



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA Y CARBÓN EN
AILE (*Alnus acuminata* Kunth) MEDIANTE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO

TESIS



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
LINEA DE EXAMENES PROFESIONALES

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA:

MANUEL DE JESÚS DÍAZ RÍOS



Chapingo, Estado de México, 2014.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA Y CARBONO EN
AILE (*Alnus acuminata* Kunth) MEDIANTE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO

Tesis realizada por **Manuel de Jesús Díaz Ríos** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Director: _____

Dr. Antonio Vázquez Alarcón

Asesor: _____

Dr. Alejandro Sánchez Vélez

Asesor: _____

Dr. Miguel Uribe Gómez

DEDICATORIA

Por supuesto que a mi madre: Ángela Ríos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), de muchas formas frutos de los sueños de todos aquellos que nos dieron Patria.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, por su incondicional apoyo otorgado para ingresar y egresar de la Maestría.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón, por sus conocimientos transmitidos y por haber dirigido este trabajo. Ha sido el Profesor más científico que he tenido.

Al Dr. Miguel Uribe Gómez, por su amistad, sus enseñanzas agroforestales y por la exhaustiva revisión a este trabajo.

Al Dr. Alejandro Sánchez Vélez, de quien aprendí a valorar los árboles y por supuesto los ecosistemas acuáticos.

A la C. Norma Lilia Martínez Ramírez secretaria del Postgrado en Agroforestería, así como a la C. Rocío Rodríguez Sosa y a la C. Guadalupe Sánchez Gutiérrez secretarías de la oficina General de Postgrado por su diligente trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Manuel de Jesús Díaz Ríos nació en la Ciudad de Oaxaca el 2 de mayo de 1973. Es hijo de Ángela Ríos y Salomón Díaz Robles. Realizó sus estudios básicos de primaria, secundaria y bachillerato en su ciudad natal de 1979 a 1992. Estudió la carrera de Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia de 1992 a 1997 y la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible durante los años 2011 y 2012 ambas en la Universidad Autónoma Chapingo.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA Y CARBONO EN AILE (*Alnus acuminata* Kunth) MEDIANTE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO

ALLOMETRIC EQUATIONS FOR ESTIMATING THE ABOVEGROUND BIOMASS AND CARBON IN AILE (*Alnus acuminata* Kunth) DEVELOPED BY A NON-DESTRUCTIVE METHOD

Manuel de Jesús Díaz Ríos¹, Antonio Vázquez Alarcón²

RESUMEN

En San Pablo Ixayoc, Texcoco, Edo. de México, México, se seleccionaron 10 árboles de *Alnus acuminata* K. de un bosque de galería y se determinó su biomasa y carbono de la parte aérea mediante un método no destructivo. La biomasa de los fustes se determinó al estimar su volumen y la densidad de la madera. La biomasa de las copas se estimó al podarles algunas ramas y multiplicar su peso fresco por su porcentaje de humedad para extrapolar los resultados a un inventario de ramas por árbol. Se emplearon dos modelos: $Y=B_0 + B_1X_1$ (1) y $Y=b * X^k$ (2). El mejor modelo fue el 2. Las ecuaciones alométricas para biomasa y carbono quedaron expresadas como $B = 0.0012DAP^{1.7877}$ y $CCa = 0.0006DAP^{1.7755}$, ambas con coeficientes de determinación ($R^2 = 0.95$), donde B es biomasa (Mg), DAP es diámetro a la altura de pecho (cm) y CCa es contenido de carbono por árbol (Mg). El porcentaje promedio de carbono en los árboles fue de 48.3, con valores de 48.9 % para el fuste y la madera de las ramas y 47.1 % para las ramillas con hojas. La distribución promedio de carbono en los árboles fue de 65.12 % para el fuste, 27.15 % para la madera de las ramas y 7.72 % para las ramillas con hojas.

Palabras clave: Aile, *Alnus acuminata*, bosques de galería, método no destructivo, ecuaciones alométricas.

ABSTRACT

In San Pablo Ixayoc, Texcoco, Estate of Mexico, Mexico, 10 *Alnus acuminata* K. trees from a gallery forest were selected and their aboveground biomass and carbon contents were determined by a non-destructive method. Biomass boles content was calculated by the boles volumes and wood density. Canopies biomass was estimated by harvesting some branches and multiplying their fresh weights by their average percentage of humidity and extrapolating the results to a branches data inventory. Two models were fitted $Y=B_0 + B_1X_1$ (1) and $Y=b * X^k$ (2). The best model was number 2. The proposed allometric equations for biomass and carbon contents were expressed as: $B = 0.0012DBH^{1.7877}$ and $CCt = 0.0006DBH^{1.7755}$, with a coefficient of determination for both equations ($R^2 = 0.95$); and where B is biomass (Mg), DHB is diameter at breast height (cm) and CCt is carbon content per tree (Mg). The average percentage of carbon in trees was 48.3 with values of 48.9 % for the bole and wood branches and 47.1 % for branchlets/leaves. The average carbon distribution in the trees was 65.12 % for the bole, 27.15 % for wood branches and 7.72 % for branchlets/leaves.

Key words: Alder, *Alnus acuminata*, gallery forest, non-destructive methods, allometric equations.

¹Tesista, ²Director de tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 Bosques de galería.....	5
3.2 Cambio climático	6
3.3. Efecto invernadero	7
3.4 Bióxido de carbono	8
3.5 Almacenes de carbono	9
3.6 Ecuaciones alométricas.....	10
3.6.1 Métodos destructivos y no destructivos para calcular biomasa aérea	12
3.6.2 Estimación de biomasa mediante métodos no destructivos.....	14
3.6.3 Estimación del contenido de carbono	17
3.7 Estudios florísticos.....	18
3.8 Índices de valor de importancia	18
3.9 Área mínima de muestreo	20
4. MATERIALES Y MÉTODOS	23
4.1 Localización.....	23

4.2 Vegetación	25
4.3 Clima	25
4.4 Suelos	26
4.5. Área mínima de muestreo	27
4.6 Análisis florístico del área de estudio	32
4.7 Índices de valor de importancia	33
4.8 Generación de ecuaciones alométricas para biomasa y carbono	35
4.9 Cálculo de la biomasa aérea	35
4.9.1 Cálculo del volumen de los fustes	36
4.9.2 Determinación del factor de forma de la especie	38
4.9.3 Determinación de la biomasa de la copa	39
4.9.3.1 Determinación de la biomasa de las ramas	40
4.9.4 Determinación de la densidad de la madera.....	43
4.9.5 Cálculo de la biomasa del fuste.....	46
4.9.6 Determinación del contenido de carbono	47
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1 Área mínima de muestreo	49
5.2 Composición florística.....	52
5.2.1 Índices de Valor de Importancia	53
5.3 Volumen de los fustes	56
5.3.1 Factor de forma de la especie	57
5.4 Biomasa de la copa	58
5.5 Densidad de la madera.....	64
5.6 Determinación de la biomasa del fuste	65
5.7 Biomasa total por árbol.....	67
5.7.1 Contenido de carbono	67
5.8 Generación de ecuaciones alométricas	69
5.8.1 Características dasométricas de los árboles evaluados	70
5.8.1.2 Ecuaciones alométricas para biomasa	70
5.8.1.3 Ecuaciones alométricas para carbono.....	74

5.9 Comparación de las ecuaciones alométricas	76
6. CONCLUSIONES.....	79
7. RECOMENDACIONES.....	81
8. LITERATURA CITADA	82

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Localización del transecto.	24
Cuadro 2. Composición florística del transecto.	53
Cuadro 3. Índices de Valor de Importancia de las 9 especies arbóreas del transecto.	54
Cuadro 4. Volumen total del fuste limpio de 10 árboles de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	57
Cuadro 5. Factor de forma por árbol y por especie de 10 árboles de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	58
Cuadro 6. Promedios del peso fresco de los componentes madera y ramillas con hojas según las categorías diamétricas de ramas.	60
Cuadro 7. Biomasa total en peso seco de la madera de las ramas.	61
Cuadro 8. Biomasa total en peso seco de las ramillas de las hojas.	62
Cuadro 9. Biomasa total de la copa derivada del aporte de los componentes madera de las ramas y ramillas con hojas.	63
Cuadro 10. Densidad de la madera de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	65
Cuadro 11. Biomasa total de los fustes limpios en aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth) calculada mediante la fórmula propuesta por Fehse, (2002).	66
Cuadro 12. Biomasa total por árbol obtenida de la suma de la biomasa del fuste y la biomasa de la copa.	67
Cuadro 13. Contenido de carbono por componente y por árbol.	69
Cuadro 14 Características dasométricas y contenido de biomasa y carbono de los 10 árboles de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth) evaluados originalmente.	70
Cuadro 15. Características dasométricas de 7 árboles de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth) seleccionados para generar las ecuaciones alométricas.	71
Cuadro 16. Contenido de biomasa calculada con las ecuaciones alométricas generadas y la reportada por Juárez, (2008).	77

Cuadro 17. Contenido de carbono calculado con las ecuaciones alométricas generadas y la reportada por Juárez, (2008).	78
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Parcelas anidadas para la determinación de la curva especies-área (Garmendia, 2005).....	21
Figura 2. Área mínima de muestreo generada mediante la curva especies-área (Franco, 1995).	22
Figura 3. Localización del transecto de estudio.	23
Figura 4. Copas y fustes de algunos árboles del transecto evaluado.....	24
Figura 5. Establecimiento y delimitación física de la primera unidad de anidación.	29
Figura 6. Unidades de anidación establecidas en forma longitudinal y zigzagueante sobre los costados del río Texcoco representado por la línea punteada (Elaboración propia).....	32
Figura 7. Material vegetal prensado y montado para su identificación.	33
Figura 8. División de los fustes en secciones cilíndricas y medición de sus respectivos diámetros y longitud.....	37
Figura 9. Pesaje <i>in situ</i> de la madera de las ramas y ramillas con hojas.....	40
Figura 10. Muestras del componente madera de las ramas y ramillas con hojas.	41
Figura 11. Llenado con arena del recipiente de volumen conocido y desbaste del montículo formado.	44
Figura 12. Determinación del volumen de las muestras de madera.	45
Figura 13. Unidades de anidación con su respectiva área establecidas en forma longitudinal y zigzagueante sobre los costados del río Texcoco representado por la línea punteada (Elaboración propia).	50
Figura 14. Área mínima de muestreo determinada mediante la curva especies-área.	51
Figura 15. Frecuencias de las categorías diamétricas de los árboles de aile (<i>Alnus acuminata</i> Kunth) presentes en el transecto.	55

Figura 16. Dispersión de los valores observados de <i>Alnus acuminata</i> (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de biomasa utilizando el modelo lineal.	72
Figura 17. Dispersión de los valores observados de <i>Alnus acuminata</i> (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de biomasa utilizando el modelo exponencial.	73
Figura 18. Dispersión de los valores observados de <i>Alnus acuminata</i> (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de carbono utilizando el modelo lineal.	74
Figura 19. Dispersión de los valores observados de <i>Alnus acuminata</i> (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de carbono utilizando el modelo exponencial.	75

LISTA DE ABREVIATURAS

% C.- porcentaje de carbono
°C.- grados centígrados
CH₄.- metano
cm.- centímetros
CO₂.- bióxido de carbono
CTC.- clorofluorocarbonos
D.- densidad
DAP_{1.3m}.- diámetro a la altura de pecho tomado a 1.3 m
Dr.- densidad relativa
F.- frecuencia
Fr.- frecuencia relativa
g.- gramos
H₂O.- agua
INEGI.- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
IPCC.- Panel Intergubernamental sobre el cambio climático
IVI.- Índice de Valor de Importancia
IVIR.- Índice de Valor de Importancia Relativo
kg.- kilogramos
m.- metros
m².- metros cuadrados
m³.- metros cúbicos
Mg m⁻³.- toneladas por metro cúbico
Mg.- toneladas
mm.- milímetros
msnm.- metros sobre el nivel del mar
N₂O.- óxido nitroso
O₃.- ozono
P.- predominio o cobertura
ppmv.- partes por millón en volumen
Pr.- predominio relativo
R².- coeficiente de determinación
SO₂.- bióxido de azufre
vol.- volumen

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales proveen al hombre de diversos bienes materiales así como de una extensa diversidad de servicios ambientales, estos últimos benefician a todas las formas de vida presentes en la tierra y son determinantes para mantener la estabilidad ambiental del planeta.

En la actualidad los bosques, las selvas y todos aquellos ecosistemas o sistemas de producción en donde estén presentes los árboles están siendo más valorados, esto no solo por los bienes que los árboles producen sino también por los diversos servicios ambientales que estos generan. Uno de los servicios ambientales de mayor relevancia que ofrecen los árboles es su capacidad intrínseca de absorber y secuestrar carbono atmosférico mediante el proceso fotosintético, con lo que contribuyen a la disminución del efecto invernadero causante del calentamiento global asumido como de origen antropogénico.

El efecto invernadero se debe a los gases atmosféricos llamados justamente de efecto invernadero o termoactivos, los más importantes son el vapor de agua (H_2O) y el bióxido de carbono (CO_2) (Garduño, 2004). La importancia del CO_2 y el vapor de agua en la atmósfera es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33 °C más fría y por lo tanto el planeta estaría congelado (Schlesinger, 1997). El CO_2 es un componente natural del aire y siempre ha existido en la atmósfera, lo que ha hecho el hombre es acrecentarlo y esto es lo que conlleva al aumento del efecto invernadero (Garduño, 2004).

Las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera se incrementaron de 280 partes por millón en volumen (ppmv), en los tiempos previos a la industrialización (1750), a 367 ppmv en 1999, es decir hubo un aumento del 31 % (IPCC, 2001). Las causas del incremento en la concentración de gases de carbono en la atmósfera están bien documentadas, en el caso del CO₂ son el uso industrial y doméstico de combustibles que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural y leña), la deforestación -que provoca la descomposición de la materia orgánica- y la quema de la biomasa vegetal (Jaramillo, 2004). De acuerdo con Maass (2009), el incremento de CO₂ en la atmósfera produce un aumento en la retención de la radiación emitida por la superficie terrestre, alterando el régimen térmico e induciendo el calentamiento global del planeta. Debido a la problemática real que ya generan el efecto invernadero y el calentamiento global en la tierra como consecuencia del incremento de las concentraciones de carbono en la atmósfera, es que los estudios y la generación de conocimientos sobre cualquier fase del ciclo de este elemento, en particular los relacionados a su captura y almacenamiento por y en los diferentes ecosistemas terrestres, cobran cada vez más importancia.

Una de las herramientas de mayor utilidad en los estudios para determinar el potencial de secuestro de carbono de las masas forestales son las ecuaciones alométricas. De acuerdo a Pastor *et al.* (1984) citados por Cano (1993), en estudios forestales el concepto de alometría se ha utilizado para relacionar componentes o variables de difícil medición (biomasa y área foliar), con variables de más fácil medición (altura, diámetro, área basal y área de albura),

con el objeto de estimar las primeras variables en función de las segundas, siendo el diámetro normal el parámetro del árbol que más se ha utilizado. Esto debido a su alta correlación frecuentemente encontrada (Acosta *et al.*, 2002; Avendaño *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2007). Dichas ecuaciones son particulares para cada especie y principalmente se han generado para especies con fines maderables y mediante métodos destructivos consistentes en el derribo y destrucción total de los árboles evaluados.

Sin embargo, debido a que por diversas razones tales como el endemismo, la escasez de individuos o la localización de estos en áreas protegidas, entre muchas otras, no siempre se está en posibilidades de derribar y destruir los árboles para generar sus ecuaciones alométricas y considerando que también se requiere generar dichas ecuaciones para especies no comerciales pero de importancia biológica como lo son por ejemplo las especies de la vegetación riparia, es que en este trabajo se planteó como objetivo general: generar las ecuaciones alométricas correspondientes para determinar biomasa y carbono mediante un método no destructivo para la especie arbórea con el mayor índice de valor de importancia del bosque de galería del río Texcoco, ya que aunque se asume que la vegetación riparia juega un papel crucial en el ciclo global del carbono es poca la información disponible sobre los almacenes de carbono en este tipo de bosques en comparación con otros tipos de ecosistemas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Generar las ecuaciones alométricas correspondientes para determinar biomasa y carbono mediante un método no destructivo para la especie con mayor índice de valor de importancia del bosque de galería del río Texcoco.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio florístico del bosque de galería del río Texcoco mediante muestreos, colecta e identificación de las especies arbóreas presentes para conocer la composición botánica de esta comunidad vegetal.
- Determinar la significancia ecológica de las diferentes especies arbóreas presentes en esta población vegetal mediante sus Índices de Valor de Importancia.
- Estimar la biomasa viva y el contenido de carbono de la especie con el mayor índice de valor de importancia del bosque de galería del río Texcoco mediante un método no destructivo para generar sus ecuaciones alométricas correspondientes.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Bosques de galería

Los bosques de galería son agrupaciones arbóreas que se desarrollan a lo largo de corrientes de agua más o menos permanentes (Cruz, 2004). Los bosques de galería, por desarrollarse a lo largo de los ríos y en las riberas de los lagos de agua dulce, están considerados como parte de una vegetación de tipo ripario (Latín *ripa*=banco) o ribereña (Treviño *et al.*, 2001). Los bosques riparios han sido ampliamente conocidos por ser ecológicamente importantes, por actuar como una interfase entre los ecosistemas terrestres y acuáticos de agua dulce y por proveer algunos de los hábitats más diversos y ricos en especies en el mundo (Jolley *et al.*, 2010). Estas áreas típicamente sostienen una flora distintiva que difiere en composición, estructura y función de la vegetación terrestre adyacente (Yang *et al.*, 2011). Forman una franja que funciona en muchas ocasiones como corredores de fauna al comunicar comunidades vegetales aisladas (Treviño *et al.*, 2001).

Las zonas riparias poseen una colección extraordinariamente diversa de especies y procesos ambientales, su diversidad ecológica está relacionada a los variables regímenes de inundaciones, procesos en sus canales geográficamente únicos, cambios climáticos altitudinales y las influencias de las tierras altas sobre el corredor fluvial; la resultante dinámica ambiental mantiene una variedad de estrategias de vida, diversos ciclos bioquímicos y a diferentes

tasas y a organismos adaptados a regímenes de disturbio sobre amplias escalas en el espacio y tiempo (Naiman y Décamps, 1997).

Estas comunidades vegetales son ecológica y ambientalmente de gran importancia pues proveen diversos e importantes servicios ambientales. Una comunidad conservada sirve de filtro entre el río y los ambientes adyacentes, impide el flujo al torrente del río de agroquímicos, productos orgánicos utilizados como insumos agrícolas y desechos agropecuarios, además de amortiguar algunos de los procesos de sedimentación de los lechos de los ríos (Treviño *et al.*, 2001). También los bosques riparios son altamente valorados por mantener la calidad del agua a través de la retención de sedimentos y nutrientes (Jolley *et al.*, 2010). En México, estos bosques se presentan en altitudes de 0 a 2800 m y entre las especies más características se encuentran algunas del género *Alnus* (Rzedowski, 1978).

3.2 Cambio climático

El calentamiento global es producto del incremento en la concentración de diversos gases en la atmósfera conocidos como de efecto invernadero, entre los que destacan: el bióxido de carbono que es responsable del 71.5 % del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990) y otros gases con concentraciones menores tales como el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), bióxido de azufre (SO₂), clorofluorocarbonos (CFC), ozono (O₃) y el vapor de agua presentando fluctuaciones anuales (Dixon *et al.*, 1994; Houghton y Woodwell, 1989).

El cambio climático global se compone de una serie de eventos meteorológicos que tienen influencia en el funcionamiento de los sistemas naturales; se manifiesta en alteraciones en la biodiversidad de los ecosistemas, en la productividad y fuentes de alimentos y por consiguiente, en la cotidianidad humana (Yepes, 2011). Para Prentice (2001), la variación de los fenómenos climáticos, como temperatura, patrones de precipitación, nivel del mar, nubosidad en relación a los promedios históricos, es lo que constituye el llamado cambio climático.

Yepes (2011), indica que existe un creciente interés por entender los procesos que componen el cambio climático global y su influencia en la dinámica del ciclo del carbono en los ecosistemas naturales, ya que las plantas son fundamentales en el balance global de este gas, por su capacidad de absorber CO₂ mediante la fotosíntesis, secuestrarlo en forma de celulosa o transformarlo en otro tipo de compuesto orgánico.

3.3. Efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero que son producidos naturalmente son indispensables para el desarrollo de la vida en el planeta al impedir que parte del calor solar que ingresa a la tierra regrese al espacio manteniendo con ello un equilibrio térmico en la tierra y llamados por esta misma razón gases de efecto invernadero.

Garduño (2004), sugiere respecto al concepto de efecto invernadero que se maneja en la actualidad que este debería denominarse propiamente *incremento*

antropógeno de efecto invernadero y a su correspondiente efecto en el clima, denominado comúnmente *calentamiento global* o *cambio climático global*, debe ponérsele el apellido *antropógeno* o *actual*, ya que estos son consecuencia del uso de combustibles fósiles por parte del hombre mientras que el efecto invernadero por sí mismo es benéfico, siempre ha existido y es consecuencia de la composición natural de la atmósfera y por él se tiene en la tierra una temperatura relativamente alta que ha propiciado el surgimiento y la evolución de la vida.

3.4 Bióxido de carbono

El CO₂ es un componente natural del aire y siempre ha existido en la atmósfera, lo que ha hecho el hombre es acrecentarlo y esto es lo que conlleva al aumento del efecto invernadero (Garduño, 2004), y las alteraciones en la composición atmosférica con el aumento en las concentraciones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero promueven al calentamiento de la atmósfera (Yepes, 2011).

El bióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero que contribuye mayormente al calentamiento global, su contribución se ha calculado de 50 a 75 % entre los gases traza (Díaz *et al.*, 2007). Los científicos han establecido que desde 1885 la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en un 25 % producto de la combustión de fósiles para la generación de energía y la deforestación a escala mundial (Yerena, 2011).

Otra causa en el incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera es debida al cambio de uso del suelo, este proceso de liberación de carbono a la

atmósfera es factible de revertir en alguna medida al proteger y conservar los ecosistemas arbóreos y arbustivos, así como mediante la aplicación de reforestación y restauración de ecosistemas degradados (Yerena, 2011).

3.5 Almacenes de carbono

Ante la preocupación por el constante aumento de este gas, se han implementado diferentes estrategias para capturar el carbono y así reducir la concentración del CO₂ en la atmósfera, ya sea a través de procesos bióticos o abióticos, el primer grupo comprende la fijación del CO₂ como biomasa sobre la superficie terrestre, principalmente por las plantas que son las que lo utilizan en el proceso de la fotosíntesis (Díaz *et al.*, 2007). En tanto que la captura de carbono por procesos abióticos consiste en la canalización del CO₂ producido en las industrias o fabricas hacia las profundidades del océano o dentro del manto freático (Kimble *et al.*, 2002).

El CO₂ es utilizado por las plantas para hacer fotosíntesis, que es el proceso por el cual las plantas producen compuestos orgánicos usados para su crecimiento y desarrollo, aproximadamente el 40 % de la masa seca de las plantas consiste en carbono fijado mediante la fotosíntesis (Yepes, 2011). Una vez que los productos de la fotosíntesis son convertidos en celulosa, se habla de secuestro de carbono (Buckeridge, 2008).

La vegetación juega un papel muy importante en la captura de carbono, ya que es a través de ella que se da el flujo de este elemento entre la atmósfera y el suelo, entre los principales atributos de la vegetación que afectan este flujo

están la productividad y la composición química del material; la productividad es la cantidad de biomasa derivada de la fotosíntesis y define la cantidad potencial de carbono que se puede incorporar al suelo mientras que la composición química afecta la velocidad de descomposición (Martínez, 2010).

3.6 Ecuaciones alométricas

Las ecuaciones alométricas son una herramienta fundamental para poder determinar a través de los contenidos de biomasa la capacidad de secuestrar carbono por parte de las especies vegetales presentes en un ecosistema. Los datos de la biomasa de los árboles son esenciales para evaluar el secuestro de carbono y su dinámica (Dixon *et al.*, 1994). En diversos estudios se ha empleado la biomasa de los árboles para estimar su contenido de carbono a través de la multiplicación de la cantidad disponible en una determinada superficie por un factor que va desde 0.40 hasta el 0.55, ya que varios autores han encontrado que es la proporción de carbono contenido en cualquier especie vegetal (Díaz *et al.*, 2007).

Para determinar el carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo se utiliza con regularidad el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50 % sin diferenciar especies (IPCC, 1996). Sin embargo, como lo señala Binkley *et al.* (2004), la biomasa de los árboles está relacionada con la adaptación de las plantas al ambiente. Por ello, al desarrollar ecuaciones alométricas para una especie en particular se puede obtener una estimación más acertada de la biomasa y su relación con las condiciones del medio (Litton y Kauffman, 2008).

Rügnitz (2008), define a una ecuación alométrica de biomasa como una herramienta matemática que permite conocer de forma simple, la cantidad de biomasa de un árbol por medio de la medición de otras variables y señala que estas ecuaciones son generadas a partir de los análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa (generalmente en peso seco) de los árboles y sus datos dimensionales (ej. altura, diámetro a la altura de pecho: $DAP_{1.3m}$). Dependiendo del número de variables independientes (datos dimensionales) la ecuación puede ser una regresión lineal simple (una única variable, ej. $DAP_{1.3m}$) o una regresión lineal múltiple (más de dos variables ej. $DAP_{1.3m}$, altura total, etc.) y dependiendo de las circunstancias las ecuaciones pueden ser lineales o no lineales. Para finalmente generar una ecuación alométrica, una vez que se ha determinado el contenido de biomasa en peso seco de los árboles muestreados y su respectivo $DAP_{1.3m}$ se pueden utilizar diversos modelos (Rügnitz *et al.*, 2008). En este trabajo se emplearán dos modelos. El Modelo 1 (Lineal), tomado de Rügnitz *et al.* (2008):

$$Y = B_0 + B_1 X_i \quad (\text{Modelo 1})$$

En dónde:

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$Y = \text{Biomasa aérea (kg)}$$

$$X = DAP \text{ (cm) y}$$

$$B_0 \text{ y } B_1, \text{ son los parámetros del modelo.}$$

Así como el Modelo 2 (Exponencial), tomado de Gayoso (2002) quien afirma que existe preferencia por emplear el modelo: $Y=b * X^k$, debido a que expresa una proporcionalidad de los incrementos relativos entre dos componentes del árbol además de ser ampliamente consistente para diversas formas de crecimiento.

$$Y = b * X^k, \quad (\text{Modelo 2})$$

En donde:

$Y = \text{Biomasa (kg)}$

$X = \text{Diámetro a la altura de pecho}$

$b \text{ y } k = \text{Parámetros de la función}$

Como lo señala Avendaño *et al.* (2009), conocer la cantidad de biomasa de las especies arbóreas es necesario para estimar la cantidad de carbono que captura un bosque, proceso que representa actualmente un servicio ambiental, y, por lo tanto, constituye una alternativa para el manejo de recursos naturales encaminada al desarrollo sustentable, y también para la obtención de algún bien para los propietarios de tales recursos.

3.6.1 Métodos destructivos y no destructivos para calcular biomasa aérea

Para poder generar ecuaciones alométricas uno de pasos ineludibles a realizar es determinar el contenido de biomasa aérea de la especie a evaluar. Siendo los métodos destructivos, consistentes en el derribo de los árboles y en la separación de sus componentes, los que principalmente se reportan para

determinar de la biomasa viva en la mayoría de la literatura referente a la generación de dichas ecuaciones (Acosta *et al.*, 2002; Avendaño *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2007). Este procedimiento tiene como desventaja la destrucción que se hace de los árboles.

Hay escasas ocasiones reportadas como en el trabajo para determinar las ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. *et* Cham de Díaz *et al.* (2007), en que, aunque se hayan talado y destruido los árboles utilizados para determinar la biomasa viva de esa especie, estos estaban ya de por sí programados para ser derribados y aprovechados en la producción de madera.

En contraste, los estudios en donde se hayan generado ecuaciones alométricas utilizando métodos no destructivos para la determinación de la biomasa viva sobre el suelo son muy escasos. Un ejemplo encontrado al respecto es el de Fehse *et al.* (2002) quien determinó el contenido de biomasa viva en *Alnus acuminata* y *Polylepis incana* sin necesidad de derribar los árboles. Para ello, Fehse *et al.* (2002) primero determinó la biomasa de los troncos mediante estimar su volumen y la densidad de la madera, y posteriormente al podar un porcentaje de las ramas y determinar su biomasa extrapoló los resultados al total de la copa. Finalmente la suma de la biomasa del tronco y de la copa generó la biomasa total del árbol.

Aunque los métodos no destructivos para estimar la biomasa aérea no estén tan desarrollados como los métodos destructivos, estos son de gran relevancia

si se considera que existen ocasiones en que se requiere determinar la biomasa en árboles que por alguna circunstancia no pueden ser derribados. Tal es el caso del estudio de Acosta *et al.* (2002), quien reporta que al desarrollar los trabajos en campo para estimar la biomasa aérea mediante el uso de ecuaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, en el caso de una de estas seis especies: inga (*Inga sp.*) solo pudieron muestrear 5 árboles, ya que en el terreno en que desarrollaron el trabajo esta especie se estaba usando como sombra en los cafetales y los productores no permitieron cortar un número mayor de árboles. En este caso los autores consideraron algunas ramas de los árboles podados como arboles de menor tamaño.

3.6.2 Estimación de biomasa mediante métodos no destructivos

El cálculo de la biomasa mediante métodos no destructivos es posible, como lo hizo Fehse *et al.* (2002) en su estudio para determinar la capacidad de secuestrar carbono de un bosque secundario de gran altitud. Este método en general se basa en la determinación de la biomasa del fuste mediante el cálculo de su volumen y la multiplicación de este valor por la densidad de la madera. Así, como en la poda de algunas ramas para determinar su biomasa y extrapolar los resultados a un inventario de número de ramas por árbol para asumir este resultado como la biomasa de la copa. Los resultados de la biomasa determinada en ambas estructuras se suman y el valor generado se considera como la biomasa total por árbol. Todo este proceso se realiza con los árboles en pie.

El trabajo en campo consiste en seleccionar árboles de diversas categorías diamétricas y medirles el $DAP_{1.3m}$, la altura de fuste limpio y la altura total. Posteriormente, el tronco se subdivide desde su base hasta la terminación del fuste limpio en secciones lo más rectas posibles a las cuales se les mide el diámetro basal y apical así como su longitud. Después se promedian ambos diámetros por sección y el resultado obtenido se utiliza junto con el valor de su longitud para calcular el volumen de cada una de estas secciones como si fueran un cilindro, utilizando para ello la fórmula para calcular el volumen de esa figura geométrica. Posteriormente, se suman los volúmenes individuales de cada una de las secciones en que se subdivide el tronco y el resultado se asume como el volumen total de este. Entre más retorcidos o menos rectos sean los troncos, se requerirá subdividirlos en un mayor número de secciones.

Adicionalmente se calcula el factor de forma de los árboles el cual es un factor de reducción que expresa la conicidad del tronco. El factor de forma es la relación que existe entre el volumen acumulado de las secciones del tronco (volumen real) y el volumen de un cuerpo geométrico de referencia cuyas dimensiones corresponden a las dimensiones generales del árbol ($DAP_{1.3m}$ y altura de fuste limpio) (Romahn *et al.*, 1994). Obtenidos los factores de forma de cada uno de los árboles evaluados, estos se suman y el promedio general se considera el factor de forma promedio de la especie.

Finalmente se determina la densidad de la madera y con ello se está en posibilidades de calcular la biomasa del tronco mediante la siguiente fórmula propuesta por Fehse *et al.* (2002):

$$BF = DM \left(\frac{1}{4} \pi (DAP)^2 \times Af \times Ff_x \right)$$

En donde:

BF = Biomasa del fuste (Mg)

DM = Densidad promedio de la madera (Mg m⁻³)

DAP = Diámetro a la altura del pecho (m)

Af = Altura de fuste limpio (m)

Ff_x = Factor de forma promedio de la especie

Por otra parte para estimar la biomasa de la copa de los árboles evaluados se requiere podar entre un 20 y 40 % de esta. Para ello se podan algunas ramas de cada árbol y estas se separan en los componentes: madera de las ramas y ramillas con hojas y se registran sus respectivos pesos frescos, de cada componente se toman muestras y se secan a 90 °C hasta que alcancen un peso constante. Después usando la relación peso seco-peso fresco se calcula la biomasa de las ramas y los resultados se extrapolan para estimar la biomasa total de la copa. Finalmente, para calcular de densidad de la madera, se toma una rama de cada árbol y se le corta una rodaja de la sección basal más pegada al tronco y es de estas rodajas de donde se obtiene el dato de densidad de la madera requerido para calcular junto con el dato del volumen del tronco la biomasa de este. Este método es un método no destructivo que tiene la ventaja de que aunque requiere de la poda parcial de la copa de los árboles no se necesita derribar a estos por completo para determinar su biomasa.

3.6.3 Estimación del contenido de carbono

Para determinar el contenido de carbono en una especie generalmente se toman muestras del mismo material que se secó para determinar los contenidos de biomasa por componente, para ello solo se tiene que determinar de qué árboles se tomarán las muestras. Estas muestras son molidas finalmente y submuestras de aproximadamente 50 g son utilizadas en laboratorio para determinar su contenido de carbono, una de las técnicas utilizadas para ello es el análisis por combustión seca con un analizador automático de carbono total provisto de una unidad para procesar muestras secas (Etchevers *et al.*, 2005). Como ejemplo del funcionamiento de estos equipos, Yerena *et al.* (2011), ejemplifican que el equipo denominado Solid TOC Analyzer determina la concentración de carbono en muestras solidas mediante combustión completa a una temperatura de 900 °C, los gases producto de la combustión son medidos a través de un detector infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en estos gases.

Como lo señala Díaz *et al.* (2007), el contenido de carbono de la biomasa total de un árbol es la suma del carbono en el fuste, ramas y follaje de este. Una vez obtenidos los resultados de laboratorio sobre el contenido de carbono de las muestras analizadas, para estimar el contenido de carbono en la biomasa total de los componentes de cada árbol se emplea la siguiente expresión:

$$CCC = BTC \times \% C$$

En donde:

CCC = Contenido de carbono por componente: fuste, madera de ramas y follaje (kg)

BTC = Biomasa total del componente (kg)

% C = Porcentaje de carbono del componente determinado en laboratorio

3.7 Estudios florísticos

Al realizar estudios sobre una masa vegetal, uno de los primeros pasos a seguir es determinar su composición botánica mediante un estudio florístico, lo que permite conocer en términos cuantitativos cuales son las especies presentes en esa comunidad. Posteriormente, con la información obtenida del inventario florístico se pueden derivar los índices de valor de importancia de las especies encontradas con lo que se determina la importancia ecológica y dominio florístico entre ellas. La importancia de realizar un estudio florístico radica en que como lo señala Schulze *et al.* (2000), 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 cada estrato por comunidad vegetal.

3.8 Índices de Valor de Importancia

Para caracterizar a los ecosistemas vegetales de forma cuantitativa, se han desarrollado una amplia gama de índices de acuerdo al fenómeno que se desea estudiar. Cuando se trata de evaluar su composición florística, se recomienda el Índice de Valor de Importancia (IVI), el cual considera la abundancia: número de árboles por especie, la frecuencia: existencia o falta de una especie en

determinada parcela y la dominancia: el grado de cobertura de las especies que es la expresión del espacio ocupado por ellas (Rügnitz *et al.*, 2008).

La densidad, frecuencia y dominancia individual respectivamente, son valores que como lo señala Acosta *et al.* (2006), muestran aspectos esenciales de la composición florística, pero en forma individual ninguno caracteriza la estructura florística. Para tener una visión más amplia, que señale la importancia de cada especie en el conjunto, se combinan los índices anteriores en una sola expresión, denominada IVIR, cuyo resultado es la suma de los valores relativos de abundancia o densidad, dominancia y frecuencia de cada especie (Acosta *et al.*, 2006). El análisis del IVIR permite también conocer como lo señala Rügnitz *et al.* (2008), cuáles son las especies más importantes en el uso específico de la tierra y el cálculo de este índice de valor de importancia se realiza mediante la siguiente ecuación (Stiling, 1999):

$$IVIR = \frac{Dr + Pr + Fr}{3}$$

En dónde:

IVIR= Índice de Valor de Importancia Relativo

Dr = Densidad relativa

Pr= Predominio relativo

Fr= Frecuencia relativa

$$Dr = \frac{D}{D1} (100)$$

Dónde: *D*= Densidad de cada especie y *D1*= Densidad de todas las especies

$$Pr = \frac{P}{P1} (100)$$

Dónde: *P*= Área basal de cada especie y *P1*= Área basal de todas las especies

$$Fr = \frac{F}{F1} (100)$$

Dónde: *F*= Número de parcelas en que ocurre cada especie y *F1*= Número de parcelas muestreadas

3.9 Área mínima de muestreo

Al realizar estudios sobre una comunidad vegetal para determinar su composición florística, uno de los criterios iniciales a definir es el tamaño de parcela a muestrear para la obtención de datos confiables, aunque generalmente, para el muestreo de herbáceas, arbustos y árboles se utilizan las áreas de parcela ya estandarizadas de 1 m², 4 m² y 10 m² respectivamente. Algunos autores como Müller y Ellenberg (1974), proponen para comunidades vegetales de climas templados los siguientes valores empíricos:

Bosque (estrato arboreo)	de	200	a	500 m ²
Bosque (estrato herbaceo)	de	50	a	200 m ²
Pastizal seco	de	30	a	100 m ²
Matorral	de	10	a	25 m ²
Comunidades de musgo	de	1	a	4 m ²
Comunidades de líquenes	de	0.1	a	1 m ²

Sin embargo, para definir un área de muestreo específica para una comunidad en particular, una técnica para lograrlo es la del área mínima. Franco (1995), señala que para las comunidades vegetales, el área mínima de muestreo se obtiene antes de realizar estudios ecológicos definiéndola como el área más pequeña que representa adecuadamente la composición de especies de la comunidad. Garmendia (2005), la define como la menor superficie de terreno que contiene casi la totalidad de las especies de una determina comunidad.

El método usual para determinar el área mínima de muestreo es el de puntos anidados (Franco, 1995). Como lo señala Garmendia (2005), para desarrollar este método se muestrean unidades contiguas de forma anidada (la muestra siguiente siempre incluye a la anterior), de extensión progresivamente mayor y se registran todas las especies diferentes que se vayan encontrando (Figura 1).

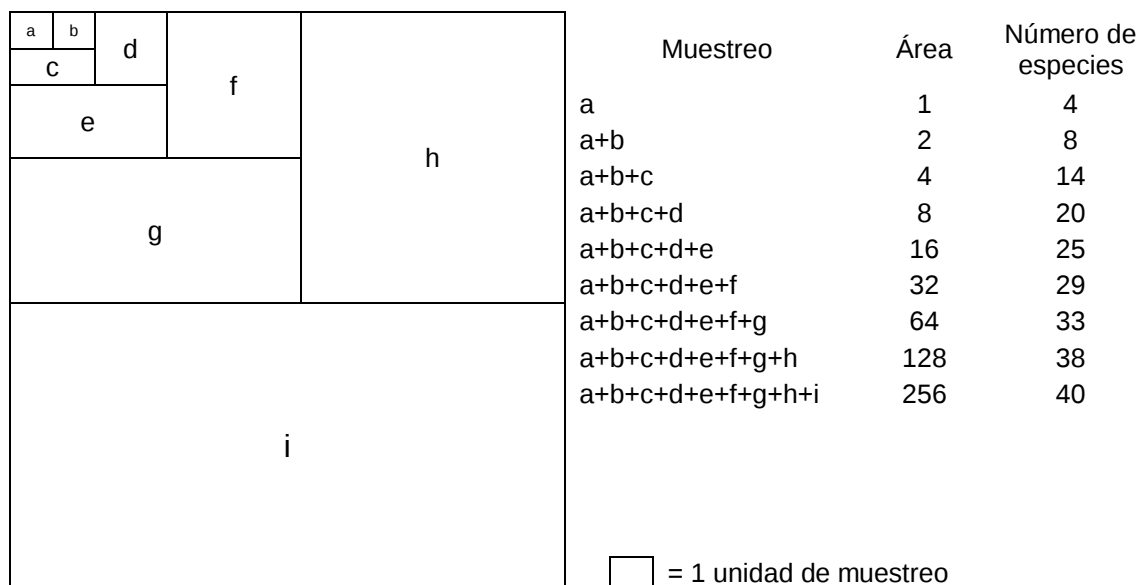


Figura 1. Parcelas anidadas para la determinación de la curva especies-área (Garmendia, 2005).

La representación en una gráfica de los datos obtenidos (área muestreada- número de especies) genera la curva especies-área, luego se aplica algún criterio arbitrario que defina el área mínima, como aquella superficie que contenga el 80 % de las especies halladas (Garmendia, 2005). O como lo indica Franco (1995), el área muestral donde la curva se hace horizontal (Figura 2).

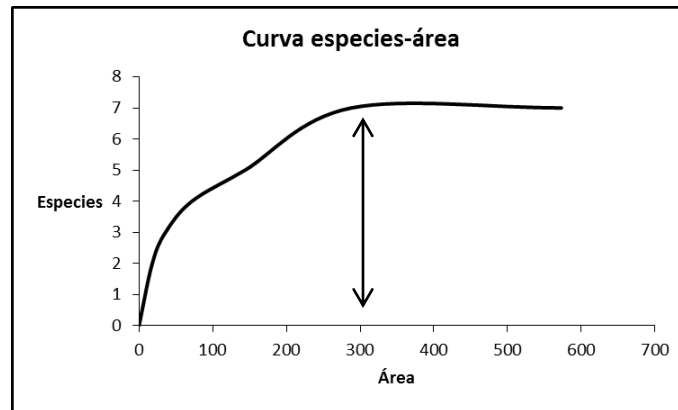


Figura 2. Área mínima de muestreo generada mediante la curva especies-área (Franco, 1995).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

El presente trabajo se desarrolló sobre un transecto del bosque de galería del río Texcoco de aproximadamente un kilómetro de longitud (960 m) dentro de la comunidad de San Pablo Ixayoc perteneciente al municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 3). El municipio de Texcoco está ubicado al oriente del Estado de México y colinda al norte con Tepetlaoxtoc, Papalotla y Chiconcuac; al sur con Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca; al oeste con Atenco y al este con los estados de Tlaxcala y Puebla. Sus coordenadas geográficas se encuentran entre los paralelos 19° 23' 40" y 19° 33' 41" Norte y los meridianos 98° 52' 58" y 99° 01' 45" a una altitud promedio de 2278 msnm (INEGI, 2001).

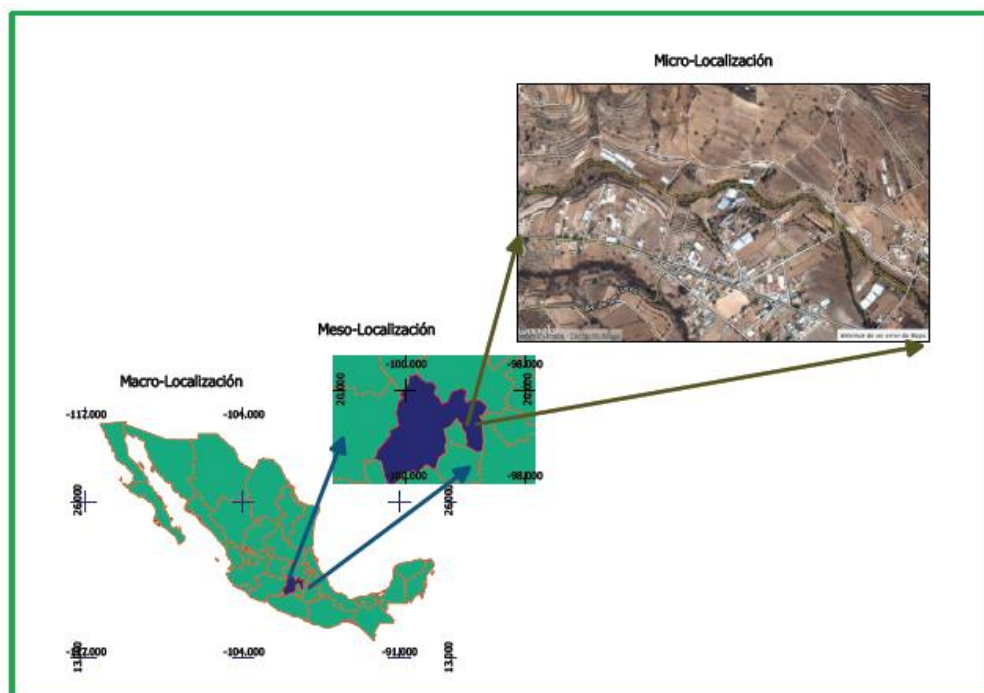


Figura 3. Localización del transecto de estudio.

Como se indicó, el sitio específico de trabajo fue un transecto del bosque de galería del río Texcoco de aproximadamente un kilómetro de longitud. Para seleccionar dicho transecto se realizó un recorrido físico en la parte alta del río Texcoco buscando localizar áreas del bosque de galería bajo el criterio mejor estado de conservación y abundancia de la vegetación riparia, dicha vegetación fue encontrada en la parte alta del río, específicamente en la sección que atraviesa el poblado de San Pablo Ixayoc (Figura 4).



Figura 4. Copas y fustes de algunos árboles del transecto evaluado.

El punto inicial del transecto fue el puente Zacasolco y el punto final fue el puente Aclamaxa. Las coordenadas geográficas de ambos lugares así como la altura sobre el nivel del mar de estos fueron obtenidas con un GPS marca Garmin modelo etrex Summit HC (Cuadro 1).

Cuadro 1. Localización del transecto.

Punto	Lugar	Latitud	Longitud	Altitud
1	Zacasolco	19° 28' 44.9"	98° 47' 55.7"	2512 msnm
2	Aclamaxa	19° 28' 56.6"	98° 48' 43.8"	2463 msnm

4.2 Vegetación

En el caso de la vegetación arbórea del área de estudio, esta varía según el gradiente altitudinal, a la altura del poblado de San Pablo Ixayoc se presentan los bosques de encino, dominados por diferentes especies del género *Quercus* (encinos o robles), estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas pudiendo alcanzar desde los 4 hasta los 30 m de altura; pueden ser abiertos o muy densos y se desarrollan en diversas condiciones ecológicas (Martínez, 2010).

Los bosques de encino históricamente han dominado grandes áreas de las tierras altas de las zonas tropicales y subtropicales de México (Gómez *et al.*, 2011). En el área, los bosque de encino y mixto de encino están constituidos por varias especies arbóreas siendo la especie dominante *Quercus rugosa* seguida de *Quercus laurina* y *Arbutus xalapensis* (Sánchez y López, 2003).

4.3 Clima

El clima del área de estudio es semifrío y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 5 y 12 °C. La temperatura media del mes más frío varía de -3 a 18 °C y la del mes más cálido entre 6.5 y 22 °C siendo este el mes más húmedo de los climas semifríos subhúmedos con lluvias en verano. La precipitación del mes más seco es menor a 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor a 5 mm. La precipitación total anual varía a lo largo del gradiente altitudinal en la zona registrándose precipitaciones de 800 mm en la parte baja y

de hasta 1200 mm en la parte más alta donde se encuentra el bosque de pino y pradera alpina (INEGI, 2001).

4.4 Suelos

El área de trabajo se localiza sobre la cordillera Sierra Nevada y los suelos que se presentan en el área son Feozem en la parte alta baja y Cambisol en la parte más alta ambos de textura media. Los suelos Feozem se caracterizan por presentar un horizonte A mólico, suave, con alta cantidad de materia orgánica y saturación de bases mayor de 50 % por lo que el contenido de nutrientes como calcio, magnesio y potasio es elevado. La formación de estos suelos es debida en gran parte al intemperismo de las rocas de origen extrusivo que abundan en la zona y su drenaje interno varía de drenado a moderadamente drenado. Su uso se ve limitado por la presencia de una capa lítica (rocosa) o dúrica (tepetate) a menos de 50 cm de profundidad (INEGI, 2001).

Los suelos Cambisoles son jóvenes y poco desarrollados, presentando un horizonte A ócrico o úmblico y un horizonte B cámbrico o la presencia de un duripán o fragipán. La formación de estos se debe en gran parte al clima pues son típicos de zonas de transición climática (INEGI, 2001). En el área se presentan las siguientes dos subunidades: Cambisol éutrico, el cual presenta un horizonte A ócrico y un horizonte B cámbico con un porcentaje de saturación de bases de 50 % o más, por lo que su contenido de nutrientes puede ser abundante (INEGI, 2001).

4.5. Área mínima de muestreo

Para iniciar el análisis florístico del transecto seleccionado, debido a que no se encontró en la literatura un área mínima de parcela a muestrear reportada para bosques de galería, se decidió crear un área mínima de muestreo específica para este estudio mediante la generación de la curva especies-área propuesta por Garmendia (2005) en vez de utilizar un área de muestreo estandarizada como las propuestas por Müller y Ellenberg (1974).

Antes de iniciar en campo el establecimiento de las unidades de anidación para generar la curva especies-área, se analizó que al determinar el área mínima de muestreo en bosques, selvas, pastizales, cultivos, o en ecosistemas en donde la vegetación se distribuye de forma bastante uniforme dentro del terreno se genera un área mínima de muestreo generalmente de forma cuadrada. Sin embargo, debido a que la vegetación riparia presenta un patrón de distribución distinto al de la mayoría de los ecosistemas mencionados en donde esta vegetación no se desarrolla hacia los cuatro puntos cardinales del terreno sino que esta crece en bandas zigzagueantes y adyacentes a lo largo de la corriente de agua de los ríos, se determinó conveniente realizar dos modificaciones a la metodología de Garmendia (2005), de tal manera que se pudiera obtener una área mínima de muestreo eficiente de acuerdo el patrón de distribución natural de la vegetación riparia.

La primera modificación obedeció al patrón de distribución longitudinal de la vegetación riparia y consistió en favorecer a lo largo del río el establecimiento

también longitudinal de las unidades de anidación para que estas quedaran localizadas solo sobre la franja de vegetación riparia y no se extendieran hacia los costados del río en donde esta vegetación ya no está presente (Figura 5).

La segunda modificación se debió a que aunque la vegetación riparia se distribuye en forma primordialmente longitudinal, esta no es en línea recta, sino que sigue el contorno del cauce de los ríos. Por ello, tomando en cuenta que el río Texcoco corre de este a oeste, fue necesario que las unidades de anidación se fueran colocando longitudinalmente debido a la primera modificación mencionada y adyacentes unas de otras, como lo indica la metodología, pero su ubicación individual se fue cargando hacia el costado norte o sur del río, es decir, siguiendo el patrón zigzagueante de la corriente de agua y por ende siguiendo también el patrón zigzagueante de la vegetación riparia (Figura 5).

Una vez definidos los dos ajustes mencionados se buscó dentro del transecto un lugar en donde visualmente se observara una concentración representativa de su vegetación para desarrollar ahí los trabajos de generación del área mínima de muestreo. Este lugar se encontró en la parte alta del transecto, a 200 m hacia abajo del puente Zacasolco, y ahí se iniciaron los trabajos en campo para definir las dimensiones de las unidades de anidación y el lugar en donde establecer la primera de estas. Así, al considerar que en este punto del transecto la vegetación riparia visualmente era similar a ambos lados de la corriente de agua, se concluyó que la primera unidad de anidación debería quedar establecida solo sobre uno de los costados del río, por lo que la primera unidad de anidación se estableció por decisión aleatoria sobre su costado sur.

Para generar las dimensiones de las unidades de anidación se decidió que estas abarcaran desde el centro de la corriente de agua hasta la orilla externa sur del bosque de galería, esto para incluir tanto a la vegetación riparia cercana a la corriente de agua así como aquella localizada sobre los costados del río y que es la vegetación que compone propiamente el bosque de galería. En consecuencia la longitud existente desde el centro de la corriente de agua hasta la orilla sur del bosque de galería, la cual midió 6 m, determinó las dimensiones de las unidades de anidación las cuales midieron 6 m de largo x 6 m de ancho. Una vez definido el lugar en donde se ubicaría la primera unidad de anidación así como las dimensiones de esta, se procedió a trazar sus medidas sobre el suelo. Después se clavaron estacas de madera sobre cada una de las cuatro esquinas que formaban esta primera unidad de anidación y sobre estas se tensaron cuerdas de rafia para delimitarla físicamente, finalmente esta unidad se escuadró utilizando para ello una escuadra de carpintero (Figura 5).



Figura 5. Establecimiento y delimitación física de la primera unidad de anidación.

Establecida la primera unidad de anidación (a) se procedió a registrar como lo indicaba la metodología el número de especies presentes dentro de esta área

asignándole un número a cada especie encontrada. En esta primera unidad de 36 m² se encontraron dos especies de árboles (Figura 6. Cuadro rojo).

La segunda unidad de anidación (b) de dimensiones y área igual a la anterior (6 m x 6 m, 36 m²), se estableció contigua a la primera pero hacia el lado norte del río. Al establecer esta unidad hacia el costado norte del río y considerado que la primera unidad de anidación se estableció sobre el costado sur de este, se logró abarcar toda la franja transversal de vegetación riparia presente en este punto a ambos lados de la corriente de agua. Al igual que en la primera unidad de anidación y en todas las subsecuentes se registraron las especies arbóreas presentes pero poniendo especial atención a detectar la aparición de nuevas especies y se registró también la cantidad de individuos presentes por especie. En esta segunda unidad se registró la presencia de una especie nueva más (Figura 6. Cuadro negro).

La tercera unidad de anidación (c) ahora de dimensiones 6 m x 12 m y 72 m² de área, se estableció adyacente a las dos primeras, hacia el lado este del río pero cargada hacia el costado sur del mismo. La ubicación de esta tercera unidad cargada hacia el costado sur del río obedeció al hecho ya expuesto de que las unidades de anidación se fueron estableciendo de tal manera que siguieran el contorno de la corriente de agua y por ende abarcaran la vegetación riparia la cual también sigue el patrón zigzagante del río. Esta tercera unidad de 72 m² registró la presencia una nueva especie arbórea (Figura 6. Cuadros azules).

La cuarta unidad de anidación (d) de dimensiones 12 m x 12 m y área 144 m², se estableció adyacente a la unidad de anidación c, también hacia el lado este del río pero la primera mitad del área de esta unidad se cargó hacia el costado sur del río y la segunda mitad se cargó hacia el lado norte del mismo. Al ubicar esta cuarta unidad con sus mitades cargadas hacia distintos costado del río se logró contener eficazmente dentro de ellas la zigzagueante vegetación riparia presente en esta sección. En esta cuarta unidad de 144 m² se registró una especie nueva (Figura 6. Cuadros amarillos).

Debido a que al seguir duplicando el área de las parcelas de anidación se continuaba registrando la presencia de al menos una nueva especie arbórea, se determinó establecer una quinta unidad de anidación cuyas dimensiones y área cumpliendo con la metodología utilizada tuvieron que ser iguales a las dimensiones y área acumuladas de las unidades anidadas previamente. Así esta quinta unidad de anidación (e) midió 12 m x 24 m, teniendo un área de 288 m². Esta unidad se ubicó también adyacente a la última (d) y también hacía el lado este del río, pero para su establecimiento esta tuvo que ser dividida en dos secciones iguales, estableciendo su primera mitad cargada hacia el costado sur del río y la segunda hacia el lado norte, ello para continuar cubriendo la zigzagueante vegetación riparia. En esta unidad se registró la aparición de dos nuevas especies arbóreas (Figura 6. Cuadros rosas).

Al continuar registrándose la presencia de nuevas especies en la última unidad de anidación fue necesario según la metodología añadir una nueva unidad, debiendo ser de dimensiones y área igual al doble de las dimensiones y área de

todas las unidades anidadas anteriormente. Esta unidad (f) midió 12 m x 48 m y 576 m² de área, siendo la unidad establecida de mayores dimensiones. En esta unidad a pesar de tener un área del doble de todas las unidades anteriores ya no se registró la aparición de nuevas especie (Figura 6. Cuadros verdes).

Al ya no haberse registrado la presencia de nuevas especies arbóreas en esta última unidad de anidación y considerando que su área era del doble del área en donde se registró la aparición de la última especie arbórea, se decidió como lo señala la metodología ya no establecer más unidades de anidación. Se procedió entonces a graficar la información obtenida para generar la curva especies-área y en base a los resultados obtenidos con dicha curva quedó definido el tamaño mínimo de parcela a muestrear.

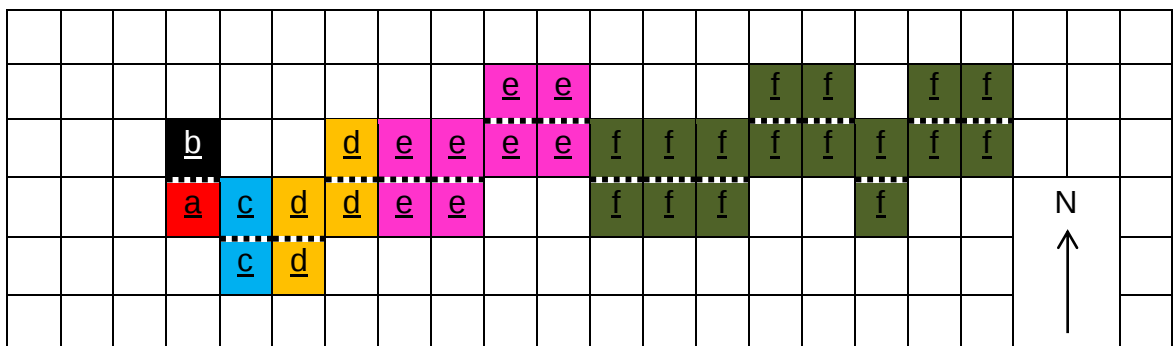


Figura 6. Unidades de anidación establecidas en forma longitudinal y zigzagueante sobre los costados del río Texcoco representado por la línea punteada (Elaboración propia).

4.6 Análisis florístico del área de estudio

Una vez definida el área mínima de muestreo, se realizó el inventario forestal de todo el transecto bajo estudio mediante un barrido florístico cuantitativo el cual inició en la parte alta del transecto exactamente a la altura del puente Zacasolco y terminó en la parte baja de este a la altura del puente Aclamaxa.

Para ello, el transecto se fue dividiendo conforme se descendía en áreas mínimas con las dimensiones previamente determinadas. Dentro de cada una de estas áreas mínimas se contabilizaron todos los árboles presentes con un $DAP_{1.3m}$ mayor a 5 cm y se registró el número de especie a la que pertenecía cada uno de ellos así como su $DAP_{1.3m}$ correspondiente. De todas las especies arbóreas encontradas se tomaron muestras de material vegetal el cual fue secado y montado para su identificación en herbario y con ello se obtuvo la composición botánica arbórea del transecto (Figura 7).



Figura 7. Material vegetal prensado y montado para su identificación.

4.7 Índices de Valor de Importancia

Los IVI absolutos y relativos de las especies que conformaron la composición botánica del transecto se calcularon mediante las siguientes ecuaciones (Franco, 1995; Garmendia, 2005; Stiling, 1999):

$$IVI = Dr + Pr + Fr$$

$$IVIR = \frac{Dr + Pr + Fr}{3}$$

En dónde:

IVI = Índice de Valor de Importancia absoluto,

IVI (%) = Índice de Valor de Importancia relativo,

Dr= Densidad relativa,

Pr= Cobertura o predominio relativo y

Fr= Frecuencia relativa.

$$Dr = \frac{D}{D1} (100)$$

Dónde: *D= Densidad de cada especie y D1= Densidad de todas las especies*

$$Pr = \frac{P}{P1} (100)$$

Dónde: *P= Cobertura o área basal de cada especie y P1= Cobertura o área basal de todas las especies.*

$$\text{Área basal} = A = \pi r^2$$

$$Fr = \frac{F}{F1} (100)$$

Dónde: *F = Número de parcelas en que ocurre cada especie y F1= Número de parcelas muestreadas.*

Para poder desarrollar las ecuaciones anteriores se utilizó la información previamente obtenida durante el barrido florístico cuantitativo el cual generó el inventario forestal. Así, la suma de todos los individuos pertenecientes a una especie en particular generó el dato de densidad por especie (D), mientras que la suma de todos los individuos de todas las especies generó la densidad absoluta de todas las especies del transecto (D1). A su vez la suma de las

áreas basales de todos los individuos de cada especie generó el valor de cobertura, área basal o predominio por especie (P), mientras que la suma de las áreas basales de todos los individuos de todas las especies generó la cobertura, área basal o predominio de todas las especies (P1). Al contabilizar en cuantas de las áreas mínimas en que se dividió el transecto apareció cierta especie se obtuvo el número de parcelas en que ocurre cada especie (F), mientras que al sumar el total de áreas mínimas en que aparece cada especie se obtuvo el número total de unidades mínimas muestreadas (F1).

Obtenida la información anterior se generaron los valores relativos de las variables densidad relativa (Dr), cobertura o predominio relativo (Pr) y frecuencia relativa (Fr). Con estos valores se generaron los índices de valor de importancia para las especies que conformaron la composición florística del transecto estudiado.

4.8 Generación de ecuaciones alométricas para biomasa y carbono

El aile, (*Alnus acuminata* Kunth), obtuvo el mayor índice de valor de importancia por lo que para cumplir con el tercer objetivo propuesto en este trabajo se seleccionó esta especie para generar las ecuaciones alométricas correspondientes que determinaran su contenido de biomasa y carbono.

4.9 Cálculo de la biomasa aérea

Para determinar la biomasa área de la especie se utilizó un método no destructivo (Fehse *et al.*, 2002). Este de manera general se basó en el cálculo

del volumen del tronco y la determinación de la densidad de la madera para obtener su biomasa. Después se podaron algunas ramas y se obtuvieron sus valores de peso fresco y contenido de humedad. Con esta información se obtuvo su biomasa en peso de las ramas y los resultados se extrapolaron a un inventario de ramas por árbol con lo que obtuvo la biomasa de la copa.

Para desarrollar la metodología de Fehse *et al.* (2002), se seleccionaron 10 árboles sin problemas fitosanitarios visibles, de categorías diamétricas mayores a 10 cm, y con troncos verticales. A todos se les midió el $DAP_{1.3m}$ con una cinta diamétrica y con una tabla hipsométrica se determinó su altura total.

4.9.1 Cálculo del volumen de los fustes

Con los árboles en pie cada uno de los fustes de los 10 árboles evaluados fue subdividido ascendentemente en secciones lo más cilíndricas posible, para ello se procuró que el cambio de dimensiones entre el diámetro basal y apical de cada sección fuera lo menos drástico posible.

Delimitada cada sección sus extremos fueron marcados sobre los troncos con líneas horizontales de aproximadamente 15 cm de longitud hechas con una segueta de uso forestal. Después a cada sección se le midió el diámetro basal y apical, y la distancia existente entre estos dos puntos se consideró como la longitud de cada una de estas (Figura 8).

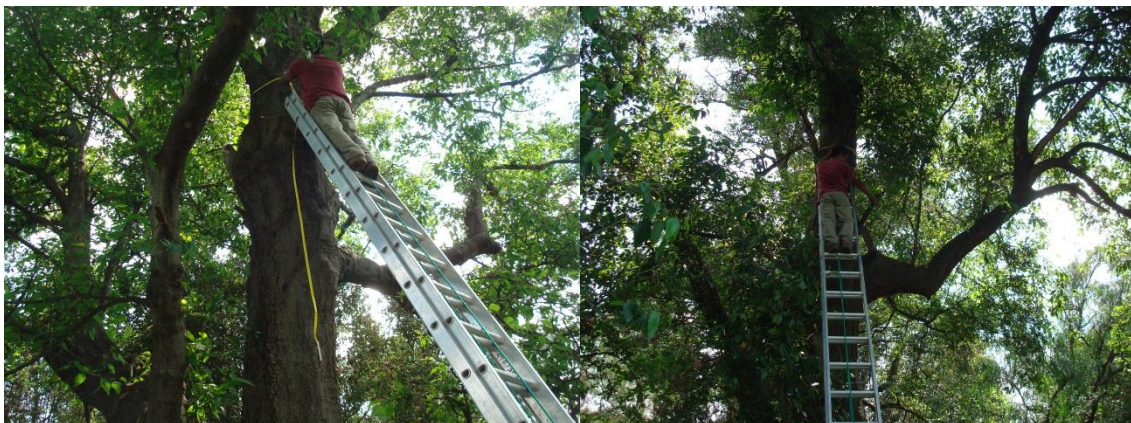


Figura 8. División de los fustes en secciones cilíndricas y medición de sus respectivos diámetros y longitud.

Una vez obtenidas las dimensiones de cada sección se calculó su volumen como si estas hubieran sido de forma cilíndrica perfecta, empleando para ello la siguiente fórmula matemática utilizada para el cálculo del volumen del cilindro:

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

En donde:

$$\pi = 3.1416$$

$$r = \text{Radio}$$

$$h = \text{Altura}$$

Para desarrollar esta fórmula y obtener los respectivos radios, se tomó como diámetro de cada sección del fuste el promedio entre el diámetro superior e inferior de estas y como la altura su longitud individual. La altura de fuste limpio de los árboles se asumió como la suma de las longitudes individuales de las secciones en que fueron subdivididos y su volumen total se asumió como la suma de los volúmenes individuales de sus respectivas secciones.

4.9.2 Determinación del factor de forma de la especie

El factor de forma de un árbol es un factor de reducción que indica la conicidad de este. Se expresa como el volumen real del árbol dividido por el volumen de un sólido cilíndrico de referencia cuyas dimensiones corresponden al $DAP_{1.3m}$ y altura del árbol que representa (Romahn *et al.*, 1994).

Para determinar el factor de forma individual de cada árbol evaluado, una vez obtenido el volumen real de cada fuste limpio se calculó mediante la fórmula del cilindro el volumen de cada uno de los cuerpos geométricos de referencia utilizando para ello el $DAP_{1.3m}$ y la altura de fuste limpio correspondiente a cada árbol. Así, el factor de forma de cada árbol fue igual al resultado de dividir el volumen real del fuste limpio, obtenido en el paso anterior, entre el volumen del cuerpo de referencia correspondiente y el factor de forma de la especie fue igual al promedio de los factores de forma individuales.

Una vez obtenido el factor de forma de la especie se detuvo el proceso de estimación de la biomasa de los fustes. Esto debido a que para poder continuar con dicha estimación se requería contar con el valor de la densidad de la madera. Por ello se inició el proceso de determinación de la biomasa de la copa ya que la densidad de la madera se obtendría al analizar muestras del área basal de las ramas podadas a la copa para determinar la biomasa de esta.

4.9.3 Determinación de la biomasa de la copa

La determinación de la biomasa de la copa de los 10 árboles evaluados inició con la clasificación de sus ramas en cuatro categorías diamétricas: delgadas, medianas, gruesas y extra gruesas, con diámetros entre 5 y 10, 10 y 15, 15 y 20, y entre 20 y 25 cm respectivamente.

Posteriormente basándose en esta clasificación se realizó un inventario por árbol, contabilizando el número de ramas con que contaba cada uno y la categoría diamétrica a la que pertenecía cada una de ellas. Después con una segueta de uso forestal se podó a cada árbol una sola rama de cada una de las categorías diamétricas con las que contaba. Todas las ramas podadas fueron separadas en sus componentes madera y ramillas con hojas y se registraron los respectivos pesos frescos. Adicionalmente se cortó una rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor de la base de cada rama podada para determinar en estas su porcentaje de humedad y la densidad de la madera.

Las rodajas de madera obtenidas y muestras del componente ramillas con hojas fueron colectadas, identificadas, pesadas y secadas hasta que alcanzaron su peso constante y con los resultados obtenidos se calculó el porcentaje de humedad promedio por componente. Finalmente los valores de la biomasa total en peso fresco de cada componente por árbol se utilizaron junto con sus respectivos valores de porcentaje promedio de humedad para estimar el aporte en peso seco de cada uno de estos dos componentes a la biomasa de la copa de los árboles.

4.9.3.1 Determinación de la biomasa de las ramas

Conforme se podaron las ramas estas se separaron utilizando un machete en los componentes madera de las ramas y ramillas con hojas y se obtuvo *in situ* con la ayuda de una báscula de reloj con capacidad de 15 kg el peso fresco de ambos componentes. En el caso de las ramas de la categoría extra gruesas, debido a la reducida capacidad de peso de la báscula utilizada y a él gran volumen y peso de estas ramas, primero se tuvo que retirar de estas el componente ramillas con hojas y después tuvieron que ser troceadas con la misma sierra eléctrica con que fueron cortadas para poder pesar cada troza individualmente y obtener el peso fresco de cada rama mediante la sumatoria del peso fresco de cada una de sus trozas (Figura 9).



Figura 9. Pesaje *in situ* de la madera de las ramas y ramillas con hojas.

Los valores del peso fresco de la madera de las ramas se agruparon según la categoría diamétrica de la rama a la que pertenecían y se promediaron para generar el peso fresco de este componente por cada categoría diamétrica. De manera similar los valores del peso fresco del componente ramillas con hojas

quedaron agrupados de la misma forma en que quedaron las ramas a las que pertenecían.

Todo el material vegetal obtenido una vez pesado fue dejado en campo, solamente se cortó una rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor de la parte basal de cada una de las ramas podadas y se colectó una muestra de 500 g por árbol del componente ramillas con follaje para determinar sus respectivos valores de peso seco y contenidos de humedad. Todas las muestras fueron debidamente etiquetadas y trasladadas al Laboratorio de Química de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo en donde se registró el peso fresco de las rodajas obtenidas con la ayuda de una báscula marca Volke SF-400 con capacidad de 5 kg. Posteriormente todo el material se colocó en una estufa de secado a 90 °C hasta que alcanzó un peso constante, (Figura 10).



Figura 10. Muestras del componente madera de las ramas y ramillas con hojas.

Con los valores del peso fresco y del peso seco tanto de las rodajas de madera como de las muestras del componente ramillas con hojas se calculó el porcentaje de humedad de cada muestra utilizando la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{Pf - Ps}{Pf} (100)$$

En donde:

CH = Contenido de humedad en porcentaje

Pf = Peso fresco de la muestra (g)

Ps = Peso seco de la muestra (g)

Una vez generado el contenido de humedad en porcentaje de cada muestra estos se promediaron por componente y los resultados se asumieron como el contenido de humedad promedio tanto del componente madera de las ramas como del componente ramillas con hojas. Después estos valores de porcentaje de humedad de cada componente se utilizaron para obtener el aporte de la biomasa en peso fresco de cada uno de estos componentes a la biomasa en peso seco de la copa mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$B = Pf - (Pf \times CH)$$

En donde:

B = Biomasa en peso seco

Pf = Peso fresco de la muestra

CH = Contenido de humedad de la muestra en porcentaje

Posteriormente los valores de la biomasa en peso seco de cada componente se sumaron para obtener el valor total de la biomasa en peso seco de la copa de cada uno de los 10 árboles de aile evaluados.

4.9.4 Determinación de la densidad de la madera

La densidad de la madera se determinó utilizando los valores del peso seco de 10 rodajas de madera y un recipiente de volumen conocido con arena para estimar el volumen de estas, empleando para ello la siguiente ecuación:

$$DM = \frac{Peso (g)}{Vol (cm^3)}$$

En donde:

$$DM = \text{Densidad de la madera (g/cm}^3\text{)}$$

$$Vol = \text{Volumen (cm}^3\text{)}$$

El recipiente utilizado para calcular el volumen de cada una de las 10 rodajas seleccionadas fue un contenedor de plástico de forma neiloide o cono truncado al cual se le determinó su volumen mediante la siguiente fórmula utilizada para calcular el volumen de dicha figura geométrica:

$$Vol = \frac{1}{3} \pi \cdot h(R^2 + r^2 + R \cdot r)$$

En donde:

$$Vol = \text{Volumen en cm}^3$$

$$\pi = 3.1416$$

$$h = \text{Altura}$$

$$R = \text{Radio mayor}$$

$$r = \text{Radio menor}$$

La arena utilizada fue una mezcla comercial de piedra molida fabricada por la empresa Cantocreto PALSA S.A de C.V. Esta mezcla se tamizó para lograr la uniformidad de sus partículas en una malla No.60 de la marca DVUES. El volumen de arena tamizado fue del doble del volumen del contenedor previamente descrito. Este proceso se realizó en el Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

El procedimiento de determinación de la densidad de la madera consistió en primero determinar el volumen del contenedor y su peso. Después toda la arena tamizada se vertió dentro del contenedor y el exceso formó un montículo. Posteriormente el montículo de arena fue desbastado con una regla sin presionar el material hacia abajo, esto con el objetivo de que en el contenedor solo quedara la arena que de manera natural cupo en él. Terminado el desbaste se pesó el contenedor con todo y arena y a este valor se le restó el peso del contenedor vacío, de esta forma se obtuvo el peso del volumen de arena contenida en dicho recipiente. (Figura 11).



Figura 11. Llenado con arena del recipiente de volumen conocido y desbaste del montículo formado.

Todo exceso de arena se desechó y solo se conservó la contenida dentro del recipiente siendo este volumen de arena con el que se trabajó para determinar el volumen individual de cada rodaja de madera.

Para determinar el volumen de cada una de las 10 rodajas seleccionadas, el recipiente vacío fue colocado sobre papel periódico y cuidadosamente se vació dentro de este una capa de arena de aproximadamente 5 cm de espesor. Sobre esta capa se colocó la rodaja de madera a evaluar y posteriormente se continuó el vaciado de toda la arena restante. Debido a la presencia de la muestra de madera en el interior del contendor, en las 10 determinaciones de volumen realizadas se formó un montículo de arena de tamaño proporcional al de la muestra presente en el interior. Este fue siempre desbastado en la forma descrita anteriormente cuidando siempre no perder arena (Figura 12).



Figura 12. Determinación del volumen de las muestras de madera.

El montículo de arena formado en cada evaluación, considerado la arena desplazada, siempre se colectó y peso. Finalmente mediante la relación del volumen y peso de arena contenida en el recipiente y el peso de la arena

desplazada en cada evaluación se obtuvo el volumen de dicha arena desplazada, el cual se asumió como el volumen de la muestra de madera evaluada que generó dicho desplazamiento. Con el peso de cada muestra y su respectivo volumen se calculó su densidad y el promedio de la densidad de las 10 rodajas de madera evaluadas generó la densidad de la madera de la especie.

4.9.5 Cálculo de la biomasa del fuste

Una vez obtenido el valor de la densidad de la madera junto con los valores del DAP de los árboles, la altura de fuste limpio y el factor de forma promedio de la especie se calculó la biomasa del tronco de cada árbol utilizando para ello la siguiente ecuación empleada por Fehse *et al.* (2002):

$$BF = DM \left(\frac{1}{4} \pi (DAP)^2 \times Af \times Ff_{\bar{x}} \right)$$

En donde:

$$Bf = \text{Biomasa del fuste (Mg)}$$

$$DM = \text{Densidad promedio de la madera (Mg m}^{-3}\text{)}$$

$$DAP = \text{Diámetro a la altura del pecho (m)}$$

$$Af = \text{Altura de fuste limpio (m)}$$

$$Ff_{\bar{x}} = \text{Factor de forma promedio de la especie}$$

Al haberse determinado los valores de la biomasa en peso seco del fuste de cada árbol estos se sumaron a los valores de la biomasa en peso seco de su respectiva copa y de esta forma se obtuvo la biomasa aérea total de cada árbol evaluado. Terminado este proceso se inició la determinación del contenido de carbono presente en las ramas podadas.

4.9.6 Determinación del contenido de carbono

De los 10 árboles evaluados para la estimación de su biomasa se eligieron cinco para determinar el contenido de carbono en sus ramas. Los árboles seleccionados cubrieron equitativamente el rango de diámetros de los árboles muestreados. Se analizaron un total de diez muestras, cinco del componente madera de las ramas y cinco del componente ramillas con hojas, para ello aproximadamente 100 g del material vegetal de cada componente se molió hasta pulverizarlo y de este material se tomaron submuestras de 50 g las cuales fueron analizadas en el Colegio de Postgraduados. Los análisis se realizaron por combustión seca a 900 °C en el autodeterminador automático de carbono marca Shimadzu Modelo TOC SSM 5050A de acuerdo a los procedimientos del Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1992).

Para estimar el contenido de carbono en la biomasa de los componentes ramas y ramillas con hojas de cada uno de los 10 árboles muestreados, se multiplicó el valor de la biomasa total del componente (kg) por el porcentaje promedio de carbono determinado en laboratorio, de esta forma la suma del contenido de

carbono en las ramas y en las ramillas con hojas generó el valor del contenido de carbono en la copa. En el caso de la determinación del contenido de carbono en el fuste debido a que en este trabajo no se derribó ningún árbol y por lo tanto no se contaba con muestras de esta estructura, el procedimiento utilizado fue el de multiplicar el valor de la biomasa del fuste por el porcentaje de carbono obtenido de la madera las ramas ya que se asumió que estas estructuras al estar lignificadas presentaban el contenido de carbono más similar al de los fustes en comparación con el componente ramillas como esta reportado en diversas publicaciones (Díaz *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2011). Todos los contenidos de carbono requeridos se obtuvieron utilizando la siguiente expresión (Díaz *et al.*, 2007):

$$CCC = BTC \times \% C$$

En donde:

CCC = Contenido de carbono del componente

BTC = Biomasa total del componente (kg)

% C = Porcentaje de carbono del componente

Con la información generada hasta este punto se procedió a generar las ecuaciones alométricas correspondientes para determinar el contenido de biomasa y carbono del aile, la especie arbórea con el mayor IVIR, dentro de la composición florística del transecto estudiado.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la parte alta del río Texcoco, principalmente en el transecto que atraviesa el poblado de San Pablo Ixayoc desde el sitio en donde nace esta corriente de agua llamado El Manantial hasta los límites con el poblado de San Dieguito la vegetación del bosque de galería encontrada presentó un buen estado de conservación, sobre todo al compararla con la vegetación riparia de la parte baja de esta corriente de agua en donde dicha vegetación estuvo escasamente presente o inclusive ya no existía. Para conocer la composición botánica de esta vegetación riparia se estudió un transecto comprendido entre los puentes Zacasolco y Aclamaxa. En él se realizó un inventario forestal y se determinó la presencia de nueve especies arbóreas, siendo el aile (*Alnus acuminata* Kunth) quien obtuvo el mayor índice de valor de importancia. Por ello se seleccionó esta especie para determinar su biomasa mediante un método no destructivo y con esa información se generaron las respectivas ecuaciones alométricas para determinar su contenido de biomasa y carbono.

5.1 Área mínima de muestreo

Para levantar el inventario forestal, los trabajos en campo iniciaron con la determinación del área mínima de muestreo mediante la generación de la curva especies-área. Para poder generar esta curva se realizaron dos modificaciones a los principios de anidación de unidades indicados por Garmendia (2005), y debidos al patrón de distribución longitudinal y zigzagueante característico de los bosques de galería.

La primera modificación consistió en favorecer el establecimiento de las unidades de anidación solo en sentido longitudinal, es decir a lo largo del río, y la segunda en establecer las unidades de anidación en forma zigzagueante siguiendo el patrón de distribución natural la vegetación riparia. Esta forma de anidar las unidades de muestreo cumplió con los principios de anidación propuestos por Garmendia (2005), quien señala que las características más adecuadas de muestreo dependen de la variable particular que se esté midiendo y tuvieron un efecto positivo sobre la forma y dimensiones del área mínima de muestreo debido a que permitieron generar un área mínima de muestreo compacta, alargada y zigzagueante pero acorde al patrón natural de distribución de la vegetación riparia. Como se representa en la Figura 13. Al establecer las unidades de anidación basándose en las modificaciones señaladas se logró que estas fueran cubriendo el terreno sobre los costados del río que en realidad contenían la vegetación riparia.

Unidades de anidación y área mínima de muestreo												UA	AMA m²	NEA			
72	144	288		576				N					1552	a	36	2	
						e	e	↑		f	f		f	f	b	72	3
b			d	e	e	e	e		f	f	f	f	f	f	f	c	144
a	c	d	d	e	e			f	f	f			f		d	288	5
	c	d		8 x 6 =48 48 x 12 = 576 576 ≈ 600 m²											e	576	7
36															f	1552	7

UA=Unidad de anidación, AMA=Área muestreada acumulada (m²), NEA=Número de especies acumuladas.

Figura 13. Unidades de anidación con su respectiva área establecidas en forma longitudinal y zigzagueante sobre los costados del río Texcoco representado por la línea punteada (Elaboración propia).

De no haberse realizado estos dos ajustes, al establecer las unidades de anidación en forma aleatoria hacia cualquiera de los cuatro puntos cardinales, se hubiera generado un área mínima de muestreo cuadrada y excesivamente grande, por lo que hubiera sido un área mínima de muestreo ineficiente al haberse extendido hacia los extremos de bosque de galería en donde esta vegetación no está presente.

Al graficar el área muestreada en cada unidad de anidación y el número de especies acumuladas encontradas en estas se obtuvo la curva especies-área (Figura 14). Como lo señalaba la metodología, una vez graficada la información obtenida en campo y basándose en la curva generada se aplicó un criterio arbitrario para definir el área mínima de muestreo. En este caso se decidió utilizar el criterio de tomar como el área mínima de muestreo el área contenida bajo la curva hasta donde esta se hacía horizontal, punto que en la gráfica apareció alrededor de los 600 m² (Figura 14).

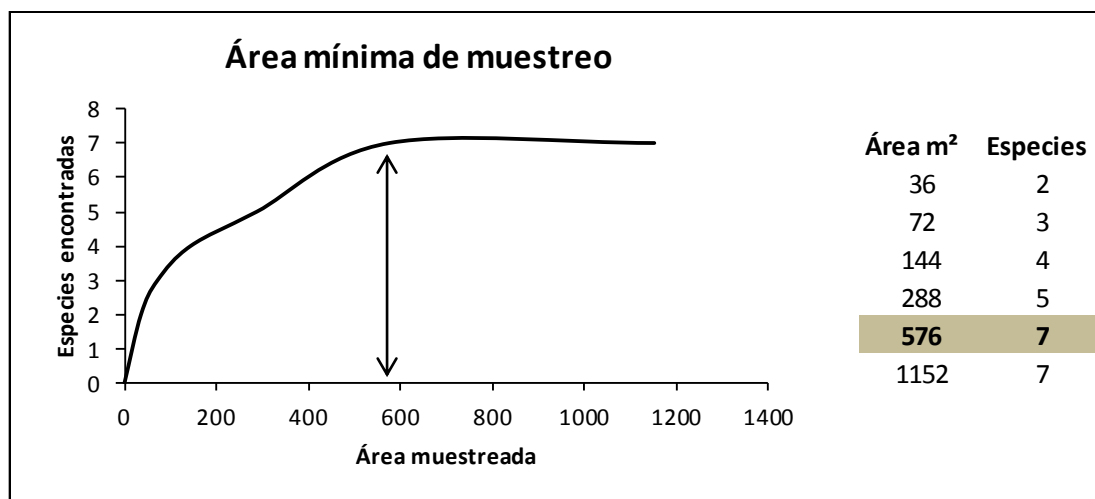


Figura 14. Área mínima de muestreo determinada mediante la curva especies-área (Elaboración propia).

Se consideró que el área mínima de muestreo de 600 m² generada por la curva especies área fue bastante precisa ya que al analizar la información contenida en la Figura 12 se puede observar que fue hasta la unidad de anidación e en donde se detuvo la aparición de nuevas especies arbóreas. Por lo tanto, al obtener el área de esta franja de unidades de anidación, en donde se estableció desde la unidad de anidación a hasta la unidad de anidación e, la cual midió 12 m de largo por 48 m de largo se obtuvo un área de 576 m², superficie muy cercana a los 600 m² generados por la curva especies-área.

Por lo anterior se considera que las modificaciones realizadas para establecer las unidades de anidación sobre el río fueron válidas y tuvieron un efecto positivo sobre la forma y la definición del tamaño mínimo de parcela a muestrear si se toma en cuenta que como lo señala Garmendia 2005, el área mínima es una característica intrínseca de una comunidad o tipo de vegetación y el tamaño de las unidades muestrales debe adaptarse al tipo de organismos analizados y sus características, particularmente al tamaño de los organismos y su distribución.

5.2 Composición florística

Para determinar la composición florística del transecto estudiado, una vez generada el área mínima de muestreo se realizó un barrido florístico cuantitativo desde la parte alta hasta la parte baja de este, sección comprendida entre los puentes Zacasolco y Aclamaxa.

Se contabilizó una densidad absoluta de 762 árboles pertenecientes a nueve especies arbóreas, de cada una de estas especies se colectaron muestras de material vegetal, este se secó y se montó para su identificación siguiendo los lineamientos del personal del herbario de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Como resultado de esta actividad se obtuvo la composición florística del transecto, las especies encontradas se presentan en el Cuadro 2. Según el orden en que fue encontrada cada una.

Cuadro 2. Composición florística del transecto.

Especie	Nombre común	Nombre científico
1	Aile	<i>Alnus acuminata</i> Kunth
2	Cedro	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill
3	Pirúl	<i>Schinus molle</i> L.
4	Fresno	<i>Flaxinus uhdei</i> Weising
5	Tejocote	<i>Crataegus</i> spp.
6	Tepozán	<i>Buddleia cordata</i> Kunth
7	Sauce llorón	<i>Salix</i> sp.
8	Eucalipto	<i>Eucaliptus</i> spp.
9	Encino	<i>Quercus rugosa</i> Nee

Al determinar el área mínima de muestreo originalmente fueron encontradas solo 7 especies arbóreas: aile, cedro, pirul, fresno, tejocote, tepozán y sauce llorón. Sin embargo al realizar el barrido florístico de la vegetación arbórea en la parte baja del transecto aparecieron dos nuevas especies, encino y eucalipto.

5.2.1 Índices de Valor de Importancia

De las nueve especies arbóreas que constituyeron la composición florística del transecto estudiado, las tres con los mayores Índices de Valor de Importancia Relativos fueron: Aile (*Alnus acuminata* Kunth) con 36 %, fresno (*Flaxinus uhdei* Weising) con 14.73 % y encino (*Quercus rugosa* Nee) con 14.12 % (Cuadro 3).

Cuadro 3. Índices de Valor de Importancia de las 9 especies arbóreas del transecto.

Especies	Nombre científico	D	Dr	P	Pr	F	Fr	MI	IVIR
Aile	<i>Alnus acuminata</i> Kunth	212	27.82	467318.78	56.30	55	26.32	110.44	36.81
Fresno	<i>Flaxinus uhdei</i> Weising	148	19.42	74552.62	8.98	33	15.79	44.19	14.73
Encino	<i>Quercus rugosa</i> Nee	166	21.78	91372.00	11.01	20	9.57	42.36	14.12
Sauce llorón	<i>Salix sp.</i>	77	10.10	73889.54	8.90	35	16.75	35.75	11.92
Tepozán	<i>Buddleia cordata</i> Kunth	71	9.32	40802.91	4.92	18	8.61	22.85	7.62
Pirul	<i>Schinus molle</i> L.	38	4.99	37874.81	4.56	20	9.57	19.12	6.37
Cedro	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill	21	2.76	36905.71	4.45	14	6.70	13.90	4.63
Tejocote	<i>Crataegus spp.</i>	27	3.54	5929.10	0.71	12	5.74	10.00	3.33
Eucalipto	<i>Eucaliptus spp.</i>	2	0.26	1421.57	0.17	2	0.96	1.39	0.46
		762	100.00	830067.04	100.00	209	100.00	300.00	100.00

D=Densidad, Dr=Densidad relativa, P=Predominio, Pr=Predominio relativo, F=Frecuencia, Fr=Frecuencia relativa, IVI=Índice de Valor de Importancia, IVIR=Índice de Valor de Importancia Relativo.

Como se observa en el Cuadro 3. El aile fue la especie que de manera sobresaliente presentó el mayor IVIR, esto explicado por sus altos valores de densidad, predominio y frecuencia tanto absolutos como relativos. Aunque estos tres valores incidieron positivamente para que el aile alcanzara el mayor IVIR, fueron principalmente sus altos valores de área basal o predominio derivados del diámetro que alcanzaron los fustes de esta especie lo que más incidió en su alto IVIR.

Al analizar las categorías diamétricas de esta población arbórea se pudo observar que casi el 60 % de ailes inventariados presentaron diámetros entre los 30 y 60 cm, habiéndose encontrado ejemplares cuyos diámetros rebasaron el metro (Figura 15). Lo anterior coincide con lo reportado por Cruz (2004), quien señala que esta especie crece de 10 a 30 m con DAP de 35 a 100 cm. El marcado desarrollo de los fustes del aile determinó en consecuencia que el índice de predominio o cobertura basal fuera el factor más influyente para que dicha especie alcanzara el mayor IVIR de todas las especies arbóreas presentes en transecto estudiado. Lo anterior se pudo también corroborar al comparar el predominio florístico del aile contra el del encino (*Quercus rugosa*

Nee) que fue la especie que obtuvo el segundo valor mas alto de densidad y predominio; pues aunque solo existió una diferencia de densidad de 46 individuos mas de aile que de encino, entre sus porcentajes de predominio se presentó una marcada diferencia de 45.29 % ya que el predominio relativo del aile fue de 56.30 % contra solo 11.01 % del encino.

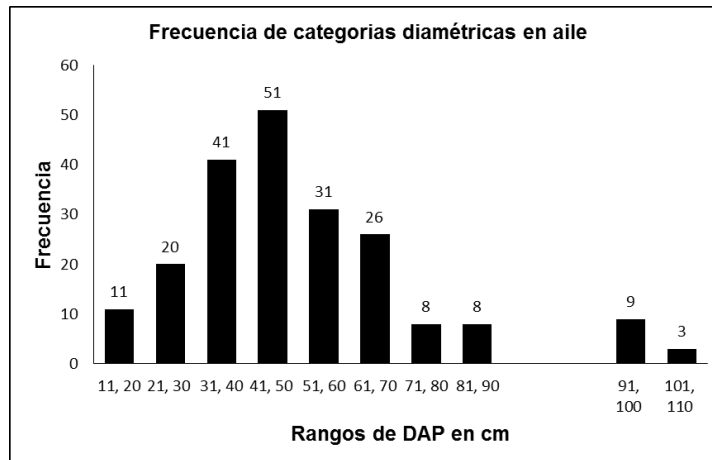


Figura 15. Frecuencias de las categorías diamétricas de los árboles de aile (*Alnus acuminata* Kunth) presentes en el transecto (Elaboración propia).

Este sobresaliente desarrollo de los ailes se explicó a que se encuentran en un medio ambiente favorable para su desarrollo ya que como lo señala Rzedowski (1978), al igual que en muchas otras partes del mundo, los bosques de *Alnus* (“aile”) en México son de dos afinidades ecológicas principales: viven a lo largo de arroyos y pequeños ríos, o bien constituyen comunidades sucesionales, surgidas como consecuencia de la destrucción de otros tipos de bosque. Lo anterior coincide también con lo expuesto por Cruz (2004), quien indica respecto a esta especie en específico que crece en ambientes húmedos, usualmente a lo largo de bancos de arroyos, ríos, lagunas y pantanos.

El aile por su alto índice de IVIR fue la especie seleccionada para generar sus ecuaciones alométricas que determinaran su contenido respectivo de biomasa y carbono. La biomasa aérea se estimó utilizando la metodología de Fehse *et al.* (2002), calculando por separado la biomasa de los fustes de la biomasa de las copas. Todas las mediciones requeridas se hicieron con los árboles en pie. Al no derribar los árboles evaluados se tuvo la gran ventaja de estimar su biomasa aérea sin necesidad de destruirlos.

5.3 Volumen de los fustes

La determinación del volumen de los fustes inició con la subdivisión de estos en secciones cilíndricas que contaran con diámetros basales y apicales lo más similares posible. En todas las secciones obtenidas el diámetro basal siempre fue mayor al apical y la longitud de cada sección siempre fue diferente a la longitud de las demás secciones obtenidas dentro de un mismo árbol así como al resto de las secciones obtenidas de los demás árboles. Entre mayor fue la altura de fuste limpio de los árboles mayor fue también el número de secciones en que este fue subdividido. El número mínimo y máximo de secciones en que se subdividieron los fustes varió entre 4 y 7 y de todas las secciones la más corta midió 30 cm de longitud y la más larga 3.5 m.

Una vez subdivididos todos los fustes en las secciones mencionadas se procedió a calcular el volumen de estas con la fórmula empleada para calcular el volumen del cilindro. Para desarrollar esta fórmula y obtener los respectivos

radios, se tomó como diámetro de cada sección el promedio entre su diámetro superior e inferior y como la altura su respectiva longitud individual.

Finalmente la altura de fuste limpio de cada árbol se asumió como la suma de las longitudes individuales de las secciones en que se subdividió su tronco y el volumen total de cada tronco se asumió como la suma de los volúmenes individuales de cada sección en que este fue subdividido (Cuadro 4).

Cuadro 4. Volumen total del fuste limpio de 10 árboles de aile (*Alnus acuminata* Kunth).

Árbol	DAP (1.3 m)	At (m)	Af (m)	VTf (m ³)
1	15.50	7.00	5.60	0.08
2	28.50	15.00	9.75	0.46
3	36.50	16.50	7.65	0.56
4	44.00	19.50	12.05	1.26
5	50.00	20.00	11.00	1.36
6	54.50	19.50	13.10	1.53
7	62.00	18.00	9.50	1.74
8	72.00	18.50	3.93	1.19
9	100.00	25.00	7.85	4.01
10	105.00	23.50	8.60	4.38

DAP=Diámetro a la altura de pecho, At=Altura total del árbol, Af=Altura de fuste limpio, VTf=Volumen total del fuste.

Los resultados mostraron, con excepción del árbol 8, que el volumen de los fustes en general varió proporcionalmente de acuerdo al DAP_{1.3m} y la altura de estos. Entre mayor fue el DAP_{1.3m} y la altura de los fustes, mayor fue también su volumen. Los volúmenes variaron de 0.08 a 4.38 m³ para los árboles con menor y mayor DAP respectivamente y el volumen promedio fue de 1.66 m³.

5.3.1 Factor de forma de la especie

El factor de forma varió de 0.5 a 0.75 con un valor promedio de 0.66. Como lo señala Romahn *et al.* (1994), el valor del coeficiente mórfico o factor de forma

tratándose de fustes su valor siempre es menor que la unidad. Por ello se consideró que este valor fue calculado de manera satisfactoria ya que cumplió con el principio señalado por el mencionado autor (cuadro 5).

Cuadro 5. Factor de forma por árbol y por especie de 10 árboles de aile (*Alnus acuminata* Kunth).

Árbol	DAP	Af (m)	VTf (m ³)	VFf (m ³)	Ff
1	15.50	5.60	0.08	0.11	0.75
2	28.50	9.75	0.46	0.62	0.74
3	36.50	7.65	0.56	0.80	0.70
4	44.00	12.05	1.26	1.83	0.69
5	50.00	11.00	1.36	2.16	0.63
6	54.50	13.10	1.53	3.06	0.50
7	62.00	9.50	1.74	2.87	0.61
8	72.00	3.93	1.19	1.60	0.74
9	100.00	7.85	4.01	6.17	0.65
10	105.00	8.60	4.38	7.45	0.59
Ff̄ =					0.66

DAP=Dímetro a la altura de pecho, Af=Altura de fuste limpio, VTf=Volumén total del fuste limpio, VFf=Volumén total del fuste calculado mediante el factor de forma, Ff=Factor de forma por árbol, Ff̄ =Factor de forma promedio de la especie.

5.4 Biomasa de la copa

A cada árbol se le podó una rama de cada una de las categorías diamétricas con las que contaba. En el árbol 1, solo se necesitó cortar una rama pues este contaba únicamente con la categoría de ramas delgadas, y en el árbol 2 se cortaron dos ramas pues este contaba con dos categorías de ramas, delgadas y medianas. A partir del tercer hasta el octavo árbol se cortaron tres ramas por ejemplar pues en estos existían tres categorías de ramas, delgadas, medianas y gruesas. Finalmente en el noveno y el décimo árbol se presentaron los cuatro tipos de ramas, pero debido a que en estos dos elementos los primeros tres tipos de ramas formaban parte del cuarto tipo de ramas (categoría diamétrica extra gruesas) se consideró por fines prácticos que las ramas presentes en

estos árboles solo correspondían a esta última categoría de ramas con diámetros entre 20 y 25 cm. De este último tipo de ramas solo se pudo cortar una por árbol, pero representativa de esta categoría diamétrica, ello debido a que por su gran tamaño no se obtuvo autorización por parte de las autoridades y pobladores locales para cortar a estos árboles más ramas de esas dimensiones.

En total se obtuvieron 23 ramas, 8 de la categoría delgadas, 7 de la categoría medianas, 6 de la categoría gruesas y 2 de la categoría extra gruesas. Todas las ramas fueron separadas con un machete en sus componentes madera y ramillas con hojas y todo este material fue pesado para obtener el valor de su peso fresco. Los valores obtenidos se promediaron por componente según cada categoría diamétrica y como resultado se obtuvo el peso fresco promedio de cada componente por categoría diamétrica de rama. Entre mayor fue el diámetro de las ramas mayor fue también el peso promedio de sus dos componentes. Así, para las categorías de ramas: delgadas, medianas, gruesas y extra gruesas se estimó un peso fresco promedio de la madera de 3.5, 15.20, 49.50 y 174.60 kg respectivamente. En el caso de los valores del peso fresco del componente ramillas con hojas se determinó un peso fresco promedio de 2.5, 7.5, 23.5 y 46.6 kg para las categorías de ramas delgadas, medianas, gruesas y extra gruesas respectivamente (Cuadro 6).

Para determinar la biomasa en peso seco de las copas de los árboles primero se estimó el peso seco de muestras de cada uno de los dos componentes de las ramas.

Cuadro 6. Promedios del peso fresco de los componentes madera y ramillas con hojas según las categorías diamétricas de ramas.

Árbol	DAP (cm)	Ramas delgadas (5-10 cm)		Ramas medianas (10-15 cm)		Ramas gruesas (15-20 cm)		Ramas extra gruesas (20-25 cm)	
		PFMR (kg)	PFrh (kg)	PFMR (kg)	PFrh (kg)	PFMR (kg)	PFrh (kg)	PFMR (kg)	PFrh (kg)
1	15.50	2.80	1.75						
2	28.50	3.70	2.45	9.40	5.15				
3	36.50	4.10	3.30	12.95	5.85	30.70	16.70		
4	44.00	2.50	1.90	14.25	6.10	49.10	19.10		
5	50.00	4.20	3.10	11.45	5.70	29.70	13.20		
6	54.50	3.60	2.25	20.95	13.40	39.60	21.20		
7	62.00	3.00	2.15	16.25	5.20	69.50	30.80		
8	72.00	4.10	3.10	21.15	11.10	78.40	40.000		
9	100.00							195.00	54.20
10	105.00							158.20	39.00
Promedio		3.50	2.50	15.20	7.50	49.50	23.50	176.60	46.60

PFMR=Peso fresco de la madera de la rama según categoría diamétrica, PFrh=Peso fresco de las ramillas con hojas según categoría diamétrica.

Para ello a cada rama podada se le cortó de la parte basal una rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor, y se tomó una muestra de 500 g por árbol del componente ramillas con hojas. Todo el material vegetal obtenido fue puesto a secar a 90 °C en la estufa de secado hasta que alcanzo su peso constante. Las ramillas con follajes alcanzaron su peso seco al primer día y la mayoría de las 23 rodajas de madera al segundo día, las rodajas de diámetros mayores a 20 cm alcanzaron su peso seco hasta el cuarto día.

Obtenidos los valores en peso seco de las muestras se determinó su porcentaje de humedad y los valores resultantes se agruparon por componente para después promediarlos y generar sus porcentajes promedio de humedad. El componente madera de las ramas presentó un porcentaje de humedad que vario de 43 a 57 % con una media de 49 %, mientras que en las ramillas con hojas se determinó un contenido de humedad de 55 a 68 % con un valor promedio de 62 %. El valor del porcentaje de humedad de la madera de las ramas fue menor y el de las ramillas con hojas fue mayor a los reportados por

Juárez (2008) para otra especie del mismo género, *Alnus jorullensis* H. B. K., ya que este autor reportó porcentajes de humedad promedio de 55.85 y 51.58 para los componentes madera de las ramas y ramillas con hojas respectivamente.

Con los valores del peso fresco promedio del componente madera de las ramas según su categoría diamétrica, así como con el valor promedio de su porcentaje de humedad y junto con el inventario de ramas por árbol se determinó el aporte de biomasa en peso seco de este componente a la biomasa de la copa de cada árbol evaluado (Cuadro 7).

Cuadro 7. Biomasa total en peso seco de la madera de las ramas.

Árbol	DAP (cm)	Ramas delgadas (5-10 cm)		Ramas medianas (10-15 cm)		Ramas gruesas (15-20 cm)		R. extra gruesas (20-25 cm)		BTPSMR (Mg)
		PFMR	BPF	PFMR	BPF	PFMR	BPF	PFMR	BPF	
		(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	
1	15.50	3.50	10.50	15.20	0.00	49.50	0.00	174.60	0.00	0.01
2	28.50	3.50	77.00	15.20	60.80	49.50	49.50	174.60	0.00	0.10
3	36.50	3.50	56.00	15.20	121.60	49.50	49.50	174.60	174.60	0.20
4	44.00	3.50	66.50	15.20	182.40	49.50	247.50	174.60	349.20	0.43
5	50.00	3.50	101.50	15.20	212.80	49.50	198.00	174.60	523.80	0.53
6	54.50	3.50	87.50	15.20	182.40	49.50	297.00	174.60	174.60	0.38
7	62.00	3.50	49.00	15.20	136.80	49.50	148.50	174.60	349.20	0.35
8	72.00	3.50	42.00	15.20	91.20	49.50	99.00	174.60	698.40	0.47
9	100.00	3.50	0.00	15.20	0.00	49.50	0.00	174.60	2444.40	1.25
10	105.00	3.50	0.00	15.20	0.00	49.50	0.00	174.60	2095.20	1.07

PFMR=Peso fresco promedio de la madera de la rama según categoría diamétrica, BPF=Biomasa en peso fresco, BTPSMR=Biomasa total en peso seco de la madera de las ramas por árbol.

Los resultados del Cuadro 7. Muestran que la biomasa de la copa de los árboles derivada del componente madera de las ramas generalmente aumentó al aumentar el DAP_{1.3m}. Sin embargo, esto no sucedió en los árboles 6, 7 y 8, ya que a pesar de que estos tres ejemplares tuvieron un DAP_{1.3m} mayor al del árbol 5, este último registra un contenido total de biomasa derivado del mismo componente mayor al de los otros tres árboles mencionados. Esto se pudo deber a que los árboles quizás perdieron ramas por fenómenos naturales ya

que Cruz (2004) señala que esta especie presenta autopoda o poda natural, o incluso pudieron haber sido cortadas por los pobladores ya que el transecto evaluado atraviesa una comunidad que hace uso constante de la vegetación.

Una vez determinado el aporte del componente madera de las ramas a la biomasa de la copa de los árboles también se determinó el aporte del componente ramillas con follaje. Para ello se utilizaron los valores del peso fresco promedio de este componente según las categorías diamétricas de ramas, su porcentaje de humedad de 62 % así como el inventario de ramas de cada árbol (Cuadro 8).

Cuadro 8. Biomasa total en peso seco de las ramillas de las hojas.

Árbol	DAP (cm)	Ramas delgadas (5-10 cm)		Ramas medianas (10-15 cm)		Ramas medianas (15-20 cm)		R. extra gruesas (20-25 cm)		BTPSrh (Mg)
		PFrh	BPF	PFrh	BPF	PFrh	BPF	PFrh	BPF	
		(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	
1	15.50	2.50	7.50	7.50	0.00	23.50	0.00	46.60	0.00	0.00
2	28.50	2.50	55.00	7.50	30.00	23.50	23.50	46.60	0.00	0.04
3	36.50	2.50	40.00	7.50	60.00	23.50	23.50	46.60	46.60	0.06
4	44.00	2.50	47.50	7.50	90.00	23.50	117.50	46.60	93.20	0.13
5	50.00	2.50	72.50	7.50	105.00	23.50	94.00	46.60	139.80	0.16
6	54.50	2.50	62.50	7.50	90.00	23.50	141.00	46.60	46.60	0.13
7	62.00	2.50	35.00	7.50	67.50	23.50	70.50	46.60	93.20	0.10
8	72.00	2.50	30.00	7.50	45.00	23.50	47.00	46.60	186.40	0.12
9	100.00	2.50	0.00	7.50	0.00	23.50	0.00	46.60	652.40	0.25
10	105.00	2.50	0.00	7.50	0.00	23.50	0.00	46.60	559.20	0.21

PFrh=Peso fresco promedio de las ramillas con hojas según categoría diamétrica, BPF=Biomasa en peso fresco, BTPSrh=Biomasa total en peso seco de las ramillas ramillas con hojas.

Los resultados fueron consistentes con los obtenidos con la variable madera de las ramas, ya que mostraron que la cantidad de biomasa en la copa de los árboles derivada del componente ramillas con hojas tiende a aumentar al aumentar el DAP_{1.3m} de los árboles. Sin embargo, en el caso de los árboles 6, 7 y 8 esto no fue así ya que estos tres árboles presentaron un contenido de biomasa derivada del componente ramillas con hojas menor al presentado por

el árbol 5 el cual posee un $DAP_{1.3m}$ menor a estos tres. Esto se puede deber a que como se explicó anteriormente estos árboles pudieron haber perdido ramas ya sea por fenómenos naturales o estas pudieron haber sido podadas por los pobladores.

Una vez obtenidos los aportes de los componentes madera de las ramas y ramillas con hojas a la biomasa en peso seco a la copa de los 10 árboles evaluados, estos valores se sumaron y el resultado genero el contenido total de biomasa en peso seco de la copa de cada uno de estos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Biomasa total de la copa derivada del aporte de los componentes madera de las ramas y ramillas con hojas.

Árbol	DAP (m)	At (m)	Af (m)	BTMR (Mg)	BTrh (Mg)	BTc (Mg)
1	0.16	7.00	5.60	0.01	0.00	0.01
2	0.29	15.00	9.75	0.10	0.04	0.14
3	0.37	16.50	7.65	0.20	0.06	0.27
4	0.44	19.50	12.05	0.43	0.13	0.56
5	0.50	20.00	11.00	0.53	0.16	0.68
6	0.55	19.50	13.10	0.38	0.13	0.51
7	0.62	18.00	9.50	0.35	0.10	0.45
8	0.72	18.50	3.93	0.47	0.12	0.59
9	1.00	25.00	7.85	1.25	0.25	1.49
10	1.05	23.50	8.60	1.07	0.21	1.28

DAP=Diámetro a la altura de pecho, At=Altura total, Af=Altura de fuste limpio, BTMR=Biomasa total de la madera de las ramas, BTrh=Biomasa total de ramillas con hojas, BTc=Biomasa total de la copa.

Los resultados del Cuadro 9. Muestran que el contenido total de biomasa en la copa tendió a aumentar conforme aumentó el $DAP_{1.3m}$ y la altura total de los árboles. Se observó también que en todos los árboles la madera de las ramas aportó una mayor cantidad de biomasa a la copa en comparación con las ramillas con hojas. En promedio en cada uno de los árboles evaluados la madera de las ramas aportó 0.42 Mg de biomasa a la copa mientras que las ramillas con hojas aportaron solo 0.1 Mg.

5.5 Densidad de la madera

Determinar la densidad de la madera fue indispensable para poder determinar la biomasa del fuste. Debido a que no se derribaron árboles y por lo tanto no se contaba con muestras de madera de esta estructura fue necesario calcular este dato a partir de las muestras basales de las ramas podadas previamente para determinar el aporte de estas a la biomasa de la copa.

El método utilizado fue el del recipiente de volumen conocido (1905.77 cm^3) y arena. Este se llenó de arena y se determinó el peso de este material (2842.10 g). Posteriormente en el contenedor vacío se vertió una capa de 5 cm de arena y sobre esta se colocó cada muestra de madera a evaluar, después se vertió toda la arena restante en el contenedor con la muestra y debido a esto en todas las evaluaciones se formó un montículo de arena de tamaño proporcional al de la muestra de madera evaluada. Esta arena desplazada se colectó y pesó y este valor se relacionó con el valor del volumen conocido de arena utilizado y su respectivo peso. De esta forma utilizando la fórmula propuesta para obtener la densidad se calculó esta para cada muestra evaluada y el promedio generó el valor de la densidad de la especie el cual fue de 0.62 Mg m^{-3} (Cuadro 10).

El valor de densidad obtenido de 0.62 Mg m^{-3} , es mayor al especificado para este género por Badia (1998), quien reporta una densidad media de 0.45 a 0.55 Mg m^{-3} . Sin embargo, el mismo autor señala que para la densidad no se puede dar más que cifras aproximadas porque esta depende de diversos factores como el estado de sequedad de la madera, la especie y de la parte del árbol.

Cuadro 10. Densidad de la madera de aile (*Alnus acuminata* Kunth).

Árbol	PSm (g)	PAD (g)	Vm (cm ³)	DM (g/cm ³)	DM (Mg m ⁻³)
1	22.00	53.80	36.08	0.61	0.61
2	52.80	121.80	81.67	0.65	0.65
3	53.20	124.10	83.22	0.64	0.64
4	87.80	210.60	141.22	0.62	0.62
5	121.00	284.64	190.87	0.63	0.63
6	65.60	153.20	102.73	0.64	0.64
7	102.70	250.90	168.24	0.61	0.61
8	108.40	262.14	175.78	0.62	0.62
9	256.30	637.10	427.21	0.60	0.60
10	235.20	558.40	374.44	0.63	0.63
					$\bar{x}=0.62$

PSm=Peso seco de la muestra, VC=Volumen del contenedor (1905.77 cm³), PAC=Peso de la arena del contenedor (2842.10 g), PAD=Peso de la arena desplazada, Vm=Volumen de la muestra, DM=Densidad de la madera.

Aunque las superficies de las rodajas de madera evaluadas tendieron a ser circulares, estas siempre presentaron formas diversas que fueron de lo circular a lo ovalado y en mayor o menor medida también presentaron algunas deformaciones en su área longitudinal, ya fueran estas protuberancias o áreas sumidas que dificultaban calcular su volumen directamente como si hubieran sido de una forma cilíndrica perfecta. Por ello se considera que el uso del método empleado para determinar la densidad de la madera fue bastante eficaz ya que sin importar la forma de la rodaja a evaluar la arena se amoldó a dicha forma y ello permitió que el volumen de arena desplazada en cada evaluación fuera similar al volumen de la muestra contenida en el interior del recipiente.

5.6 Determinación de la biomasa del fuste

Una vez determinada la densidad de la madera se pudo concluir el proceso para determinar mediante la fórmula propuesta por Fehse *et al.* (2000) la biomasa del fuste de cada árbol evaluado (Cuadro 11).

Cuadro 11. Biomasa total de los fustes limpios en aile (*Alnus acuminata* Kunth) calculada mediante la fórmula propuesta por Fehse *et al.*, (2002).

Árbol	DAP (m)	Af (m)	Bf (Mg)
1	0.16	5.60	0.05
2	0.29	9.75	0.26
3	0.37	7.65	0.34
4	0.44	12.05	0.75
5	0.50	11.00	0.88
6	0.55	13.10	1.27
7	0.62	9.50	1.17
8	0.72	3.93	0.65
9	1.00	7.85	2.52
10	1.05	8.60	3.05

DM=Densidad de la madera (0.62 Mg m^{-3}), DAP=Diámetro a la altura de pecho, Af=Altura de fuste limpio, FfX=Factor de forma de la especie (0.66), Bf=Biomasa del fuste

Como se observa en el Cuadro 11. La biomasa del fuste limpio varió de 0.05 a 3.05 Mg para los árboles con el menor y mayor $\text{DAP}_{1.3\text{m}}$ respectivamente. En general la biomasa contenida en el fuste aumentó al aumentar el $\text{DAP}_{1.3\text{m}}$, este patrón se conservó para todos los árboles excepto para los ejemplares 7 y 8. El fuste del árbol 7, a pesar de tener 10 cm más de $\text{DAP}_{1.3\text{m}}$ que el árbol 6, presentó un contenido de biomasa de 1.17 Mg, ligeramente menor al contenido del árbol 6 de 1.27 Mg. El árbol 8 es el ejemplar que a pesar de su $\text{DAP}_{1.3\text{m}}$ de 0.72 m se vio bastante afectado por la escasa longitud de su fuste lo que incidió para que presentara una marcada disminución en la biomasa de esta estructura, ya que aunque por su $\text{DAP}_{1.3\text{m}}$ de 0.72 m se esperaría que su fuste presentara mayor altura de fuste limpio y en consecuencia alrededor de 1.5 Mg de biomasa, en realidad este valor solo fue de 0.65 Mg, es decir la mitad de lo esperado.

5.7 Biomasa total por árbol

Con la información obtenida primero acerca de la biomasa de las copas y la obtenida después acerca de la biomasa de los fustes limpios se pudo determinar la biomasa total contenida por árbol mediante sumar estos dos valores (Cuadro 12).

Cuadro 12. Biomasa total por árbol obtenida de la suma de la biomasa del fuste y la biomasa de la copa.

Árbol	DAP (m)	At (m)	Af (m)	Bf (Mg)	BTc (Mg)	BTa (Mg)
1	0.16	7.00	5.60	0.05	0.01	0.05
2	0.29	15.00	9.75	0.26	0.14	0.40
3	0.37	16.50	7.65	0.34	0.27	0.61
4	0.44	19.50	12.05	0.75	0.56	1.31
5	0.50	20.00	11.00	0.88	0.68	1.57
6	0.55	19.50	13.10	1.27	0.51	1.78
7	0.62	18.00	9.50	1.17	0.45	1.62
8	0.72	18.50	3.93	0.65	0.59	1.25
9	1.00	25.00	7.85	2.52	1.49	4.02
10	1.05	23.50	8.60	3.05	1.28	4.33

DAP=Diámetro a la altura de pecho, At=Altura total, Af=Altura de fuste limpio, Bf=Biomasa total del fuste, BTc=Biomasa de la copa, BTa=Biomasa total por árbol.

El contenido de biomasa en general aumentó al aumentar el DAP_{1.3m}, la altura de fuste limpio y la altura total de los árboles. El contenido de biomasa total varió de 0.05 Mg a 4.33 Mg para los árboles con el menor y mayor DAP_{1.3m} respectivamente. El fuste aportó la mayor cantidad de biomasa al árbol en comparación con la copa, en promedio el fuste aportó 1.10 Mg de biomasa mientras que la copa en promedio aportó 0.60 Mg, estas proporciones coinciden con las reportadas para otras especies (Gómez *et al.*, 2011; Juárez, 2008).

5.7.1 Contenido de carbono

Los resultados obtenidos en laboratorio sobre el contenido de carbono de los dos componentes de las ramas mostraron que este elemento en el componente

madera varió de 48.2 a 50.3 % con un valor promedio de 48.9 % y en el componente ramillas con hojas el contenido de carbono vario de 46.5 a 47.1 % con un valor promedio de 47.1 %. Aunque la diferencia entre ambos promedios no es significativa, estos resultados son diferentes a los reportados en otros trabajos similares en los cuales se señala que son las hojas el componente del árbol que presenta el mayor contenido de carbono (Díaz *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2011; Juárez, 2008). Este hecho pudo deberse a que en este trabajo las muestras de ramillas con hojas no contenían solamente follaje sino que una proporción cercana al 50 % de cada muestra era de ramillas y la presencia de este último material pudo por ende haber influido en una disminución del contenido de carbono en estas muestras. Al multiplicar los valores promedio del contenido de carbono por componente con los valores de su biomasa seca se obtuvo el contenido de carbono de la madera de las ramas y el contenido de carbono de las ramillas con hojas, y al sumar los valores obtenidos de ambos componentes por árbol se obtuvo el contenido de carbono presente en la copa de cada árbol (Cuadro 13).

Similarmente, para determinar el contenido de carbono de los fustes se multiplico el valor de su biomasa por el valor promedio del contenido de carbono de las ramas (Cuadro 13). En este caso, para determinar el contenido de carbono en los fustes se tuvo que utilizar el valor promedio del contenido de este elemento en las ramas ya que no se contó con muestras reales del fuste en las cuales determinar dicha información. Sin embargo, al considerar que las ramas son estructuras que presentan algún grado de lignificación se asumió

que el contenido de carbono en su madera era similar al de los fustes. Finalmente la suma del contenido de carbono en los fustes y en las copas generó el valor del contenido de carbono en cada árbol (Cuadro 13).

Cuadro 13. Contenido de carbono por componente y por árbol.

Árbol	DAP (cm)	CCMR (Mg)	CCrh (Mg)	CCc (Mg)	CCf (Mg)	CCa (Mg)
1	0.16	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
2	0.29	0.05	0.02	0.07	0.13	0.20
3	0.37	0.10	0.03	0.13	0.16	0.30
4	0.44	0.21	0.06	0.27	0.37	0.64
5	0.50	0.26	0.07	0.33	0.43	0.77
6	0.55	0.19	0.06	0.25	0.62	0.87
7	0.62	0.17	0.05	0.22	0.58	0.79
8	0.72	0.23	0.06	0.29	0.32	0.61
9	1.00	0.61	0.12	0.73	1.24	1.96
10	1.05	0.52	0.10	0.62	1.49	2.12

DAP=Diamétero a la altura de pecho, CCMR=Contenido de carbono de la madera de las ramas, CCrh=Contenido de carbono de las ramillas con hojas, CCc=Contenido de carbono de la copa, CCa=Contenido de carbono del árbol.

Los resultados mostraron que similarmente como sucedió con la biomasa, los fustes aportaron la mayor parte del carbono presente en los árboles en comparación con el aporte de las copas. Aunque la determinación del contenido de biomasa en este trabajo se realizó por medio de un método indirecto, los resultados mostraron que se mantiene el patrón que se observa en otros estudios realizados para la generación de ecuación alométricas (Jiménez, 2010; Juárez, 2008), en donde se reporta que en los árboles evaluados es el fuste la estructura del árbol que contiene la mayor cantidad de biomasa, seguida de la madera de las ramas y finalmente el follaje.

5.8 Generación de ecuaciones alométricas

Determinada la biomasa y el contenido de carbono se emplearon los modelos lineal y exponencial para generar las ecuaciones alométricas de la especie.

5.8.1 Características dasométricas de los árboles evaluados

El Cuadro 14. Muestra las características dasométricas de los 10 árboles evaluados originalmente, así como el promedio, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de estas variables. El DAP_{1.3m} de los árboles varió de 16 a 105 cm. La altura total varió de 7.0 a 23.5 m y la altura de fuste limpio de 5.60 a 8.60 m. La biomasa varió de 0.05 a 4.33 Mg y su contenido de carbono de 0.03 a 2.12 Mg con los valores más bajos en los árboles de menor DAP_{1.3m}, los cuales se incrementaron al aumentar el valor de estos parámetros.

Cuadro 14 Características dasométricas y contenido de biomasa y carbono de los 10 árboles de aile (*Alnus acuminata* Kunth) evaluados originalmente.

Árbol	DAP (cm)	At (m)	Af (m)	BTa (Mg)	CCa (Mg)
1	16	7.00	5.60	0.05	0.03
2	29	15.00	9.75	0.40	0.20
3	37	16.50	7.65	0.61	0.30
4	44	19.50	12.05	1.31	0.64
5	50	20.00	11.00	1.57	0.77
6	55	19.50	13.10	1.78	0.87
7	62	18.00	9.50	1.62	0.79
8	72	18.50	3.93	1.25	0.61
9	100	25.00	7.85	4.02	1.96
10	105	23.50	8.60	4.33	2.12
Promedio	57	18.25	8.90	1.69	0.83
DE	29	4.94	2.82	1.42	0.70
Máximo	105	25.00	13.10	4.33	2.12
Mínimo	16	7.00	3.93	0.05	0.03

DAP=Diámetro a la altura de pecho, At=Altura total, Af=Altura de fuste limpio, BTa=Biomasa total por árbol, CCa=Contenido de carbono por árbol, DE=Desviación estándar.

5.8.1.2 Ecuaciones alométricas para biomasa

Una vez realizados los análisis de regresión lineal con los datos de los 10 árboles descritos en el Cuadro 14. Se generaron ecuaciones alométricas con

los dos modelos empleados y cuyos coeficientes de determinación fueron cercanos a 0.90 ($R^2= 0.89$). Sus respectivas gráficas de dispersión de puntos mostraban al árbol 1, 7 y 8 alejados de la línea de tendencia central. Por ello debido a las inconsistencias que ya se habían detectado en estos árboles desde puntos anteriores como fue la determinación de biomasa y carbono y con el fin de incrementar el valor del coeficiente de determinación se decidió eliminar los valores de estos tres árboles y realizar de nuevo el análisis de regresión con una población de solo 7 ejemplares en vez de 10 (Cuadro 15).

Cuadro 15. Características dasométricas de 7 árboles de aile (*Alnus acuminata* Kunth) seleccionados para generar las ecuaciones alométricas.

Árbol	DAP (cm)	At (m)	Af (m)	BTa (Mg)	CCa (Mg)
1	29.00	15.00	9.75	0.40	0.20
2	37.00	16.50	7.65	0.61	0.30
3	44.00	19.50	12.05	1.31	0.64
4	50.00	20.00	11.00	1.57	0.77
5	55.00	19.50	13.10	1.78	0.87
9	100.00	25.00	7.85	4.02	1.96
10	105.00	23.50	8.60	4.33	2.12
Promedio	60.00	19.86	10.00	2.00	0.98
DE	30.27	3.53	2.12	1.57	0.76
Máximo	105.00	25.00	13.10	4.33	2.12
Mínimo	29.00	15.00	7.65	0.40	0.20

DAP=Diámetro a la altura de pecho, At=Altura total, Af=Altura de fuste limpio, BTa=Biomasa total por árbol, CCa=Contenido de carbono por árbol.

La eliminación de los tres árboles 6, 7 y 8 permitió generar ecuaciones alométricas con coeficientes de determinación superiores a 0.9 con ambos modelos para las variables: biomasa y carbono, el no incluir los árboles mencionados no afectó negativamente la generación de dichas ecuaciones.

La ecuación alométrica para determinar la biomasa de aile (*Alnus acuminata* Kunth) utilizando el modelo lineal, quedo expresada como:

$$B = 0.0516 * DAP - 1.0939$$

En donde:

B = es la biomasa (Mg) y

DAP = es el diámetro a la altura de pecho (cm)

Los parámetros del modelo lineal y la dispersión de puntos de los valores de biomasa observados se presentan en la Figura 16. Al ajustar la ecuación para determinar la biomasa en función del diámetro normal se presentó un coeficiente de determinación satisfactorio ($R^2=0.9952$).

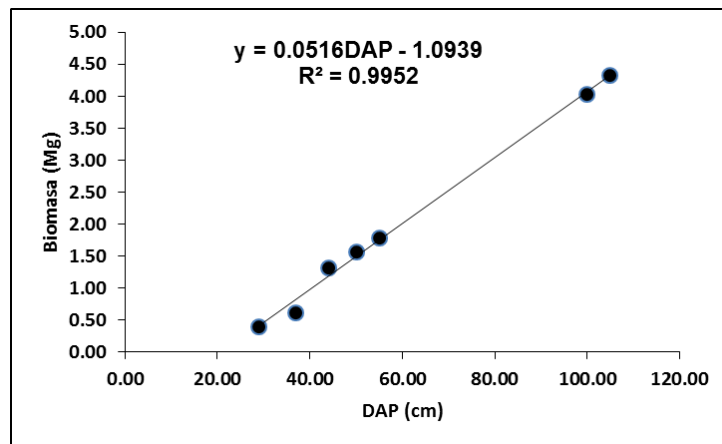


Figura 16. Dispersión de los valores observados de *Alnus acuminata* (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de biomasa utilizando el modelo lineal.

Sin embargo esta ecuación es limitante al no poderse usar cuando el $DAP_{1.3m}$ es menor a 23 cm debido a que se generaría un valor de biomasa negativo.

La ecuación alométrica para determinar la biomasa de aile (*Alnus acuminata* Kunth) utilizando el modelo exponencial, quedo expresada como:

$$B = 0.0012 * DAP^{1.7877}$$

En donde:

B = es la biomasa (Mg) y

DAP = es el diámetro a la altura de pecho (cm)

Los parámetros del modelo exponencial y la dispersión de puntos de los valores de biomasa observados se presentan en la Figura 17. Al ajustar la ecuación para determinar la biomasa en función del diámetro normal se presentó un coeficiente de determinación satisfactorio ($R^2=0.9515$).

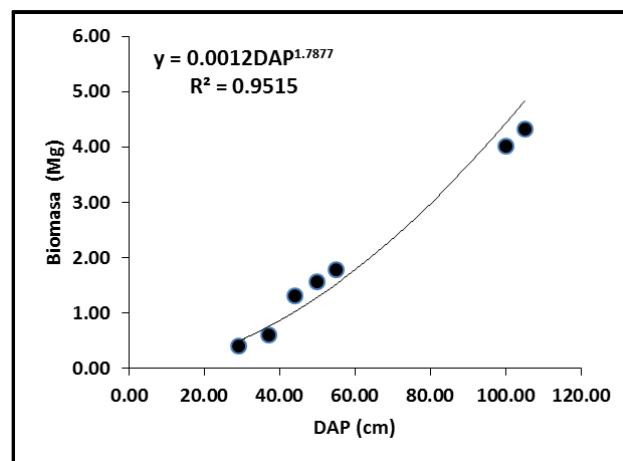


Figura 17. Dispersión de los valores observados de *Alnus acuminata* (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de biomasa utilizando el modelo exponencial.

5.8.1.3 Ecuaciones alométricas para carbono

La ecuación alométrica para determinar el contenido de carbono de aile (*Alnus acuminata* Kunth) utilizando el modelo lineal, quedo expresada como:

$$CCa = 0.0252 * DAP - 0.531$$

En donde:

CCa = es la cantidad de carbono por árbol (Mg) y

DAP = es el diámetro a la altura de pecho (cm)

Los parámetros del modelo y la dispersión de puntos de los valores de biomasa observados se presentan en la Figura 18. Al ajustar la ecuación para determinar la biomasa en función del diámetro normal se presentó un coeficiente de determinación satisfactorio ($R^2=0.9952$).

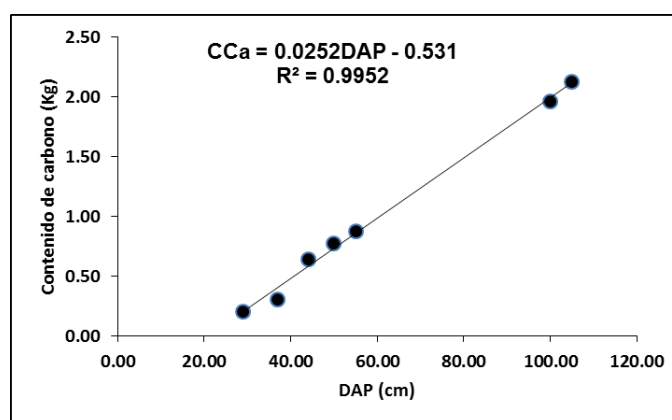


Figura 18. Dispersión de los valores observados de *Alnus acuminata* (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de carbono utilizando el modelo lineal.

Esta ecuación al igual que la ecuación de biomasa generada mediante el modelo lineal tiene la limitante de que no se puede aplicar cuando el DAP es

menor a 23 cm debido a que si hace esto se generaría un valor de contenido de carbono negativo.

La ecuación alométrica para determinar el contenido de carbono de *Alnus acuminata* Kunth. utilizando el modelo exponencial, quedo expresada como:

$$CCa = 0.0006 * DAP^{1.7755}$$

En donde:

CCa = Contenido de carbono por árbol (Mg) y

DAP = es el diámetro a la altura de pecho (cm)

Los parámetros del modelo y la dispersión de puntos de los valores de biomasa observados se presentan en la Figura 19. Al ajustar la ecuación para determinar la biomasa en función del diámetro normal se presentó un coeficiente de determinación satisfactorio ($R^2=0.9529$).

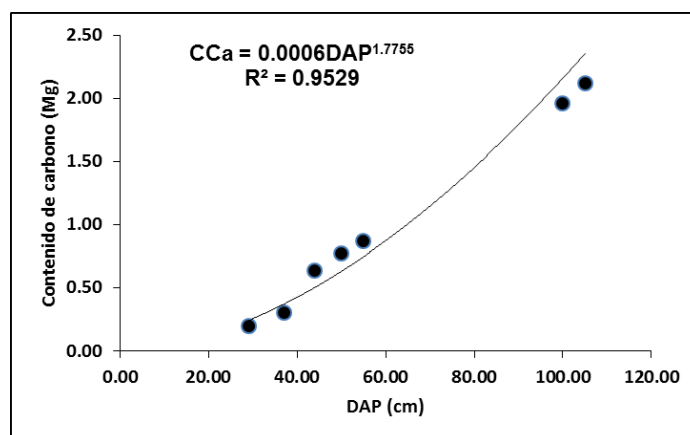


Figura 19. Dispersión de los valores observados de *Alnus acuminata* (Kunth) y la línea de regresión generada con los datos de contenido de carbono utilizando el modelo exponencial.

5.9 Comparación de las ecuaciones alométricas

Los coeficientes de determinación obtenidos (R^2) mayores a 0.90 en ambos modelos tanto en la determinación de biomasa como en la de carbono indican que para estimar estas variables en los árboles de *Alnus acuminata* Kunth es confiable tomar al $DAP_{1.3m}$ como la variable explicatoria. En la búsqueda de ecuaciones alométricas similares se encontró que Juárez (2008), determinó el contenido de biomasa y carbono en otra especie de aile (*Alnus jorullensis* H. B. K.) en Tequexquinahuac, Estado de México. Para ello evaluó 16 árboles con diámetros que fueron de los 10 a los 55 cm. Al realizar una comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los del autor mencionado se encontró que las determinaciones de altura y biomasa reportadas por Juárez (2008) son inferiores a las encontradas en este trabajo en lo que comprende al rango de $DAP_{1.3m}$ que pudo ser comparado y que comprende de 10 a 50 cm. Esto se pudo deber a que aunque ambas poblaciones de árboles son del mismo género, y se localizan en localidades cercanas, los ejemplares evaluados en este trabajo pertenecían a un bosque de galería, donde la disponibilidad de agua en el medio ambiente es constante, lo que pudo haber influido para que el desarrollo de los árboles riparios fuera superior al de los ejemplares evaluados por Juárez (2008).

Para evaluar el comportamiento de las ecuaciones alométricas generadas en este trabajo se comparó la biomasa obtenida en campo con la biomasa estimada por dichas ecuaciones y la propuesta por Juárez ($Y=0.0143 \cdot DAP^{2.8355}$) (Cuadro 16). Sin embargo, debido a que no se contaba con datos de biomasa

de árboles con $DAP_{1.3m}$ menores a 29 cm, se incorporó la información de 3 árboles hipotéticos: a, b y c, cuyos valores de $DAP_{1.3m}$ y biomasa correspondieron a los valores de estas dos variables calculadas previamente en este trabajo para las categorías de ramas delgadas, medianas y gruesas (Cuadro 16).

Cuadro 16. Contenido de biomasa calculada con las ecuaciones alométricas generadas y la reportada por Juárez, (2008).

Árbol	DAP (cm)	BTa (Mg)	Modelo 1	Modelo 2	Juárez, (2008).
a	5	0.01	-0.84	0.02	0.00
b	10	0.02	-0.58	0.07	0.01
c	15	0.07	-0.32	0.15	0.03
1	29.00	0.40	0.40	0.49	0.20
2	37.00	0.61	0.82	0.76	0.40
3	44.00	1.31	1.18	1.04	0.65
4	50.00	1.57	1.49	1.31	0.94
5	55.00	1.78	1.74	1.55	1.23
9	100.00	4.02	4.07	4.51	
10	105.00	4.33	4.32	4.93	

DPA=Diámetro a la altura de pecho, BTa=Biomasa total por árbol, a, b y c=árboles hipotéticos

Se observó que la ecuación generada con el modelo 2 o exponencial es la que mejor predice la biomasa ya que no genera valores negativos como el modelo 1 o lineal cuando se evalúan árboles con $DAP_{1.3m}$ tan delgados como 5 cm.

Un procedimiento similar se realizó para evaluar las ecuaciones generadas para estimar carbono. Se tomaron los valores de biomasa de los 3 árboles hipotéticos usados previamente y estos se multiplicaron por el porcentaje promedio de contenido de carbono definido con anterioridad para esta especie: (48.84 %). Los resultados se utilizaron como los contenidos de carbono para los árboles hipotéticos a, b y c, y se compararon con los valores producidos por las ecuaciones respectivas generadas en este trabajo y la propuesta por Juárez

(2008) ($CC=0.009DAP^{2.7517}$). Se registró el mismo patrón encontrado en la estimación de la biomasa, es decir, la ecuación alométrica generada con el modelo 2 o exponencial es la que mejor predice el contenido de carbono al no producir valores negativos en la evaluación de contenido de carbono en árboles con $DAP_{1.3m}$ tan delgados como 5 cm (Cuadro 17).

Cuadro 17. Contenido de carbono calculado con las ecuaciones alométricas generadas y la reportada por Juárez, (2008).

Árbol	DAP (cm)	CCa (Mg)	Modelo 1	Modelo 2	Juárez, (2008).
a	5	0.004	-0.41	0.01	0.00
b	10	0.009	-0.28	0.04	0.01
c	15	0.033	-0.15	0.07	0.02
1	29.00	0.200	0.20	0.24	0.10
2	37.00	0.300	0.40	0.37	0.19
3	44.00	0.640	0.58	0.50	0.30
4	50.00	0.770	0.73	0.62	0.43
5	55.00	0.870	0.86	0.74	0.55
9	100.00	1.960	1.99	2.13	
10	105.00	2.120	2.12	2.33	

DPA=Diámetro a la altura de pecho, CCa=Contenido de carbono por árbol, a, b y c=árboles hipotéticos

En el caso de las ecuaciones generadas por Juárez (2008) tanto para biomasa como carbono se consideró que estas no predicen eficazmente estas variables en la población de ailes del bosque de galería evaluada en este trabajo ya que el rango de diámetros que evaluó dicho autor estuvieron entre 10 y 50 cm, mientras que en este trabajo los diámetros con que se calcularon las ecuaciones tanto de biomasa como de carbono abarcaron diámetros desde los 29 hasta los 105 cm.

6. CONCLUSIONES

Las especies arbóreas que conforman la composición florística del transecto evaluado fueron en orden de IVIR: aile (*Alnus acuminata* Kunth), fresno (*Flaxinus uhdei* Weising), encino (*Quercus rugosa* Nee), sauce llorón (*Salix sp.*), tepozán (*Buddleia cordata* Kunth), pirul (*Schinus molle* L.), cedro (*Cupressus lusitanica* Mill), tejocote (*Crataegus spp.*) y eucalipto (*eucaliptus spp.*).

El establecimiento longitudinal y zigzagueante de las unidades de anidación acorde al patrón de distribución natural de la vegetación riparia tuvo un efecto positivo al determinar el tamaño mínimo de parcela a muestrear mediante la generación de la curva especies-área.

El método del recipiente de volumen conocido y arena empleando para determinar el volumen de las muestras de madera fue efectivo, pues la arena se amoldó a cualquier forma o deformación presentada por las muestras por lo que la cantidad de arena desplazada fue similar al volumen de la muestra evaluada.

Los coeficientes de determinación obtenidos (R^2) mayores a 0.9 indican que las ecuaciones determinadas para estimar biomasa y carbono para *Alnus Acuminata* Kunth son confiables en condiciones semejantes para dicha especie y dentro del rango de $DAP_{1.3m}$ evaluados. El modelo exponencial fue el que mejor estimó la biomasa y carbono ya que no genera valores de biomasa o contenido de carbono negativos como sucedió con el modelo lineal.

La distribución de la biomasa en los árboles fue de 64.92, 27.06 y 8.02 % en el fuste, madera de las ramas y ramillas con hojas respectivamente. La distribución del carbono en los arboles fue de 65.12, 27.15 y 7.72 % en el fuste, la madera de las ramas y ramillas con hojas respectivamente. El contenido de carbono determinado para la especie fue de 48.84 %.

7. RECOMENDACIONES

Para mejorar la estimación de la biomasa mediante el método no destructivo empleado se pueden mejorar tres aspectos: podar un mayor número de ramas en vez de solo podar una rama por categoría diamétrica, hacer una clasificación más amplia de categorías diamétricas y combinar las categorías diamétricas con la variable longitud de ramas o podar un porcentaje de la copa en vez de un cierto número de ramas.

8. LITERATURA CITADA

ACOSTA M., M., J. VARGAS H., A. VELÁZQUEZ M., y J. D. ETCHEVERS B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.

ACOSTA V., H., A. ARAUJO P. y C. ITURRE M. 2006. Caracteres estructurales de las masas. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina. 34 pp.

AVENDAÑO H., D. M., M. ACOSTA M., F. CARRILLO F. y J. D. ETCHEVERS B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*: 32(3): 233-238.

BADIA T., I. 1988. Cubicación de Maderas. Editorial Sintesis. S.A. Barcelona, España. 112. pp.

BINKLEY D., L. STAPE J. y G. KYAN M. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forest. *Forest Ecology and Management*. 190:5-16.

BUCKERIDGE M., S. y M. C. DIETRICH S. 1996. Mobilization of the raffinose family oligosaccharides and galactomannan in germinating seeds of *Sesbiana marginata* Benth. *Plant Science* 117:33-43.

CANO M., E. E. 1993. Relación alométrica entre el área foliar y el área de la albura en *Pinus patula* Schl. Et Cham., en Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 89 pp.

CRUZ R., A. 2004. La importancia del hilite blanco (*Alnus acuminata* subsp. *arguta* (Schlecht.) Furlow) (Betulacea) en la sombra de cafetales de Xochitlán de Vicente Suárez, Puebla, México. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM. México, D.F.

DELGADILLO R., M. y S. QUECHULPA M. 2006. Manual de monitoreo de carbono en sistemas agroforestales. Comisión Nacional Forestal. AMBIO S. C. de R. L. México. 43 pp.

DÍAZ F., R., M. ACOSTA M., F. CARRILLO A., E. BUENDIA R., E. FLORES A. J. D. ETCHEVERS B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham. Madera y Bosques 13(1): 25-34.

DIXON R., K., S. BROWN., A. HOUGHTON R., M. SOLOMON A., C. TREXLER M. y J. WISNIEWSKI. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 263: 485-190.

ETCHEVERS B., J. D. 1992. Manual de métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México.

ETCHEVERS B., J. D., M. MONREAL C., C. HIDALGO., M. ACOSTA M., J. PADILLA. y R. LÓPEZ. 2005. Manual para la estimación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados, México. 29 pp.

FEHSE J., R. HOFSTEDE., N. AGUIRRE., C. PALADINES., A. KOOIJMAN. y J. SEVINK. 2002. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink? *Forest Ecology and Management* 163: 9-25.

FRANCO L., J. 1995. Manual de ecología. Editorial Trillas. México, D.F. 266 pp.

GARDUÑO R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez J. y Fernández A. (eds.). INE-SEMARNAT. México, D.F. 77-85.

GAYOSO J. 2002. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 53 pp.

GARMENDIA S., A. y A. J. SAMO L. 2005. Prácticas de ecología. Universidad Politécnica de Valencia, España. 174 pp.

GÓMEZ D., J. D., J. D. ETCHEVERS B., A. I. MONTERROSO R., J. CAMPO A. y J. A. TINOCO R. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 261-272.

HOUGHTON R., A., L. HACKLER J. y T. LAWRENCE K. 1999. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science* 258: 574-577.

HOUGHTON R. A. y M. WOODWELL C. 1989. Global climate change. *Scientific American* 260 (4): 36-40.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática). 2001. Síntesis de Información Geográfica del Estado de México. 139 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Guidelines for national greenhouse gas inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.

JARAMILLO V., J. 2004. El ciclo global del carbono. *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez J. y Fernández A. (eds.). INE-SEMARNAT. México, D.F. 77-85.

JIMÉNEZ C., C.R. 2010. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartweggi* L. en el parque nacional Itza-Popo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.

JOLLEY R., L., G. LOCKABY B. y G. CAVALCANTI G. 2010. Changes in riparian forest composition along a sedimentation rate gradient. *Plant Ecology* 210(2): 317-330.

JUÁREZ B., J. E. 2008. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de *Alnus jorullensis* H.B.K. spp. *jorullensis* en bosques mezclados de

Tequexquahuac, Texcoco, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.

KIMBLE J., M., R. LAL y R. F. FOLLET. 2002. Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. Lewis Publishers, EUA. 512 pp.

LASHOF D., A. y R. AHUJA D. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344(5): 559-531.

LITTON C., M. y B. KAUFFMAN J. 2008. Allometric models for predicting above-ground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica* 40: 313-320.

MAASS F., S. 2009. Estimación de la captura de carbono en zonas forestales: El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México. 136 pp.

MARTÍNEZ R., V. 2010. Almacenamiento de carbono en los sistemas forestales y agrícolas de la falda oeste del cerro Tláloc. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. 68 pp.

MÜLLER D., D y H. ELLENBERG. 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons. New York, U.S.A. 547 pp.

NAIMAN R., J. y H. DÉCAMPS. 1997. The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 28: 621-658.

PRENTICE I., C. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, pp.: 135-237. En: Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van

der Linden, X. Dai, K. Maskell & C. A. Johnson (eds.). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press. United Kingdom-New York.

RAMAHN De la V., C. F., H. RÁMIREZ M. y J. L. TREVIÑO G. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. 354 pp.

RÜGNITZ T., M., M. CHACÓN L. y R. PORRO R. 2008. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. World Agroforestry Center and Iniciativa amazónica. Belén, Brasil. 61 pp.

RZEDOWSKI J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México, D.F. 432 pp.

SÁNCHEZ G., A., y L. LÓPEZ M. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada a lo largo de un gradiente altitudinal. Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. D. F. Serie Botánica 74(1): 47-71.

SCHLESINGER W., H. 1997. Biogeochemistry: An analysis of global change. New York: National Academic Press.

SCHULZE E., D., CH. WIRTH. y M. HEIMANN. 2000. Managing forest after Kyoto. Science 289: 2058-2059.

STILING P. 1999. Ecology: Theories and Applications. Prentice Hall. New Jersey, USA. 840 pp.

TREVIÑO G., E. E., C. CAVAZOS C. y A. AGUIRRE O. 2001. Distribución y estructura de los bosques de galería en dos ríos del centro sur de Nuevo León. *Madera y Bosques* 7(1): 13-25.

YANG J., T. DILTS E., L. CONDON A., P. LEE T. y P. WEISBERG J. 2011. Longitudinal and transverse-scale environmental influences on riparian vegetation across multiple levels of ecological organization. *Landscape Ecology* 26(3):381-395.

YEPES A. y M. SILVEIRA B. 2011. Respuesta de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global. *Colombia Forestal* 14(2):213-232.

YERENA Y., J. I., J. JIMÉNEZ P., O. S. AGUIRRE C. y E. J. TREVIÑO G. 2011. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 283-291.