signposts 2002: Envisioning the Future. *A Worldwatch CD-ROM Resource* . USA.

World Energy Blog. (n.d.). http://www.worldenergyblog.com/.../09/carbon_cycle_NASA.jpg. Retrieved 2010 йил Febrero

Zhao, D., Wilson, M., & Borders, B. (2005). Modeling response curves and testing treatment effects in repeated measures experiments: a multilevel nonlinear mixed-effects model approach . *Canadian Journal of Forest Research* , 35:122-132.

Ter-Mikaelian, M., & Korzukhin, M. (1997). Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forestal Ecology Management* , 97:1-24.

Alvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Acosta. (2003). *Diseño y aplicación de un metodo para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetacion forestal y agricolas de ladera en Mexico*. Montecillos, Mexico: Tesis de doctorado en ciencias del colegio de posgraduados.

Acosta, M., Vargas, A., Velázquez, A., & Etchevers, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de las relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* , 36:725-736.

Bueno M., A. F., & Helene M., E. M. (1991). *Global deforestation and CO2 emissions. Past and present a comprehensive review* E. Energy Environ.

Baker, T., Attiwill, P., & Stewart, H. (1984). Biomass equations for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria. NZ . *Journal of Forest Science* , 14:89-96.

Bolin, B., Doos, B. R., Jager, J., & Warrick, R. A. (1986). *The greenhouse effect climatic change and ecosystems*. Gran Bretaña: Scientific Comminettee on Problems of the Enviroment (SCOPE).

Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges . *Environmental Pollution* , 116:363-372.

Davidson, A., & Hinkley, D. (1997). Bootstrap methods and their application . *Cambridge University Press* .

De Jong, B. H., Tipper, J. R., & Taylor, J. (1997). A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* , 2:231-246.

Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* , 263(5144).

Elias, M., & Porvin, C. (2003). Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species . *Canadian Journal of Forest Research* , 33:1039-1045.

Estrategia Nacional de Cambio Climatico. (2007).

EPA, E. P. (2008). *Report on the environment Nacional Center or Enviromental Assesment* (Vols. EPA 600 R-07/045F). Washington D. C.

Falkowski, P. (2000). The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science* , 290, 5490: 291-296.

Fang, Z., & Bailey, R. (2001). Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *Forest Science* , 47:287-300.

FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra* (Vol. 96). Roma, Italia: Informes sobre recursos naturales mundiales de suelos.

Forestal. (2007). Calentamiento global, acciones para mitigar sus efectos. *Forestal* , XXI, 10:1-2.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment* , 83:195-213.

Hall, D., & Clutter, M. (2004). Multivariate multilevel nonlinear mixed effects models for timber yield predictions . *Biometrics* , 60:16-24.

Hall, D., & Bailey, R. (2001). Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models . *Forest Science* , 47:311-321.

Harding, R., & Grigal, D. (1985). Individual tree biomass estimation equations for plantation-grown white spruce in northern Minnesota. *Forest Research* , 15:738-739.

Houghton, J. T., Jenkins, G. J., & Ephraums, J. J. (1990). *Climate change: The IPCC Scientific Assesment*. New York: Cambridge University Press.

Houghton, R. A., & Skole, D. L. (1990). Carbon in:. In B. L. Turner, W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Matthews, & W. B. Meyer, *The Earth as transformed by human action* (pp. 393-408). New York: Cambridge University Press.

Houghton, R. A., Boone, R. D., Fruci, J. R., Hobbie, J. E., Melillo, C. A., Palm, C. A., et al. (1987). The flux of carbon from terrestrialecosystems to the atmosphere in 1980 dueto changes in land use: geographic distribution of the global flux. *Tellus* , 39B: 122-139.

Geron, C., & Ruark, G. (1988). Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Canadian Journal of Forest Research* , 18:1298-1304.

Gregoire, T., & Schabenberger, O. (1996). Nonlinear mixed-effects modeling of cumulative bole volume with spatially correlated within tree data . *Agriculture Biological Environment* , 1:107-119.

Grieg-Gran, M., Porras, I., & Wunder, S. (2005). *How can market mechanisms for forest environmental services help the poor?* Preliminary lessons from Latin America. World developement.

Grier, C., & Waring, R. (1974). Conifer foliage mass related to sapwood area. *Forestal Science* , 20:205-206.

IPCC. (2007). *cuarto informe de evaluacion*.

IPCC. (2000). *Land use, land use change and forestry*. United Kingdom: Cambridge University Press.

Jokela, E., Shannon, C., & White, E. (1981). Biomass and nutrient equations for mature *Betula papyrifera* Marsh. *Canadian Journal of Forest Research* , 11:298-304.

Ker, M. (1984). Biomass equations for seven major maritimes tree species. *Forest Research* , 142-148.

Martin, J. K., Kloeppe, B. D., Schaefer, T. L., Kimbler, D. L., & McNulty, S. G. (1998). Aboveground biomass ando nitrogen allocation of ten deciduous southern Appalachian tree species. *Forest Res* , 28: 1648-1659.

Martin, J., Gower, S., Plaut, J., & Holmes, B. (2005). Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence. *Global Change Biology* , 11: 1883-1894.

Martinez, J., & Fernandez, B. A. (2004). *Cambio climático, una visión desde México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.

Margulis, L., & Lovelock, J. E. (1989). *Gaia and Geognosy, in Global Ecology towards a science of the bosphera*. San Diego: Ramble, M. b., Margulis, L. and Fester, R.

Niklas, K. J., & Enquist, B. J. (2002). On the vegetative biomass partitioning of seed plant leaves, systems and roots. *Am Naturalist* , 159:482-497.

Nordt, L. C., Wilding, L. P., & Drees, L. R. (2001). *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*. Florida: CRC.

Parresol, B. (2001). Additivity of nonlinear biomass equations. *NRC Research press* , 31: 865-878.

Pinheiro, J., & Bates, D. (2000). *Mixed-effect models in S and S-Plus* . Springer-Verlag .

Ordóñez, A. (1999). *Estimación de la Captura de Carbono en un Estudio de Caso*. México DF.: Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R., & Dutter, R. (2008). *Statistical data analysis explained : applied environmental statistics with R*. Wiley & çsons.

Romahn, C. F., Ramirez, H., & Treviño, J. L. (1994). *Dendrometría*. México: Universidad Autonoma de Chapingo.