



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estimación de biomasa de *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata* para la generación de electricidad a través de un gasificador

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

BRENDA YADIRA HERNÁNDEZ MIRANDA



DIRECTOR DE TESIS:
JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ
2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Datos del jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno: Hernández
Apellido materno: Miranda
Nombre (s): Brenda Yadira
Teléfono: 59727681
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera: Biología
Número de cuenta: 302090239

2. Datos del tutor

Grado: Doctor
Nombre (s): Javier Eduardo
Apellido paterno: Aguillón
Apellido materno: Martínez

3. Datos del sinodal 1

Grado: Doctor
Nombre (s): Mauricio Alberto
Apellido paterno: Trujillo
Apellido materno: Roldán

4. Datos del sinodal 2

Grado: Doctora
Nombre (s): Nathalie Roberte
Apellido paterno: Chantal Cabirol

5. Datos del sinodal 3

Grado: Doctora
Nombre (s): Isabel Rocío
Apellido paterno: López
Apellido materno: de Juambelz

6. Datos del sinodal 4

Grado: Doctor
Nombre (s): José Eduardo
Apellido paterno: Rodríguez
Apellido materno: Bustamante

7. Datos del trabajo

Estimación de biomasa de *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata*
para la generación de electricidad a través de un gasificador
73 p.
2014

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT en su Red de Fuentes de Energía, por la beca otorgada para realizar esta tesis.

Al Instituto de Ingeniería en su Coordinación con Ingeniería de Procesos Industriales y Ambientales, por las facilidades técnicas y científicas otorgadas para la realización de esta investigación.

Hago un reconocimiento especial a la Dirección General de Obras y Conservación (DGOC) de la UNAM, particularmente a la Coordinación de Áreas Verdes y Forestación, al Ing. Alfredo Martínez Sigüenza, por el apoyo humano y material brindado para la realización de la parte experimental de este trabajo.

A la Dirección del Jardín Botánico del Instituto de Biología, por el apoyo logístico e informativo prestado para la elaboración de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS PARTICULARES

Agradezco al Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez, por haberme enseñado el posible camino multidisciplinario en la ciencia. Por su apoyo moral e intelectual en el proceso de la realización de este trabajo.

A Maximino Varela Juárez por su enseñanza, paciencia y apoyo incondicional en la parte experimental de este trabajo. Por su confianza y apoyo hasta el final de la batalla.

Al Mtro. Francisco Camacho Morfín, por su asesoría y su conocimiento compartido para poder llevar a cabo esta investigación, en particular en el procesamiento estadístico y análisis de resultados. Por su entrañable apoyo moral e intelectual en todo momento.

También agradezco al Arquitecto Aurelio López Espíndola, quien ayudó en la parte experimental de esta tesis. Y por el apoyo incondicional que me ha brindado.

A la Dra. Nathalie Cabirol por la asesoría brindada a lo largo de la realización de este trabajo, de igual forma, a la Dra. Rocío López de Jaumbelz quien asesoró y apoyó la parte experimental y estructural de esta tesis. Por sus consejos, apoyo moral y legal que me que me brindaron hasta el final de esta historia.

Al sínodo:

Mauricio Alberto Trujillo Roldán

Nathalie Roberte Chantal Cabirol

Isabel Rocío López de Juambelz

José Eduardo Rodríguez Bustamante

Quienes a través de su conocimiento y experiencia como científicos, permitieron la mejora de este trabajo y la conclusión del mismo.

A Herminia Miranda, el ser que me permitió llegar a este diminuto pedazo de tierra inmerso en la gran duda, espacio en el que he construido una historia, en la que el amor ha sido y será el actor principal de este “mi performance”. Gracias por existir.
te amo mamá

A María y Carlos seres de pureza, de sonrisas cálidas y honestas que alimentaron mi voluntad para terminar esta batalla, que alimentan y alimentarán mi única esperanza.

tane prem karu su (gujarati)

A Diana Trejo, por su valentía ante la vida, por ser un sostén en esta travesía.
icniuhtzin (náhuatl)

A Manuel el humano, el amigo, el hermano, mi refugio, tú que sigues dibujando un mundo posible para mí y para los demás.

Je t'aime frère (francés)

A Rosalía Gómez, guerrera ante la muerte, amiga y hermana ante la vida, mujer sabia acompañante de mis batallas y locuras. Por creer en mí.

nimitztlazohtla (náhuatl)

A Francisco Juárez, tu acto melancólico ante la vida, tu acto amoroso constante que nos muestras en tus enseñanzas vividas, habladas y leídas. Tu mejor enseñanza la entona Victor Jara “*yo no canto por cantar*”. Por creer en mí.

kuni jairchun' (mixteco)

A Fernando y Daniel Juárez mis amigos, mis hermanos, por sus risas, que las hice mías, por compartir, por su estar en mi espacio y tiempo. Por creer en mí. ***tenu***

piar karda (punjabi)

A Josefina Álvarez, maestra del camino correcto, la transformación continua, continúa.

ntsěj kypts mejts (mixe)

A Camila quien me confesó en secreto el amor, ***Te amo deseo***

A Samantha García, quien lección grande me ha dejado ver, la hermandad, tu nobleza, tu vida sin tabú, tu inseparable presencia, me hacen no estar sola.

in yaakumech (maya)

A Anuar López, ser humano, amante de la vida, que de su hacer me contagia, que me sostiene, que me cuida, que me guía, que cree en mí.

ami tumako bhalo vashi (bengalí)

A Alicia, Corina, Laura, Maira, Malena y Palapa, seres que han sabido habitar este mundo de la mejor manera, a través de su amistad, nuestra amistad.

ich liebe dich (alemán)

A aquel que cree en mí y al que no cree

A aquel que aún sigue a mi lado y al que ya no esta

A aquel que está por llegar

A la vida

DEDICATORIA

A Oscar Juárez

A la danza

Sin saber la historia
sin saber algo detrás
sin saber mi origen
sin saber de mi
me viste, me desvenaste
frente al agua me plantaste
y me enseñaste el acto imprescindible
dando tu muerte para mi vida
para crear mi nuevo estar
desde el lenguaje del alama
el silencio
la danza

tumse pyaar hai

21: 02: 03 ... ∞

CONTENIDO

1	Introducción.....	2
1.1	La biomasa	2
1.2	La poda	4
1.3	Crisis energética y recursos biomásicos	11
1.4	Biomasa y gasificación en Ciudad Universitaria	12
1.5	Estimación de biomasa.....	15
1.6	Justificación	20
2	Objetivos.....	21
3	Hipótesis	21
4	Materiales y métodos.....	22
4.1	Sitio de estudio.....	22
4.2	Especies bajo estudio	25
4.3	Poda y colecta de datos.....	27
4.4	Análisis de datos de los parámetros de densidad, humedad, porcentaje de ramas secundarias y hojas de la rama central por especie	34
5	Resultados.....	39
5.1	Resultados de los parámetros utilizados para la estimación de biomasa ...	39
5.2	Peso fresco y seco para <i>Fraxinus uhdei</i>	39
5.3	Resultados de peso calculado por tipo de poda y especie.....	41
5.4	Validación de la metodología de estimación de biomasa	48
5.5	Gráficas espejo	49
5.6	Ecuación para la estimación de biomasa en las especies <i>L. lucidum</i> , <i>P. radiata</i> y <i>F. uhdei</i> en Ciudad Universitaria	52
5.7	Análisis estadísticos	57
6	Discusión	61
7	Conclusiones	67
8	Literatura	68

RESUMEN

La estimación de biomasa de árboles, ha sido un tema importante en el ámbito bioenergético, pues la utilización de ésta como fuente de obtención de energía es una alternativa para mitigar los altos índices de gases de efecto invernadero (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

Existen dos formas para la estimación de biomasa: una es a través del corte total del árbol, la otra forma es el análisis dimensional alométrico, donde a través de variables dendrométricas y morfométricas es posible cuantificar la producción de biomasa de un individuo. Para el presente trabajo se empleó este último sistema de estimación de biomasa, con el fin de utilizar la materia orgánica generada por las podas en las áreas verdes en Ciudad Universitaria. Este trabajo, propone una metodología para la estimación de biomasa de ramas primarias a través ecuaciones alométricas y el posible uso de esa materia orgánica en el gasificador del Instituto de Ingeniería, UNAM, para la generación de energía eléctrica y motriz. De acuerdo con la norma ANSI A300 (2008), se emplearon cuatro diferentes tipos de poda que son: limpieza, reducción, clareamiento y mixta; para la obtención de ramaje de tres especies de árboles, *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus uhdei* y *Pinus radiata*, como tres de las especies más abundantes de los jardines de Ciudad Universitaria.

Los resultados obtenidos para este estudio, mostraron diferencias significativas a nivel tratamiento. Se obtuvo la menor cantidad de biomasa a través de las podas de limpieza y clareamiento, con 64 kg y 162 kg en promedio por individuo respectivamente. A diferencia de las podas reducción y mixta de las cuales se obtuvieron los valores más altos de producción de biomasa, con 288 kg y 209 kg en promedio por individuo respectivamente. Mostrando, que la poda de reducción es a través de la cual se pueden obtener grandes cantidades de biomasa de los jardines de C.U.

Con base en lo anterior, se concluye que la estimación de biomasa, obtenida de la poda de árboles en áreas verdes, se puede realizar a través de variables de fácil medición como lo son el diámetro, longitud, peso y humedad de las ramas, pues tales parámetros agrupan factores bióticos y abióticos bajo los cuales se desarrollan los árboles en un sitio determinado. Esta metodología puede ser empleada para la realización de futuras proyecciones de producción de biomasa disponible en rodales y su posible uso en la generación de energía limpia.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 La biomasa

La biomasa es un recurso renovable, materia derivada de seres vivos y productos generados a partir de la transformación natural o artificial de los organismos (INBio, 2004; FAO, 2005; Masera-Ceruti, 2006). La fitomasa como ejemplo de biomasa, es una variable estructural importante en la dinámica de los ecosistemas urbanos, pues a través del proceso de fotosíntesis ocurre la transformación de materia inorgánica a materia orgánica, es decir, la captura y transformación de la energía solar en energía utilizable (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2011).

La energía disponible en las plantas, ha sido aprovechada por el hombre a través del tiempo. Sin embargo, no ha sido la única forma de uso de este recurso natural, también se le han asignado valores intangibles. Como ejemplo están los árboles, en el marco integral de una ciudad, un árbol sano recobra valores como la salud ecológica, la identidad histórica y el valor estético del lugar (Thompson y Whalen, 2002). Dentro del mismo concepto, se considera que un ambiente urbano sustentable y natural debe componerse de áreas verdes, con el arbolado adecuado a las condiciones ambientales del sitio, pues estos espacios ofrecen servicios ecosistémicos que optimizan la calidad de vida humana en las ciudades (GDF, 2000). Algunos ejemplos de estos servicios son:

1. En las urbes, las áreas verdes abren espacios o corredores que propician un ambiente de descanso y confort para el peatón (Thompson y Whalen, 2002).
2. Favorecen el ahorro de energía (Thompson y Whalen, 2002).
3. Mitigan la contaminación sonora producida en las grandes urbes (GDF, 2000 y Thompson y Whalen, 2002).
4. Actúan como barreras de cortaviento, mejora de la calidad del aire, a través de la generación de oxígeno en la atmósfera y absorción de partículas contaminantes como bióxido de carbono (GDF, 2000 y Thompson y Whalen, 2002).

5. Funcionan como microecosistemas, en los que habitan diferentes especies de animales, vegetales, hongos, bacterias, entre otros organismos (Thompson y Whalen, 2002).
6. Las áreas verdes estéticamente realzan el paisaje urbano (GDF, 2000; Thompson y Whalen, 2002).
7. Regulan la temperatura, evitando el enfriamiento ocasionado por el sombreado y la evapotranspiración (GDF, 2000).
8. Proveen el enriquecimiento del suelo, por acumulación de materia orgánica y nutrientes, también el control de la erosión, por la protección del sistema radical que la vegetación confiere al suelo (GDF, 2000).
9. Dan protección en áreas de captación de agua (GDF, 2000).

Por ello, las áreas ajardinadas son de suma importancia en ambientes urbanos, pues no sólo representan los valores estético y ecológico del sitio, sino que además, esto puede incidir sobre el valor de propiedad hasta un 20% (Colegio de Ciencias Agrarias de la Universidad Estatal de Pensilvania, 2005; GDF, 2000).

Una práctica importante para el mantenimiento de áreas verdes es la poda, pues ésta propiciará jardines cohesivos y no fragmentados, que a su vez proveen del cuidado sanitario y ornamental de las áreas ajardinadas necesitan (Thompson y Whalen, 2002; Santacruz-García, 2008). La poda, no solo se ha utilizado con fines de mantenimiento en áreas verdes, también se ha empleado con fines de producción de frutos, flores, semillas o partes del árbol como objeto de comercialización (López de Juambelz, 2000; Bedker *et al*, 2004). Por ello, la poda funge como una herramienta importante, para producir alguna parte específica del árbol o mantenerlo sano estructural y fisiológicamente.

1.2 La poda

Desde el siglo XVIII, se ha estudiado cómo, cuándo y dónde realizar la poda en plantas, además del estudio biológico de la planta, aunado a las necesidades antropocéntricas que hay en las urbes, han permitido definir estándares para su ejecución (Bedker *et al*, 2004). La poda, se define como el retiro selectivo de distintas partes estructurales de la planta, con el propósito de mantener un buen estado fisiológico de ésta; la poda puede realizarse con fines sanitarios, de formación o de fructificación (López de Juambelz *et al.*, 2000; NADF-001-RNAT, 2006; ANSI A300, 2008).

Los estilos de poda, las formas de ejecución de esta práctica, las herramientas a utilizar, las técnicas de poda, entre otros aspectos necesarios como tipos de cortes de ramas, se encuentran en normas que estandarizan la metodología a seguir para realizar una poda. En México, la norma NADF-001-RNAT-2006 para el Distrito Federal, describe las especificaciones sobre la poda, derribo, trasplante y restitución del arbolado. Por otro lado, la norma estadounidense, realizada por *The American National Estándar Institute*, ANSI-A300-2008, se enfoca al cuidado y mantenimiento de los árboles, arbustos y otras plantas leñosas. Dichas normas, recomiendan que el planteamiento de un objetivo específico y ejecución de la poda deba ser realizado y supervisado por un arboricultor.

La poda da carácter y estilo a la vegetación en relación con el diseño del sitio (López de Juambelz, 2000). Los árboles, a lo largo de su desarrollo mantienen la forma natural de su estructura, que en la mayoría de los casos debe ser conservada; cuando se recurre a una poda, es porque se pretende modificar el organismo, por ejemplo se puede inducir su crecimiento para corregir problemas de sanidad o estructurales, siempre y cuando beneficie el crecimiento del árbol (ISA, 2011). Existen dos estilos de poda que permiten mantener la relación visual entre el arbolado y el sitio: el primero es el orgánico, que va orientado a exaltar la estética del arbolado sin cambiar la naturaleza del crecimiento del árbol, el segundo estilo

es el de la poda formal, en donde se le da una forma específica al árbol alterando su forma natural (López de Jaumbelz, 2000).

Los estilos de poda, permiten mantener las áreas verdes en una lectura estéticamente legible y en buen estado sanitario a las plantas de un sitio. Las normas, establecen que es necesario objetivar las razones por las que se pretende podar, pues los efectos de esta práctica en árboles, arbustos y plantas leñosas, inciden en la estructura y fisiología de los organismos vegetales. La dirección del crecimiento, el mantenimiento fitosanitario y el incremento de la productividad de un árbol, son los principales factores bajo los cuales se deben establecer los objetivos para la realización de una poda (López de Juambelz, 2000).

Objetivos de la Poda

Los objetivos de poda, son entendidos como las causas por las cuales es necesaria la realización de una poda, a continuación se describen objetivos considerados por algunos autores como los más importantes en las urbes.

Bedkery Mielke(2004) consideran tres objetivos principales por los cuales efectuar la poda urbana, que son seguridad, salud y estética. Estos objetivos integran la protección del peatón, así como también el mantenimiento de los árboles en las áreas verdes de las ciudades.

Por otro lado, diferentes autores como Sherinski, 2002; Bedkery Mielke 2004; NADF-001-RNAT, 2006; ANSI A300, 2008 y Klingeman *et al.*, 2008, consideran cinco objetivos importantes bajo los cuales debe realizarse una poda; estos son:

1. Para mantener la salud y vigor de la planta cuando el follaje sea muy denso, muy abierto o cuando haya ramas muertas.
2. Para prevenir efectos dañinos en el árbol reduciendo el peso, permitiendo el paso de luz y viento al interior de la copa; y reduciendo la transpiración de las plantas.

3. Para promover la producción de alguna unidad del organismo, esto es en casos de producción de frutos, flores o madera.
4. Para inducir la forma y talla del árbol, manteniendo el tamaño de la planta bajo control, proveyendo de seguridad y no irrupción del arbolado en la infraestructura de una ciudad.
5. Para restaurar o corregir el arbolado urbano, rejuveneciendo al individuo a través de la estimulación en el crecimiento de nuevos brotes.

La Sociedad Internacional de Arboricultura (ISA, 2011), a diferencia de los anteriores autores, establece que antes de la realización de una poda, se deben considerar las respuestas a los cortes o heridas ocasionadas por la poda. A continuación se muestran cuatro objetivos establecidos por la ISA para realizar una poda:

1. Establecer un objetivo particular con respecto a cada individuo a podar, puesto que el árbol tendrá una respuesta fisiológica y anatómica a los cortes realizados.
2. Conocer la técnica de los cortes de ramas a realizar es imprescindible.
3. Tener conocimiento de la forma en la que los árboles sanan sus heridas.
4. Es importante realizar una poda de formación desde las primeras etapas de los árboles, en específico a partir de la juventud, lo que evitará realizar cortes de ramas grandes en la adultez.

En comparación con la ISA y de acuerdo con la NORMA ANSI A300 (2008), son cinco los objetivos a considerarse antes de realizar una poda, a continuación se definen:

1. Seguridad.- se orienta a la reducción de riesgos al hombre y a la infraestructura urbana.
2. Sanidad.- este objetivo se enfoca a la mejora sanitaria y buen mantenimiento del árbol, que provee de su buen desarrollo fisiológico y fisonómico.
3. Estética.- va en relación con la mejora visual y arquitectura del arbolado.
4. Restauración.- con el objetivo de la recuperación de la estructura natural del árbol para el paso de luz y viento al interior de la copa.

5. Corrección estructural.- Enfocada al fortalecimiento de la estructura base del árbol.

En relación con tales autores, los objetivos de la poda se pueden distinguir como cinco, que son por seguridad, sanidad, estética, restauración y corrección estructural. Estos pueden estar dirigidos a distintas estructuras del árbol, como fuste, ramaje, hojas o raíces, dependiendo de lo que el organismo necesite en un tiempo y sitio determinados.

Los objetivos de poda, permitirán decidir sobre el tipo de poda que se pretende ejecutar sobre el árbol, pues uno o varios objetivos de poda pueden estar incluidos en un solo tipo de poda. Los tipos de poda, son la forma guía para eliminar ciertas partes del árbol en relación con los objetivos previamente planteados, para ello es necesario conocer la forma y diseño de los árboles, así como también su tipo de crecimiento (López de Juamblez, 2000; GDF, 2000).

Tipos de poda

El establecimiento de diferentes tipos de poda, va en relación a nivel especie y en algunos casos a nivel individuo, en un sitio determinado los árboles crecen bajo condiciones ambientales similares, pero la respuesta de cada árbol a tales condiciones es diferente, por ello la poda de cada organismo requerirá de especificaciones particulares (GDF, 2000).

Las normas NADF-001-RNAT-2006 y ANSI A300 (2008), describen cuatro tipos de poda diferentes para árboles maduros: (1) limpieza, (2) clareamiento, (3) reducción y (4) levantamiento de copa. A continuación se describen:

1. En la poda de limpieza, se remueven ramas muertas, secas, enfermas, débiles, “chupones” o vástagos epicórmicos, estos últimos definidos como brotes pequeños nacidos de yemas latentes o adventicias (Klingeman *et al.*, 2008; ANSI A300, 2008), ésta debe ser realizada a lo largo del tiempo de vida del árbol, puesto que mantiene la salud del individuo (Sherinski, 2002;

Klingeman *et al.*, 2008; Santacruz-García, 2008; López de Juambelz, comunicación personal).

2. En la poda de clareamiento, se eliminan ramas vivas para reducir la densidad en la copa, permitir el paso de la luz, viento y reducir el peso, por lo general se hace en árboles maduros ya que resulta muy agresiva. No se debe retirar más del 25% de las ramas de la corona y manteniendo la mitad del follaje en dos terceras partes inferiores del árbol, para evitar el desarrollo de vástagos epicórmicos (Thompson y Whalen, 2002; Bedker y Mielke, 2004; ANSI A300, 2008; ISA, 2011). Por lo general, las ramas a cortar desde la base son las que están sobrepuestas (Figura 1) (CCAUEP, 2005).

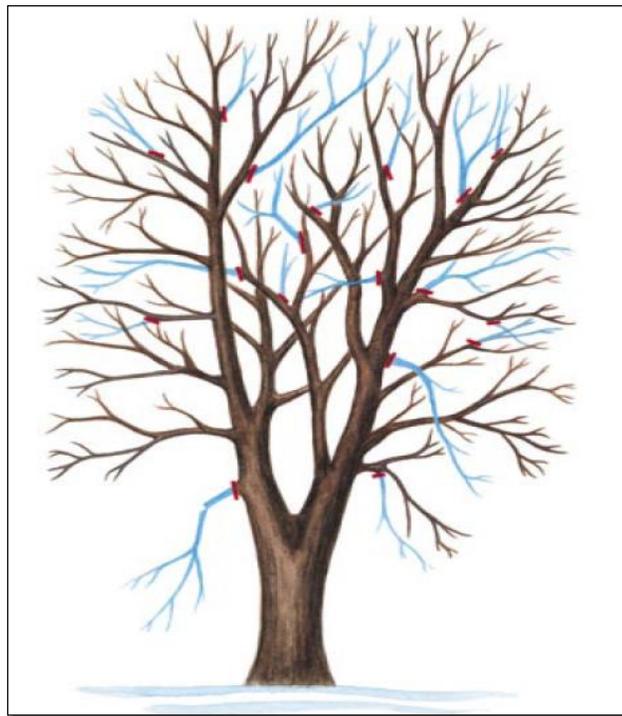


Figura 1. En la poda de clareamiento, se retiran ramas desde el fuste del árbol para permitir el paso de luz y viento, en azul se muestran las ramas a eliminar (Bedker *et al.*, 2004).

3. La poda de reducción o poda de horquilla descendiente, se hace para remover el tejido vivo o muerto cuando las dimensiones del tamaño de un

árbol han rebasado el espacio disponible para su crecimiento, reduciendo a lo largo y ancho la copa del árbol (Figura 2). Es preciso no retirar más de la tercera parte de las ramas, no todas las especies toleran este tipo de poda por lo que deben considerarse sus características anatómicas y tener en cuenta la recuperación natural del árbol (Bedker y Mielke, 2004; CCAUEP, 2005; Klingeman *et al.*, 2008; ANSI A300, 2008).

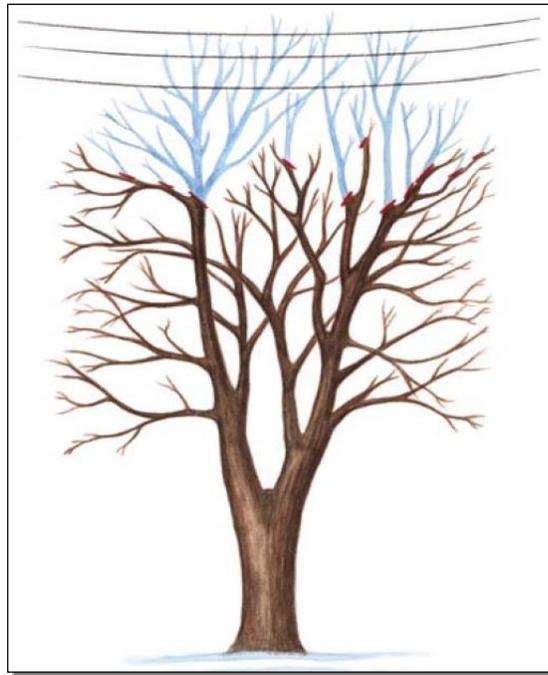


Figura 2. Poda de reducción de copa, se muestra la eliminación de ramas con la técnica de despunte (Bedker *et al.*, 2004).

4. En la elevación de copa o levantamiento se eliminan ramas, por lo general son ramas inferiores, que estén obstruyendo el paso peatonal o la visión de la infraestructura (Figura 3). En este caso, la proporción a retirar de la corona viva en un árbol no debe pasar del 33% de la copa (Bedker y Mielke, 2004; Klingeman *et al.*, 2008 y ANSI A300, 2008).

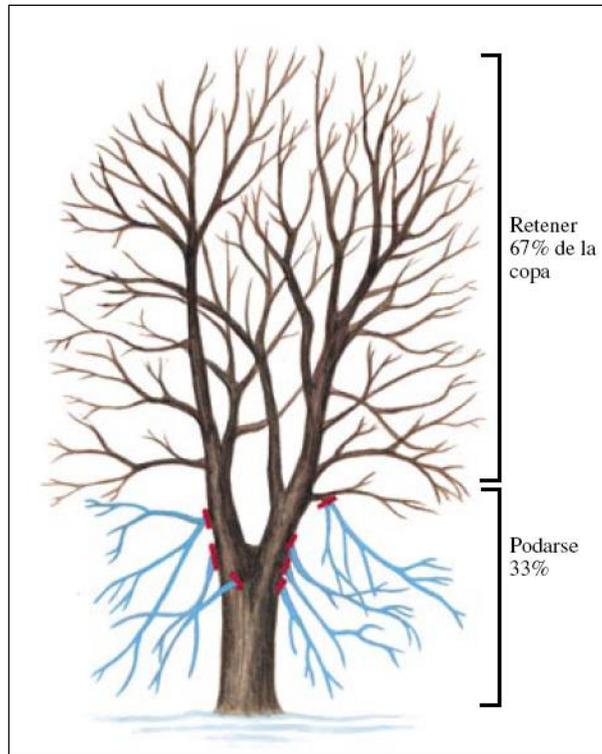


Figura 3. Poda de elevación de copa, no se debe retirar más de un tercio de la copa del árbol en relación con la altura total (Bedker *et al*, 2004).

Como generalización para los cuatro tipos de poda, los cortes a realizar en el ramaje de un individuo no deben sobrepasar los 4cm de diámetro, ya sea de ramas primarias, secundarias y las consecuentes (GDF, 2000; NADF-001-RNAT-2006; ANSI, 2008). Las heridas grandes cicatrizan lentamente, tiempo en el que el árbol puede ser infectado y propiciar nuevos brotes sin crecimiento dirigido en abundancia, por otro lado, la poda de ramas con diámetros superiores a los 4 cm propician cortes reiterativos, es decir más cortes entrenado y presencia de muñones (García-Ríos, 2009).

La ANSI A300 (2008), establece que para todos los casos deben especificarse la localización y dimensiones de las ramas a remover. También establece, que la utilidad y adecuación de los cuatro tipos de poda, radica en vislumbrar que en una urbe es necesario el uso fácil y útil del espacio, al mismo tiempo que se provea el cuidado fisiológico del arbolado.

1.3 Crisis energética y recursos biomásicos

El uso inadecuado que el hombre le ha dado a los recursos naturales renovables y no renovables, así como la actividad industrial, han desencadenado un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos provocando la degradación de los ecosistemas y con ello la extinción gradual de distintas especies (IPCC, 2007). En vista de este problema a nivel mundial, el protocolo de Kioto estableció, la reducción de gases de efecto invernadero en los países más industrializados, a través de alternativas de desarrollo en distintas áreas de investigación como: el fomento a la eficiencia energética e implementación conjunta de proyectos, mecanismos de desarrollo limpio y comercio de emisiones, con el objetivo general de mitigar el deterioro ambiental (ONU, 2010). Una alternativa para mitigar tal deterioro es la utilización de la bioenergía, definida como la energía que es obtenida a través de la biomasa (REMBIO, 2010).

Alrededor del mundo, se ha recurrido a la utilización de combustibles fósiles como el petróleo y la energía nuclear para el sustento de la vida cotidiana del hombre. Sin embargo, hoy en día las reservas de petróleo se descubren a un ritmo más lento, que la demanda que exige la sociedad (ONU, 2010); por tal situación, los elevados precios del petróleo obligan a explorar fuentes de energía alternativas tales como la bioenergía (IPCC, 2007). La biomasa, como ejemplo de bioenergía, puede ser convertida a combustible sólido, líquido o gaseoso para ser utilizado en la generación de calor y electricidad (Masera-Ceruti, 2006). Cabe resaltar, que la biomasa es uno de los recursos energéticos renovables, que proporcionan emisiones bajas de dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂) y de óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que contiene menos sulfuro y nitrógeno a diferencia de los combustibles fósiles. Por ello la utilización de residuos biomásicos, es una alternativa para contribuir a la mitigación del calentamiento global (López-Guadarrama, 2008).

Actualmente, el 11% del consumo de energía en el mundo es cubierto por la biomasa (IPCC, 2007). Ya existen ejemplos de países que utilizan biomasa, tal es

el caso de Finlandia y Suecia que lideran el consumo de biomasa de desechos forestales y agrícolas con aplicación en el sector industrial, a diferencia de Francia que la dirige al sector doméstico y servicios locales (Parikka, 2004). Cabe mencionar que no toda la biomasa está disponible para su uso, pues resulta costoso y difícil su aprovechamiento; se ha estimado que la energía proveniente de la biomasa, fitomasa y zoomasa, de todo el planeta es veinte veces superior a la energía de todos los combustibles fósiles utilizados por año (REMBIO, 2009).

Para el caso de México, la biomasa, la leña y el bagazo de caña, cubren el 8% de la demanda de energía primaria (Masera-Ceruti, 2006). Existen dos fuentes importantes de obtención de biomasa en áreas verdes, la primera es a través de la poda de pastos y la segunda es por medio de las podas de árboles y arbustos; actualmente se genera un porcentaje muy alto de desechos sólidos biomásicos o residuos de jardinería, pues tan sólo en la Ciudad de México se tiene estimado que el 5.12% de los desechos orgánicos que se generan corresponden a este tipo de residuos (SEMARNAT, 2001).

1.4 Biomasa y gasificación en Ciudad Universitaria

En los últimos años, la gasificación de residuos sólidos biomásicos ha sido una de las alternativas de producción de energía (Masera-Ceruti, 2006). Actualmente, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se investiga sobre el proceso de gasificación de flujos paralelos, proceso termoquímico de residuos sólidos biomásicos a energía eléctrica y motriz.

El proceso de gasificación de la Planta Piloto del Instituto de Ingeniería (Figura 4), resulta ventajoso, pues es un sistema que se diseñó con la prioridad de darle un aprovechamiento sustentable al material de desecho orgánico disponible. A continuación se presentan tres características importantes de la producción de energía a través de la gasificación (De la Rosa-Urbalejo, 2010):

1. Los índices de contaminantes que este proceso emite son muy bajos.
2. La fuente energética para este mecanismo, son todos aquellos líquidos o sólidos que a través de un proceso termoquímico. desprendan gases como el monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) principalmente, también pueden contener CO, CH₄, N₂, tal es el caso de los residuos biomásicos.
3. Los residuos de tal proceso, como ceniza y alquitranes, son capturados y pueden utilizarse como un subproducto.



Figura 4. Estructura general y elementos que componen la Planta piloto de Gasificación del Instituto de Ingeniería UNAM (Barrera, 2008)

El proceso funcional de la Planta Piloto del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 5), comprende tres procesos principales: (1) ocurre un tratamiento de la biomasa a la entrada del gasificador de flujos paralelos, en donde la biomasa es triturada y secada; una vez contenida en la tolva, la humedad del residuo biomásico es disminuida hasta un 88%. (2) En el sistema de gasificación, la biomasa ya seca pasa por un tornillo sin fin hacia el reactor, donde ocurre la combustión y (3) la obtención del gas de síntesis, que será depurado a través de un filtro, para ser

inyectado a un motor de combustión interna, la energía que resulta de este proceso es direccionada hacia un generador de energía eléctrica, que utilizará, como combustible para su funcionamiento el gas de síntesis obtenido del proceso de gasificación.

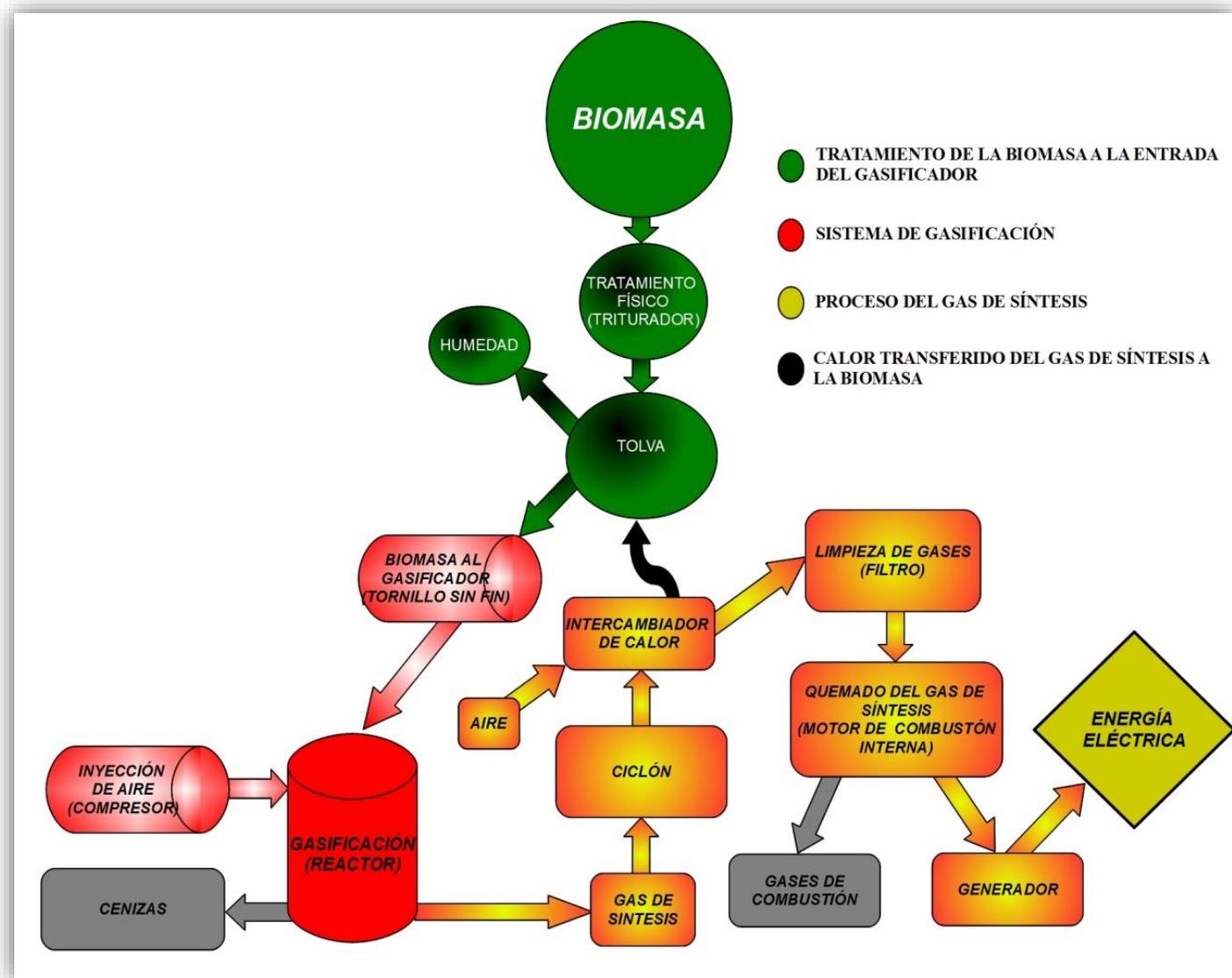


Figura 5. Proceso de gasificación de la Planta piloto del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para Ciudad Universitaria (C.U.), se han realizado trabajos de cuantificación de los desechos de jardinería disponibles en los contenedores. Según Cano-Santana *et*

al. (2007), la cantidad de biomasa de los contenedores de C.U. por poda es alrededor de 473 kg de peso fresco, en donde la hojarasca mixta de fresno, eucalipto, liquidámbar, *Ficus* y triturado de madera de origen no identificado, fueron los elementos florísticos mayormente encontrados, los datos obtenidos por el autor refleja la gran disponibilidad de este recurso.

1.5 Estimación de biomasa

La biomasa, es la materia orgánica que puede ser cuantificada en peso fresco y peso seco. Su estimación permite conocer los montos de carbono capturados en las masa forestales, así como también cuantificar la biomasa contenida en diferentes estructuras del árbol, como fuste, ramas, hojas y raíces (Schlegek *et al.*, 2000).

Existen dos formas de estimación de biomasa: una a través del corte total del árbol, seccionarlo y pesar cada una de sus partes; la otra forma es indirecta, análisis dimensional alométrico, que consta de la medición de diferentes partes de las estructuras del árbol y determinación de ecuaciones alométricas (Cano-Santana, 1994; Avendaño, 2006).

Cano-Santana *et al.* (2007), realizaron un estudio de estimación de biomasa en eucaliptos de Ciudad Universitaria UNAM, consideraron el parámetro diámetro basal (DB) del tronco, como medida fundamental para la determinación de la cantidad de biomasa almacenada en esta especie. Por otro lado Fehrmann y Kleinn (2006) y Siddiqui *et al.* (2010), encontraron que el diámetro a la altura del pecho (DAP), DB y la altura del árbol, son las mejores variables dendrométricas que pueden incluirse en ecuaciones para estimación de biomasa. De igual manera, Arias (2005), analizó la morfometría del árbol en plantaciones forestales de diferentes especies, encontró que el DAP, DB y altura total del árbol son variables dendrométricas de fácil medición, además de ser considerados como mejores estimadores de biomasa. Díaz-Franco *et al.* (2007) también realizó un estudio sobre la estimación de biomasa en *Pinus patula*, utilizó el área basal del tronco además

de todas las categorías diamétricas posibles, como los mejores estimadores de biomasa.

Por otro lado, Arno-Seitz (1995) ha encontrado relación entre las diferentes variables de ramas, como lo son la longitud, el diámetro de la rama central (DRC), y la producción de biomasa en un individuo. Entre más larga sea una rama, su diámetro será más grande, por lo tanto, la cantidad de biomasa que pueda llegar a generar un árbol, está directamente relacionada con la dendrometría, pues nos permite conocer la relación entre las variables y la producción de biomasa de un individuo. El autor, también describe que hay relaciones lineales entre el largo de la rama y el diámetro del tronco y del diámetro del tronco con el diámetro de la copa.

También Fehrman y Kleinn (2006) analizaron las consideraciones generales en el uso de ecuaciones alométricas, describieron que existe una mayor relación entre el DAP y la altura total del árbol con la producción de biomasa en un individuo, pues el DAP se mostró como uno de los mejores estimadores. Djomo *et al.* (2010) también encuentra al DAP como variable base para la estimación de biomasa.

Gasparri y Manghi (2004) estimaron, la cantidad de biomasa aérea total de árboles en diferentes regiones de Argentina, multiplicaron el volumen total del árbol por la densidad promedio de la madera de la especie; a diferencia de los autores anteriormente mencionados, consideraron que para calcular la biomasa de un individuo es necesario conocer: la densidad de madera de la especie, biomasa del fuste y el factor de expansión constante, que refiere a la biomasa contenida en la copa.

En comparación con los estudios anteriores, Velázquez-Martí (2011), consideró la obtención de biomasa a partir de las podas, bajo diferentes condiciones ambientales y variedades en cuanto a nivel especie. Para este estudio se consideraron diferentes variables, condiciones ambientales, arquitectura del árbol, especie, crecimiento, edad, año de última poda, altura del árbol y DAP, como factores importantes para

la evaluación de biomasa. En otro estudio realizado, Gyenge *et al.* (2009) reveló que el DAP fue la mejor variable para determinar la cantidad de biomasa de hojas; en cambio, el mejor estimador de biomasa relacionado con las ramas fue DB.

Phillips *et al.*(2011) considera que es importante conocer el manejo de poda realizado en el árbol, puesto que ésta refleja la alteración de sus interdimensiones, tales como el espacio ocupado, la vitalidad y su estado morfológico actual. Esto es por el potencial fotosintético de la copa en función de la altura, puesto que el DAP incrementa cuando al longitud de la copa viva incrementa y altura total del árbol aumentan. A través de diferentes estudios, se ha encontrado que la poda en ramas vivas altera significativamente el crecimiento en los árboles. Por ello, la poda puede ser utilizada para inducir el crecimiento de alguna parte específica del árbol, con la finalidad de obtener biomasa (Costas, 2005; Avedaño, 2008).

En cuanto a la distribución de la producción de biomasa en un árbol, Segura y Kanninen (2006) encontraron, que en algunas especies de café y árboles de sombra, las mediciones de variables como DAP, altura total y DB son variables altamente favorables para la estimación de biomasa. También, registraron que el total de la biomasa aérea se distribuye en promedio de la siguiente manera: 57% corresponde al tallo, 36% a las ramas y 7% al follaje.

Acosta-Mireles *et al.* (2002) analizaron que, los fotosintatos en una planta se destinan fundamentalmente a la producción de madera, por lo que su follaje incrementa linealmente en relación con la madera, por lo tanto la producción de biomasa asignada a las ramas gruesas aumentara gradualmente con el tamaño del árbol de 5 a 8%, mientras que la producción asignada a las ramas delgadas es de 1 a 2%. Los autores concluyen que, el diámetro de las ramas también es una variable que está relacionada con la estimación de biomasa.

Existen otras consideraciones ambientales y morfometría del arbolado, que inciden en la producción de biomasa, Avedaño-Hernández (2008) establecen que, existe una fuerte relación entre el espacio disponible para el árbol a lo largo de su

desarrollo y las dimensiones que éste alcance; por lo tanto, la generación de biomasa estará influenciada por el volumen de la copa, la presencia de otros individuos y factores ambientales que intervendrán en la producción de biomasa.

En un estudio de estimación de biomasa en ramas, realizado por Hernández-Miranda (2010), se encontró que el diámetro de las ramas es uno de los estimadores importantes para la cuantificación de biomasa en la copa, en el estudio realizado se consideraron solamente ramas centrales que presentan diámetros menores a 4 cm. Para tal estudio, el autor utilizó 13 ramas por árbol y encontró que los resultados se veían alterados cuando se incluían más de 13 ramas por individuo. Para la estimación de biomasa en ramas, se consideraron diámetros, longitudes y pesos de hojas y ramas por separado. A diferencia de los trabajos anteriores, sólo consideraron variables dendrométricas de las ramas, no se incluyeron variables como, DAP y DB en la estimación de biomasa.

Muños (2005) en un estudio realizado, consideró que el DAP, peso de ramas y diámetro de la copa (DC) son las mejores variables para la estimación de biomasa de hojas. Por otro lado, para la estimación de ramas, Avendaño-Hernández (2008) utilizó las variables DAP, altura total, DC, altura total y profundidad de copa (PC) como variables principales. También considero otras variables para la cuantificación de biomasa total de una parcela, como biomasa del fuste, biomasa de ramas, diámetro promedio del fuste, altura promedio, diámetro promedio de la copa, profundidad promedio de la copa y área promedio de toda la parcela. Cabe destacar que para la estimación de biomasa de una parcela, se consideró la profundidad de la copa, como índice morfométrico, pues este muestra la relación entre las condiciones bajo las cuales se ha desarrollado un individuo en un ambiente y la respuesta a estos cambios a lo largo de su ciclo de vida; existen otros índices morfométricos para la estimación de biomasa como: el índice de espacio vital, porcentaje de copa e índice de copa, que aún siguen siendo estudiados (Arias, 2005).

Por otro lado, Cano-Santana *et al.* (2007) recopila los principales factores que inciden en el proceso de producción de biomasa, pues de estos dependerá su crecimiento, vigorosidad y su sanidad, tales factores son:

- 1) la disponibilidad del agua (Lynch, 1995).
- 2) la disponibilidad de nutrimentos (Augustine *et al.*, 2003).
- 3) la temperatura (Bonan, 1993).
- 4) la profundidad del suelo (Lynch, 1995).
- 5) la cobertura del follaje (Walmsley *et al.*, 1987).
- 6) la saturación lumínica del fotosistema (Webb *et al.*, 1983).

en función del desarrollo del organismo a lo largo de su ciclo de vida, la biomasa que el individuo produzca dependerá de los factores ya mencionados (Cano-Santana *et al.*, 2007).

Los estudios presentados anteriormente, revelan que variables dendrométricas como el diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro basal (DB), altura del árbol y cobertura del árbol, funcionan como los mejores estimadores de biomasa total de un árbol; por otro lado, el diámetro de las ramas menor a 4 cm y profundidad de la copa, fungen como parámetros que pueden permitir la cuantificación de biomasa en ramaje de la copa. Los índices morfométricos, también son parámetros importantes para conocer la producción de biomasa en un individuo, pues permiten conocer las relaciones interdimensionales entre un árbol y su espacio, como la estabilidad, vitalidad, inclusive la productividad de un individuo. Tanto los parámetros dendrométricos como los morfométricos, permiten caracterizar el objeto de estudio, para poder decidir sobre el manejo adecuado del arbolado, ya sea para la producción o mantenimiento de éste.

1.6 Justificación

Los métodos para estudiar biomasa, por lo general, consisten en derribar completamente los árboles, los estudios alométricos y morfométricos permiten conocer las variables importantes para cuantificar la biomasa generada por un árbol sin el derribo total de éste. La estimación de biomasa de árboles ha sido un tema importante en el ámbito bioenergético, pues la utilización de ésta como fuente de obtención de energía, es una alternativa para la mitigación de los altos índices de gases de efecto invernadero (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

La estimación de biomasa disponible en un sitio determinado, ha sido uno de los puntos focales para la caracterización de ecosistemas y el posible uso de recursos naturales. Por ello, el análisis dimensional alométrico es una forma fácil y económica para realizar estudios de estimación de biomasa. La utilización de la poda como fuente de obtención de materia orgánica resulta ventajoso, pues desde el punto de vista ecológico, los residuos generados por las podas de árboles en áreas verdes, son considerados como basura, el cúmulo de grandes toneladas al año ocasionan problemas ambientales, por lo que este residuo puede ser utilizado como una fuente de alternativa energética, por poseer un potencial para la generación de energía eléctrica y motriz.

La estimación de biomasa en ramas, aún no ha sido ampliamente desarrollada como la estimación de biomasa del fuste. Hoy en día, se sabe que no existen ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de ramas primarias en árboles, por lo que la evaluación de la productividad de biomasa en la copa es de suma importancia, para poder conocer la disponibilidad de materia orgánica de los ecosistemas y su posible uso en la generación de energías limpias. Es de suma importancia, estudiar la cantidad de biomasa disponible en las áreas ajardinadas de Ciudad Universitaria, estableciendo un plan de manejo de poda adecuado para las tres especies de árboles más abundantes de Ciudad Universitaria que son: *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus uhdei* y *Pinus radiata*.

2 Objetivos

Objetivo general

Determinar ecuaciones alométricas para conocer la cantidad de biomasa de ramas primarias, a través de diferentes modelos de poda para *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata*, árboles que se encuentran dentro de las especies más abundantes de las áreas verdes de Ciudad Universitaria UNAM, México.

Objetivos particulares

1. Analizar la norma ANSI A300 (2008), con el fin de determinar el tipo de poda adecuado para cada especie bajo estudio.
2. Determinar el contenido de humedad y densidad de las ramas de *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata*.
3. Conocer la biomasa relativa de hojas y ramas secundarias, con respecto a la rama primaria seca para cada especie.
4. Desarrollar ecuaciones alométricas que determinen la cantidad de biomasa contenida en ramas primarias de la copa.

3 Hipótesis

Sí la biomasa potencialmente utilizable en un rodal, puede ser estimada a partir de una metodología basada en la determinación de ecuaciones alométricas, resueltas a partir de la aplicación de diferentes tipos de poda y de variables dendrométricas de fácil medición, como longitud, diámetro, peso y humedad de ramas primarias, entonces, es posible determinar los parámetros de diseño de un gasificador idóneo para la producción de energía eléctrica en un sitio determinado.

4 Materiales y métodos

4.1 Sitio de estudio

El campus de Ciudad Universitaria UNAM, ubicado en México Distrito Federal, es un ejemplo de ambiente urbano. Se compone de elementos importantes que proveen de servicios ecosistémicos a la urbe, por un lado la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), caracterizada por la presencia de matorrales xerófilos (Redowski, 1954) y el otro componente importante son las áreas de jardines, datos registrados revelan que 95 ha de 725ha que comprenden C.U. pertenecen a estos jardines (Cano-Santana *et al.*, 2007).

Ciudad Universitaria se caracteriza por presentar una clima Cwbg (clima templado subhúmedo con lluvias en verano), la temperatura media anual es de 15.5° C y una precipitación anual de 870 mm; las épocas de lluvia ocurren de junio a octubre y la temporada de seca es de noviembre a mayo (Castillo *et al.*, 2002). La topografía del lugar es accidentada, rocoso con grietas hondonadas, debido a que este suelo se originó a partir de la erupción del volcán Xitle, se pueden encontrar otras áreas de origen geológico y orgánico. El suelo está caracterizado por un sustrato basáltico gris oscuro con microcristales de olivino, también se caracteriza por presentar un drenaje eficiente (Redowski, 1954, Valiente Banuet y de Luna, 1990; Cano-Santana, 1994).

La vegetación que caracteriza las áreas de jardines es muy diversa, cuenta con 16,852 árboles y arbustos, de los cuales hay 43 familias, 73 géneros y 111 especies (Cano-Santana *et al.*, 2007). Algunas de las especies de árboles que podemos encontrar en estas áreas son: *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum*, *Pinus radiata*, *Acacia retinoides*, *Alnus acuminata*, *Bursera cunetata*, *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lucitanica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina*, *Jacaranda mimosifolia*, *Magnolia grandiflora*, *Quercus rugosa*, entre otras (Cano-Santana *et al.*, 2007; Olalde-Oldaña comunicación personal).

Estudios realizados sobre la diversidad de especies encontradas en los contenedores de Ciudad Universitaria, revelan que hay 133 especies de las cuales 16 son las más abundantes (Cano-Santana, *et al.*, 2007) (Cuadro 1), éstas se encuentran sujetas a mantenimiento por parte de la Dirección General de Obras y Servicios (DGO-UNAM).

Cuadro 1. Especies arbóreas más abundantes en los jardines de Ciudad Universitaria, (Cano-Santana *et al.*, 2007)

Especie	Nombre común	Porcentaje
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno	18.31%
<i>Ligustrum lucidum</i>	Trueno	11.51%
<i>Eucalyptus camldulensis</i>	Eucalipto	10.82%
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	4.62%
<i>Pinus radiata</i>	Pino, pino monterrey	4.62%
<i>Cupressus aff. Forbesii</i>	Ciprés Tecate	4.09%
<i>Schinus molle</i>	Pirul	3.97%
<i>Cupressus sempervirens</i>	Ciprés italiano	3.54%
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Liquidámbar	3.48%
<i>Cupressus lusitánica</i>	Cedro blanco	3.18%

A través del inventario de especies de árboles, realizado por el Jardín Botánico, se registró que para *Fraxinus uhdei* existen alrededor de 3377 ejemplares, *Ligustrum lucidum* cuenta con 1323 y *Pinus radiata* cuenta con 901 individuos, para el año 2006 (Olalde-Oldaña, comunicación personal).

Para la delimitación del área de estudio (Figura 6), se utilizó una fotografía satelital de Ciudad Universitaria y datos del inventario florístico de las áreas verdes de C.U., proporcionados por el Instituto de Biología, UNAM (2010). Cabe mencionar que para la selección de esta zona de trabajo, se consideraron áreas que no pertenecieran a la Reserva Ecológica del Pedregal (REPSA), ni las áreas de amortiguamiento de ésta misma.

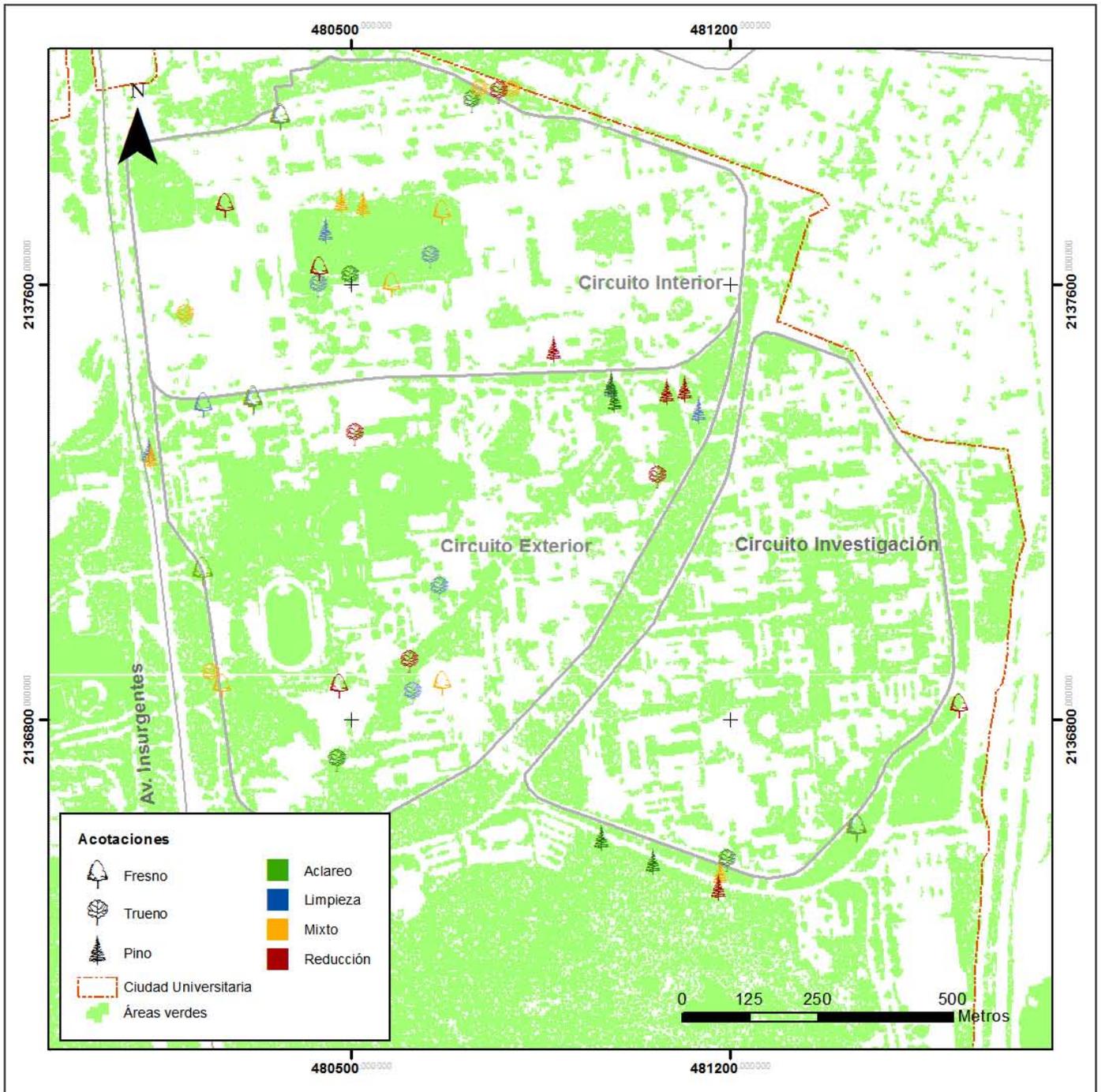


Figura 6. Mapa de Ciudad Universitaria, las especies bajo estudio fueron *Pinus radiata*, *Ligustrum lucidum* y *Fraxinus uhdei*, los colores distinguen los diferentes tipos de poda. Mapa realizado en ArcMap 10.

4.2 Especies bajo estudio

De acuerdo con los datos registrados de la diversidad de organismos presentes en los jardines de C.U., se eligieron tres de las especies más abundantes, que son *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata*, como la población arbórea para la estimación de biomasa para este trabajo. A continuación se presenta una breve descripción de cada especie.

Fraxinus uhdei (Oleaceae)

De acuerdo con el Herbario Nacional de México, el fresno pertenece la familia Oleaceae, algunos de sus nombres comunes son madre de agua, shamelash y evergreenash. Se distribuye desde el área central occidental de México hasta Guatemala y crece a una altitud de 1,100 a 2,600 msnm (Francis, 1990; CONABIO, 2010).

Son árboles grandes, con copa irregular y follaje deciduo, hojas opuestas, pinnada-compuestas, foliolos aserrados; las semillas son aladas y tienen forma de paleta, de 2.5 a 4 cm de largo; con fructificación a finales del verano; presenta pequeñas flores monoicas en panículas grandes de 13 a 20 cm de largo (CONABIO, 2010) (Figura 7). El fresno es popular como un árbol de sombra en las calles, parques y patios (GDF, 2000).



Figura 7. Se muestran las semillas aladas de *F. uhdei* (Instituto de biología UNAM, 2010)

Ligustrum lucidum (**Oleaceae**)

También perteneciente a la familia Oleaceae, algunos de sus nombres comunes son lugustro y aligustre del Japón (Gilman y Watson, 1993). Es originario de China, se puede encontrar en Corea y Japón (Sánchez, 2005).

Es una especie que alcanza alturas de 25 m, sus hojas perenes son opuestas, verdes oscuras, con corteza lisa, lúcidas, ovadas o elípticas de 15 cm de largo, ápice acuminado, base amplia. Presenta flores hermafroditas, actinomorfas, tetrámeras, amarillentas dispuestas en amplias panojas piramidales multifloras y terminales que generalmente sobresalen del follaje. Florece a fines de primavera y comienzos del verano, presenta un fruto una baya esférica de color azulado, menos de 1 cm de diámetro es un árbol muy resistente a las condiciones urbanas y a los insectos (CONABIO, 2010).

Se utiliza principalmente como árbol de alineación en calles y avenidas (Figura 8), así como para hacer setos vivos; por su forma de crecimiento es muy común que se utilice para plantarse en banquetas angostas, también es utilizada en la medicina para el reumatismo (CONABIO, 2010).



Figura 8. Ejemplar de *Ligustrum lucidum* (Instituto de Biología UNAM, 2010)

Pinus radiata (Pinacea)

Pinus radiata tiene como sinónimo *Pinus insignis* pertenece a la familia Pinaceae; algunos de sus nombres comunes son el pino candelabro y pino de Monterrey (IBIUNAM, 2011). Es una especie originaria de Monterrey, su distribución abarca Estados Unidos y México.

Esta especie alcanza una altura de 60 m y más de 10 m de diámetro; presenta tronco cónico, recto, con un sistema radicular potente, con raíces laterales bien desarrolladas y muy extendidas (Figura 9); la corteza interna es de color crema rosáceo, segrega una resina transparente (IBIUNAM, 2000). Presenta acículas en grupos o fascículos de tres. Flores en forma de conos agrupadas; el fruto es un cono leñoso, grande, parecido a una piña. Algunos usos de esta especie son para muebles, pulpa y papel, envases, tableros aglomerados, tableros contrachapados y de fibras, ebanistería y entarimados.



Figura 9. Resina y hojas de *P. radiata*, (Instituto de Biología UNAM, 2010).

4.3 Poda y colecta de datos

Selección de cuatro tipos de poda

Para este trabajo de investigación, se obtuvo la biomasa a través de la aplicación de diferentes tipos de podas. De acuerdo con la norma ANSI A300 (2008), en la Figura 10, se observa el seguimiento que se dio para seleccionar los tipos de poda,

según la norma. El apartado de consideraciones, denota la importancia del conocimiento biológico de las especies bajo estudio, para posteriormente determinar los objetivos de acuerdo con las necesidades del arbolado, finalmente el apartado de metodología incluye la selección de la poda adecuada al individuo, así como también las partes del árbol a retirar.

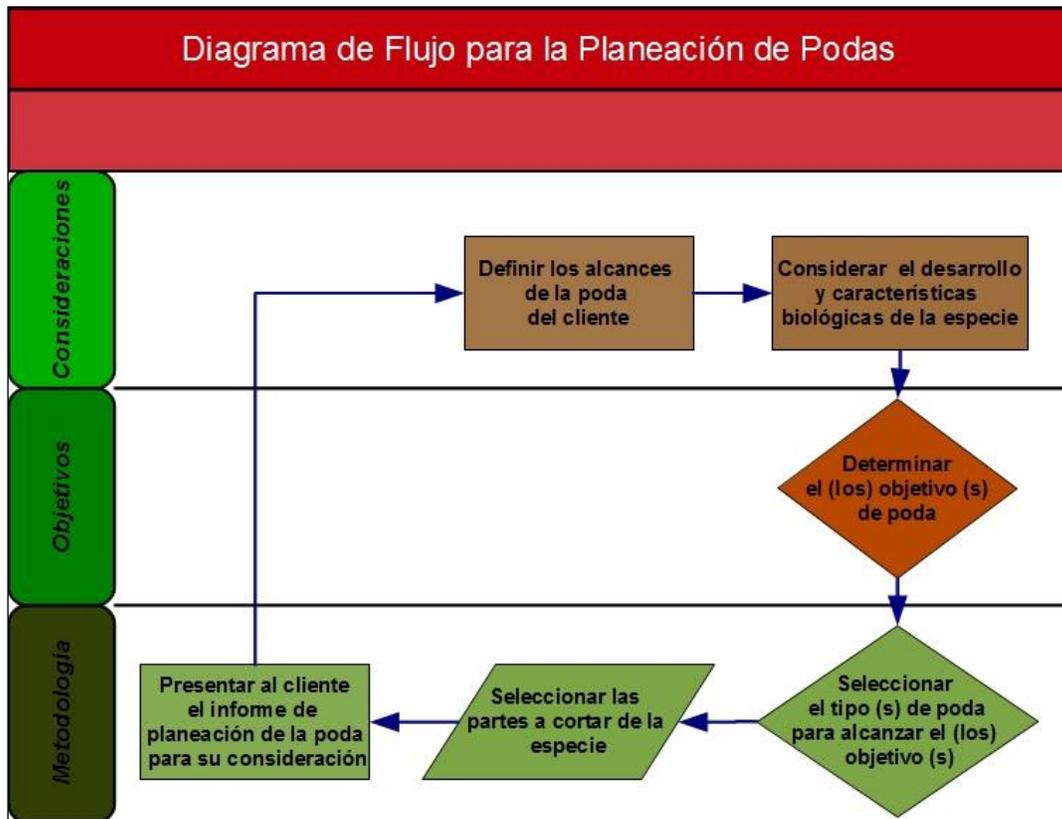


Figura 10. Se muestra la secuencia a seguir para realización de una poda, con base en tres apartados: metodología, objetivos y consideraciones (ANSI A300, 2008)

Los objetivos y tipos de poda correspondientes para este estudio fueron:

TIPOS DE PODA	OBJETIVOS DE PODA
Limpieza	seguridad, sanidad y estética
Clareamiento	restauración y estética
Reducción	seguridad, corrección y estética
Mixta	Contiene objetivos de limpieza y clareamiento, que son seguridad, sanidad, restauración y estética

Cabe mencionar que la combinación de limpieza y clareamiento forman la poda Mixta, esta última no se encuentra en los tipos de poda establecidos en la norma ANSI A300 (2008).

Características de las ramas podadas

En la figura 11, se esquematizan las ramas primarias y ramas laterales (secundarias, terciarias) a eliminar en las podas de reducción y clareamiento, para el caso de limpieza sólo se eliminaron ramas muertas o quebradas.



Figura 11. En las podas de clareamiento y reducción, se retiran ramas desde el fuste del árbol para permitir el paso de luz y viento, en azul se muestran las ramas a eliminar (Bedker *et al*, 2004)

Según las normas ANSI A300 (2008) y NADF-001-RNAT (2006), el porcentaje estandarizado para el retiro de ramas de la acopa es de máximo 25% del follaje total del árbol por año, que permite mantener en buen estado sanitario al individuo. Por otro lado, de acuerdo con García-Ríos (2009) y Hernández-Miranda (2010), las ramas a eliminar en una poda no deben sobrepasar los 4 cm de diámetro del tronco de la rama central.

Se estableció cortar de 13 a 15 ramas por individuo, ya que estudios previos realizados por Cano-Santana *et al.* (2007) en relación con dendrometría y estimaciones de biomasa, presentan el mejor ajuste para la R^2 cuando se considera este número de ramas por individuo, también en el trabajo realizado por Hernández-Miranda (2010) se comprobaron los mejores ajustes de correlaciones utilizado entre 13 y 15 ramas. El porcentaje de ramas a retirar en un árbol cuando se realiza una poda, considerado como el 25% de la copa, es importante puesto que es la forma menos agreste para la fisiología del árbol, los autores explican lo anterior como razón por la cual no más del 25% de la copa en una poda debe ser retirada, pues éste representa el rango de 13-15 ramas como factor importante para la estimación de biomasa.

Tamaño de la muestra

De acuerdo con Acosta-Mireles *et al.* (2002) y Díaz-Franco, *et al.* (2007), con el fin de que las categorías diamétricas fueran variables, así como también que el aumento del intervalo de variación de los árboles medidos fuera amplio, se determinó el tamaño de la muestra, para cada una de las tres especies, de 16 individuos, un total de 48 árboles. Se realizó la selección de los organismos más representativos de cada especie, considerando aquellos que se encontraran en las mejores condiciones sanitarias, con fuste recto y que fueran individuos adultos. En total se podaron 16 árboles por especie, se asignaron cuatro árboles para cada uno de los diferentes tipos de poda, cuatro podas de limpieza, cuatro podas de clareamiento, cuatro podas de reducción y cuatro podas mixtas para cada especie.

Variabes medidas

De los 16 árboles muestreados por especie, en total se obtuvieron 208 ramas, en total 624 ramas de las tres especies. Se realizaron mediciones *in situ* para cada rama, que fueron peso fresco de la rama completa, longitud a lo largo y ancho de la rama completa, diámetro y humedad promedio del tronco de la rama central.

Se determinaron tres parametros necesarios para estimacion de biomasa, que fueron humedad, densidad de madera, porcentaje de ramaje secundario y porcentaje de hojas con respecto a la rama principal para cada especie. Para tales estudios se midieron las siguientes variables:

- Para registro de humedad y densidad por especie:
 1. peso fresco de la rama central
 2. diámetro promedio de la rama central
 3. registro de humedad hasta secar a $\leq 12\%$
 4. peso de la rama central a 12% de humedad
- Para estimar el contenido de hojas por especie:
 1. peso de hojas
 2. peso de ramaje secundario
 3. peso de la rama central
- Para calcular el contenido de ramaje secundario por especie:

Se empleó el peso de hojas, el peso de la rama central secundaria y el peso del ramaje secundario; posteriormente, a una muestra de cinco ramas secundarias por individuo muestreado se obtuvieron las siguientes variables:

 1. peso fresco de rama secundaria sin hojas
 2. longitud de rama secundaria
 3. diámetro promedio de rama central de cada rama
 4. registro de humedad hasta secar a $\leq 12\%$
 5. peso de rama secundaria sin hojas a 12% de humedad

Cabe mencionar que la biomasa empleada para el gasificador requiere una humedad del 12%, humedades superiores provocarán el hinchamiento de los trozos de madera, lo que impide el procesamiento de ésta. La Figura 12, representa la metodología propuesta para la estimación de biomasa de *F. uhdei*, *L. lucidum* y *P. radiata*. De acuerdo con las normas ANSI A300 (2008) y NADF-001-RNAT (2006), el conocer de la biología de la especie y contar con el personal capacitado, arboricultor, fueron elementos importantes para la realización de este trabajo. A continuación se resumen el método seguido para este estudio:

- 1.- Determinación del área de muestreo.
- 2.- Determinación de objetivos y selección de poda.
- 3.- Obtención de las variables: peso fresco de la rama completa, es decir, con todos sus componentes hojas, ramaje secundario y rama central, diámetro promedio de la rama central, longitudes a lo largo y ancho de la rama, humedad a 12% de la rama central; además de la determinación de los siguientes parámetros: densidad promedio de madera seca por especie, concentración promedio de ramaje secundario y hojas; y porcentaje de humedad promedio de la madera por especie.
- 4.- Determinación de ecuaciones alométricas por medio de una regresión no lineal exponencial.

Materiales utilizados

Las herramientas utilizadas para la medición de las variables fueron las siguientes. Para el peso se utilizó una báscula digital marca SalterBreck, S100 con capacidad máxima de 150 kg y 1gr de resolución. Una cinta métrica Fiberglass de 50 m para la medición de la longitud a lo largo y ancho de cada una de las ramas, el diámetro fue cuantificado con un Vernier tomando tres muestras a lo largo de la rama central, obteniendo un diámetro promedio para cada una de las 13 muestras por individuo. Para el registro de la humedad se utilizó un higrómetro marca Delmhorst J200, con una resolución mínima de 6% de humedad y máxima de 99%, previamente calibrado para el tipo de especie y finalmente para la medición de la altura de los árboles se utilizó un clisímetro. La toma de muestras en el Campus de Ciudad Universitaria, se realizó en los meses de enero, febrero y marzo de 2011.

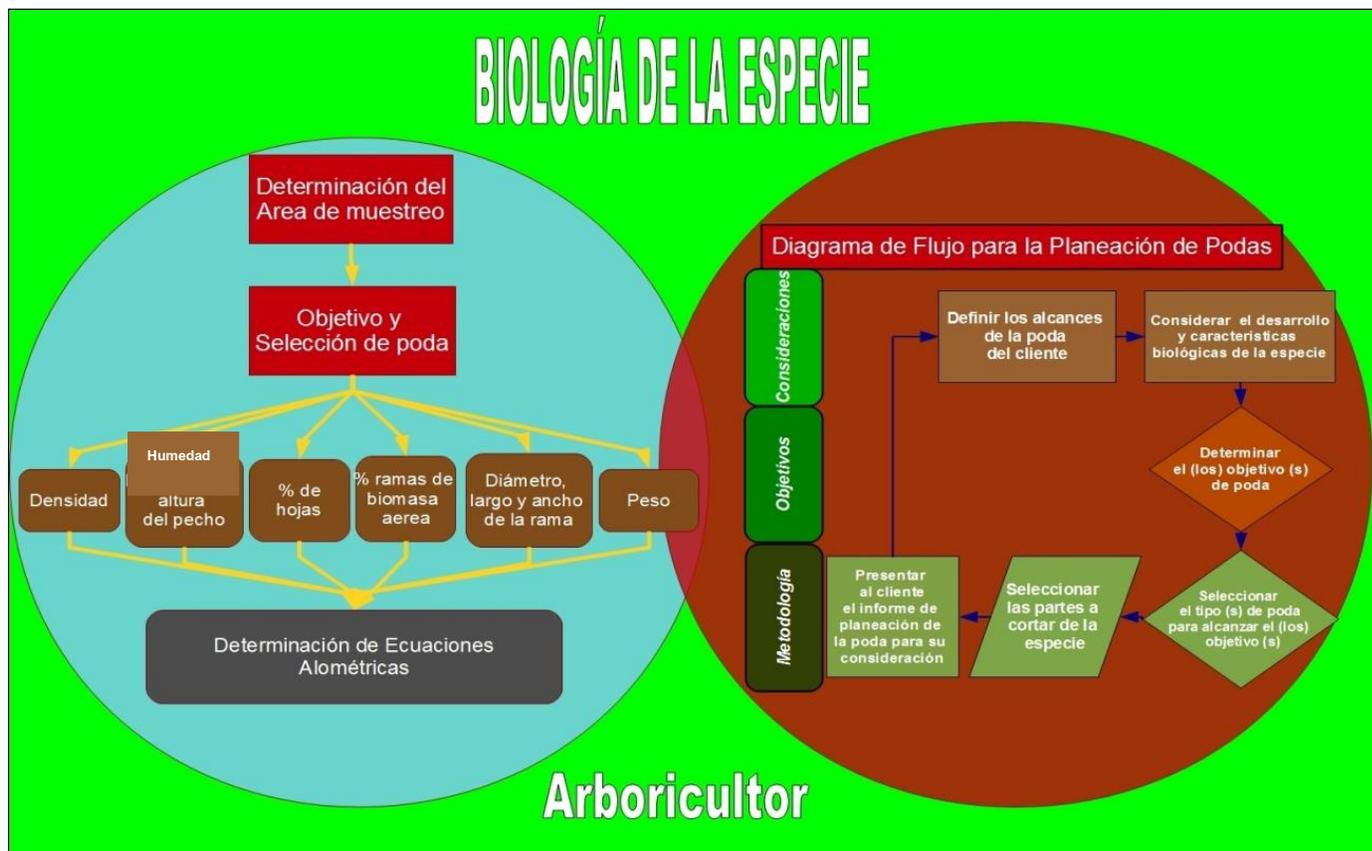


Figura 12. Se muestra la metodología utilizada para la estimación de biomasa en este trabajo, para el objetivo y selección de poda fue necesario consultar el diagrama de la norma ANSI A300. Realización propia

4.4 Análisis de datos de los parámetros de densidad, humedad, porcentaje de ramas secundarias y hojas de la rama central por especie

Densidad promedio de madera seca de las ramas por especie

La densidad de madera seca por especie, fue calculada a partir de ramas centrales vivas y sus variables obtenidas como peso fresco al inicio del estudio, diámetro promedio de la rama, registro de humedad a lo largo dos meses aproximadamente, hasta que se registrara menos del 12% y peso seco de las ramas al final de estudio. Se empleó la siguiente fórmula para el cálculo de la densidad de cada especie con base en las variables obtenidas:

(1)

$$\delta_{sp} = \frac{Ps}{vol_{sr}}$$

donde

δ_{sp} =densidad promedio de madera seca por especie (kg/m³)

Ps =peso seco de rama central con 12% de humedad (kg)

vol_{sr} =volumen de madera (cm³)

Para el cálculo del volumen de madera, se emplearon las variables de longitud y diámetro promedio de rama central, calculando el volumen de la siguiente manera:

(2)

$$\begin{aligned} vol_r &= \left(\frac{\pi}{4} * (D1)^2 * \frac{L}{2} \right) + \left(\frac{\pi}{4} * (D2)^2 * \frac{L}{2} \right) \\ &= \left(\frac{\pi * L}{8} \right) * ((D1)^2 + (D2)^2) \end{aligned}$$

donde

L = longitud de la rama central (cm)

$D1$ = promedio de los diámetros $D1$ y $D2$ (cm)

$D2$ = promedio de los diámetros $D2$ y $D3$ (cm)

Porcentaje promedio de humedad de las ramas por especie

La humedad está dada por el peso de agua perdido en relación a su peso seco, este parámetro, al igual que la densidad, difiere dependiendo de la forma de crecimiento de la especie y la fisiología de ésta. Para saber el porcentaje de humedad de las ramas centrales por especie, se midieron el peso fresco al inicio del estudio, además de la medición de humedad a lo largo de aproximadamente dos meses, hasta que la rama registró menos de 13% y el peso seco al final del estudio, obteniendo la humedad promedio por especie a través de la siguiente fórmula:

(3)

$$H_{sp} = \frac{(Pf-Ps)}{Ps} * 100$$

donde

H_{sp} = porcentaje promedio de humedad de rama por especie

Pf = peso fresco de la rama central (kg)

Ps = peso seco con 13% de humedad de la rama central (kg)

Porcentaje promedio de hojas y ramaje secundario por especie

Las concentraciones promedio de ramaje secundario y hojas fueron determinadas con respecto a la rama central. Para ello se pesaron por separado hojas, ramaje secundario y ramas centrales, utilizando el peso seco de las hojas y el peso seco con un 13% de humedad del ramaje secundario; las fórmulas empleadas para tales estimaciones fueron:

(4)

$$\%h_{osp} = \frac{ps_{ho}}{ps} * 100\%$$

donde

$\%h_{osp}$ = porcentaje promedio de hojas por especie

ps_{ho} = peso seco total de las hojas de la rama por especie (kg)

Ps = peso seco total con 13% de humedad de la rama central por especie (kg)

$$\%rs_{sp} = \frac{ps_{rs}}{ps} * 100\%$$

donde

$\%rs_{sp}$ = porcentaje de ramaje secundario con respecto a la rama central seca por especie

ps_{rs} = peso seco total con 13% de humedad del ramaje secundario por especie (kg)

ps = peso seco total con 13% de humedad de todas las rama centrales por especie (kg)

Determinación de ecuaciones alométricas

Aunado a lo anterior, la estimación de biomasa se realizó por medio de ecuaciones alométricas, determinadas a través de una regresión no lineal exponencial resuelta por el método de mínimos cuadrados, de la forma:

(5)

$$y = ce^{dx}$$

formula que permite obtener la mejor relación entre las variables dendrométricas asociadas para la cuantificación de biomasa, a través de la mejor curva de ajuste.

Con el objetivo de validar la metodología para la estimación de biomasa, se procedió a estimar la biomasa de las ramas centrales en función del peso seco, el porcentaje de humedad, de ramaje secundario y de hojas para cada tipo de poda. Cabe resaltar, que en los trabajos de Hernández-Miranda (2010) se registró que para el caso de la poda de limpieza se incluyen ramas muertas, lo que implica que no disponen de hojas ni de humedad, por lo que se estimó que para éste tipo de poda solo contenía el 50% de ramaje secundario.

Con base en ello se estimó el peso calculado de la rama central como:

(6)

$$Psc = vol_r * \delta_{sp}$$

donde

Psc= peso seco calculado de la rama central (kg)

Vol_r= volumen de la rama central (kg/m³)

δ_{sp}= densidad de madera por especie (kg/m³)

El peso fresco de cada rama central fue despejado de la formula (3) de humedad:

$$H_{sp} = \frac{(Pf - P_s)}{P_s}$$

Obteniendo

(7)

$$Pf = (H_{sp} + 1) * Psc$$

donde

H_{sp}= porcentaje promedio de humedad de rama por especie (%)

Pf= peso fresco de la rama central (kg)

P_s= peso seco con 13% de humedad de la rama central (kg)

Psc= peso seco de la rama central (kg)

Con base en lo anterior, se determinaron dos grupos de ramas, por un lado las ramas que registraron humedad superior al 20% fueron consideradas como vivas (formula 8) y como ramas muertas aquellas que presentaron menos de 20% de humedad (formula 9), determinando las siguientes fórmulas para cada grupo respectivamente:

(8)

$$Pcr_v = Pf + (\%ps_{rs} * Psc) + \%ps_{ho} * Psc$$

donde

Pcr_v=peso calculado de rama central viva (kg)

Pf= peso fresco de rama central (kg)

%P_{srs}= porcentaje de peso seco de ramaje secundario

Psc= peso seco de rama central (kg)

%Psho= porcentaje de peso seco de hojas

(9)

$$Pcr_m = Pf + \frac{\%ps_{rs}}{2} * Psc$$

donde

p_{cr_m}= peso calculado de rama central muerta (kg)

P_f= peso fresco de rama central (kg)

P_{sc}= peso seco de rama central (kg)

%P_{s_{rs}}= porcentaje de peso seco de ramaje secundario

Finalmente, estos parámetros fueron utilizados para obtener las ecuaciones alométricas por tipo de poda y graficados en una relación de peso calculado vs peso medido, con el fin de validar la metodología propuesta; para así poder estimar la cantidad de biomasa producida por *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata* en el Campus Universitario.

5 Resultados

5.1 Resultados de los parámetros utilizados para la estimación de biomasa

En el Cuadro 2, se muestran los valores correspondientes a cada parámetro registrado; es importante mencionar que los valores reportados en la tabla son porcentajes promedio de peso de agua contenida en la rama central. Se observa que *L. lucidum* mostró la mayor densidad; en cuanto a la humedad los valores de *F. uhdei* y *P. radiata* presentaron el mayor contenido de humedad. El porcentaje de ramaje secundario para *L. lucidum* fue de 97.7%, a diferencia de *P. radiata* que presentó aproximadamente un 45%. Finalmente para el contenido de hojas *P. radiata* registro el valor más bajo con aproximadamente un 21% y *F. uhdei* con un valor mayor a 90%.

Cuadro 2. Densidad y porcentajes promedio de peso de humedad, de peso de ramas secundarias, de peso de hojas con respecto a la rama central seca de fresno, trueno y pino (base humedad).

Especies			
Parámetros	<i>Fraxinus uhdei</i>	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Pinus radiata</i>
Densidad (kg/m ³)	453.77	627.34	493.55
% Humedad	50.74	41.88	56.16
% ramaje secundario	40.78	48.13	22.38
% hojas	44.60	36.92	10.18

5.2 Peso fresco y seco para *Fraxinus uhdei*

El peso seco refiere a la rama central sin el contenido de hojas y ramaje secundario, ni humedad, de modo contrario el peso fresco de cada una de las ramas equivale a los componentes: rama central, hojas, ramaje secundario y humedad (Figura 13).

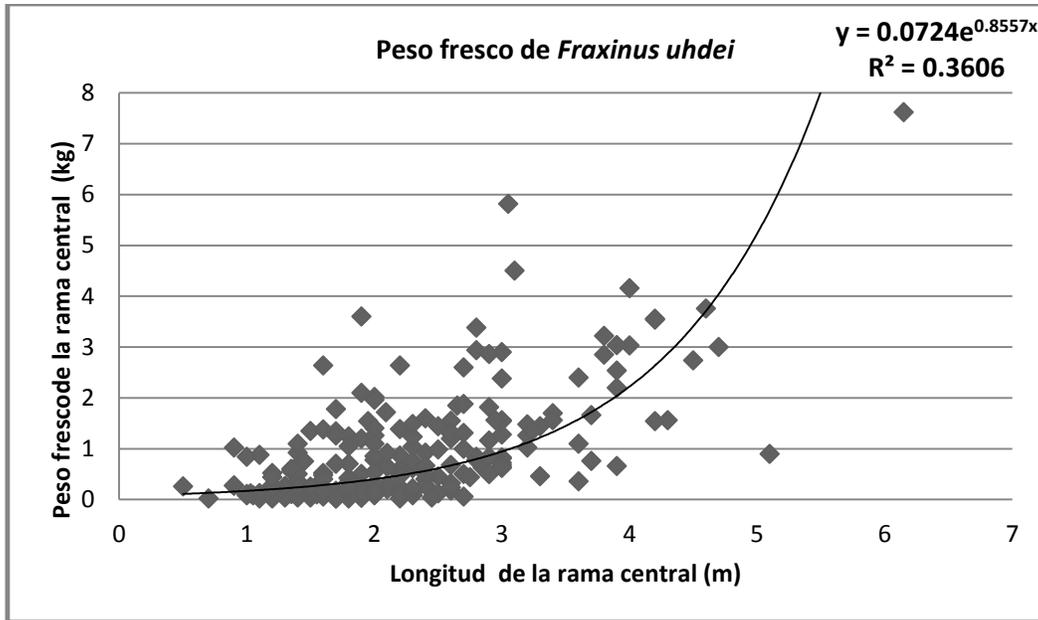


Fig. 13. a) *F. uhdei* peso fresco

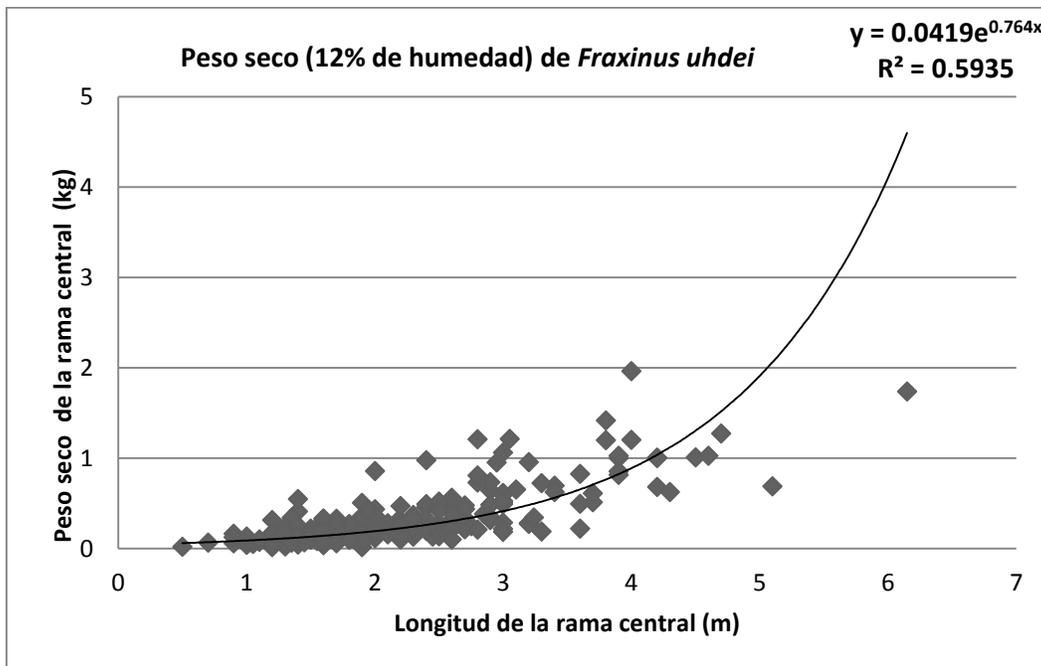


Fig. 13 b) *F. uhdei* peso seco

Figura. 13. a y b Graficas que muestra el efecto de la metodología propuesta en la estimación de biomasa, a) peso fresco y b) peso seco (12% de humedad) contra longitud de la rama central.

5.3 Resultados de peso calculado por tipo de poda y especie

Para las tres especies estudiadas se observa que existen diferentes tendencias de la línea promedio que representa la ecuación alométrica por tipo de poda (Fig.14,15 y 16). Para la poda de Limpieza, se observa que los pesos en relación con la longitud se encuentran entre 0.5 kg y 1 a 2.5 m, obteniendo un valor de $R^2=0.68$ en *P. radiata* que muestra el mejor ajuste (Figura 15 a).

Con respecto al tipo de poda de clareamiento, se observa las ramas centrales con mayor longitud, por ende aumenta la cantidad de biomasa estimada para la rama central seca aumenta en comparación con los resultados para la poda de limpieza, el valor de $R^2=0.71$ lo presentó *P. radiata* como el valor más alto con respecto a las tres especies (Fig. 15 b).

Para el tipo de poda de Reducción se observa que los pesos se encuentran entre 0.5 kg en relación a 2 m de longitud, para *P. radiata* y *F. uhdei* se registraron los mejores valores de $R^2=0.76$ y $R^2=0.67$ respectivamente (Fig. 15 c y Fig.16 c).

Finalmente en la poda mixta se registró, que para la especie *Fraxinus uhdei* el valor de $R^2=0.67$ (Fig. 16 d). Se utilizó la estimación de biomasa para una poda mixta, como la suma de los porcentajes de los dos tipos de poda que componen a la mixta (clareamiento con ramas vivas y limpieza con ramas muertas).

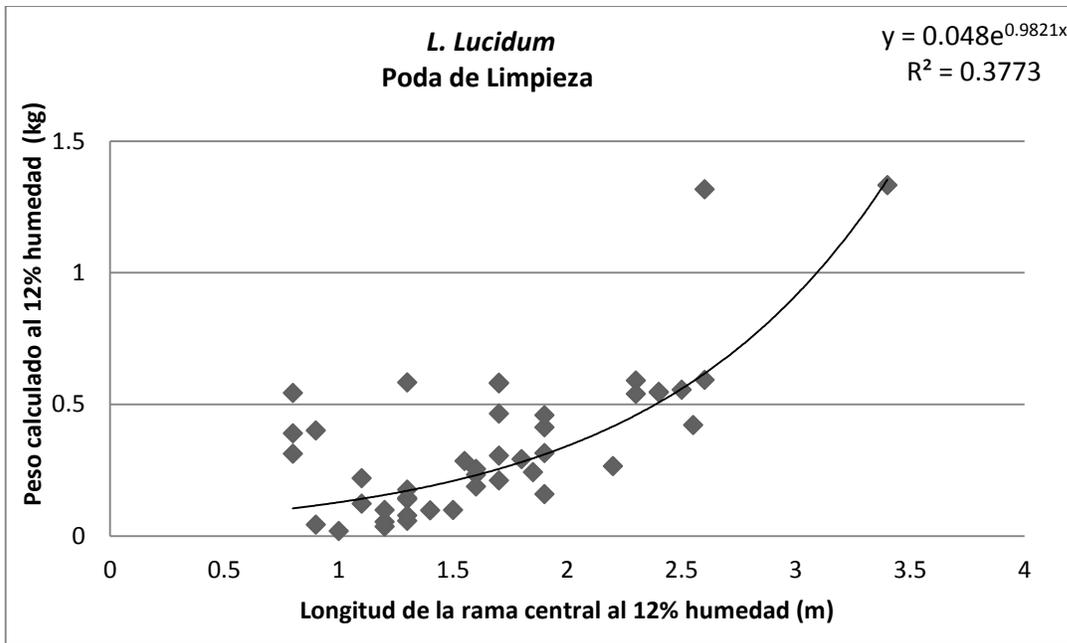


Fig. 14 a) Limpieza: Peso calculado vs longitud

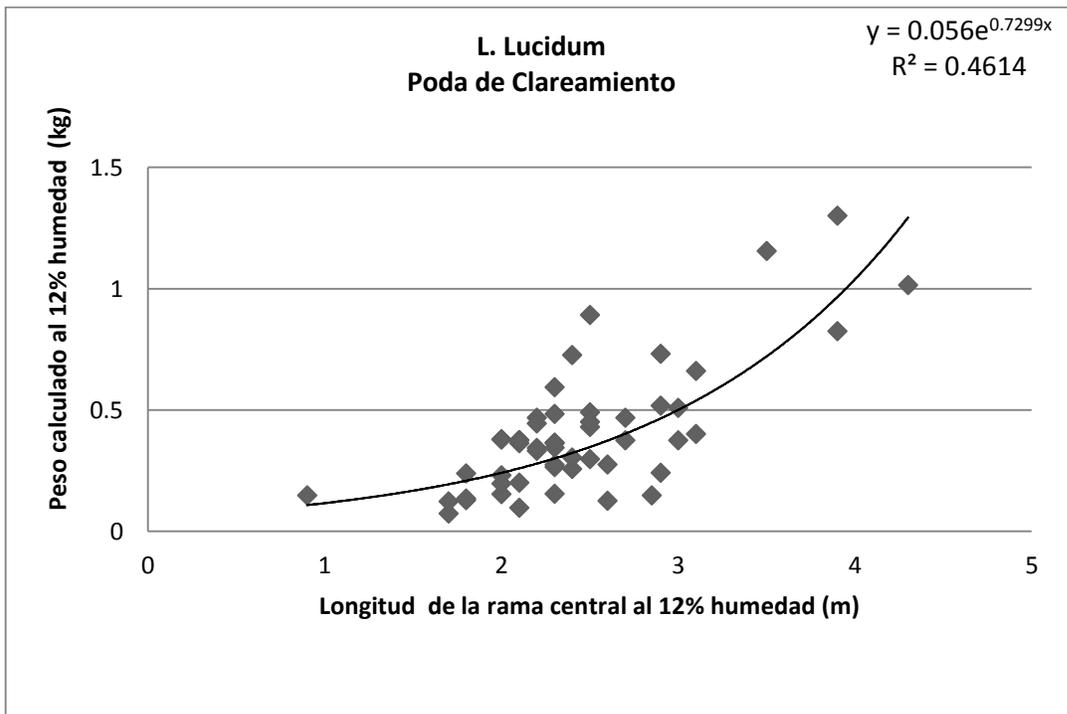


Fig. 14 b). Clareamiento: Peso calculado vs longitud

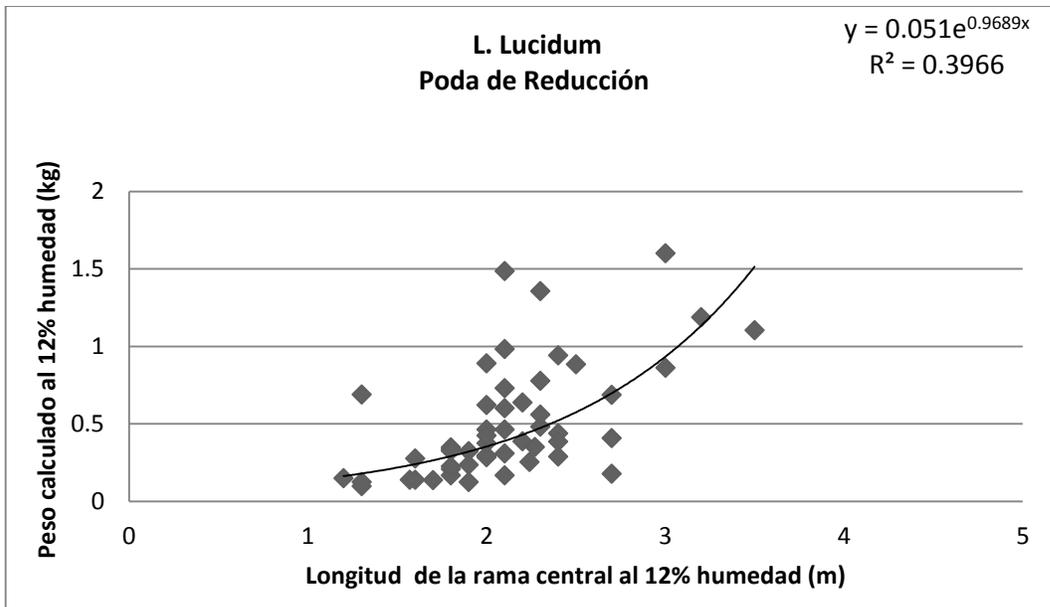


Fig. 14 c) Reducción: Peso calculado vs longitud

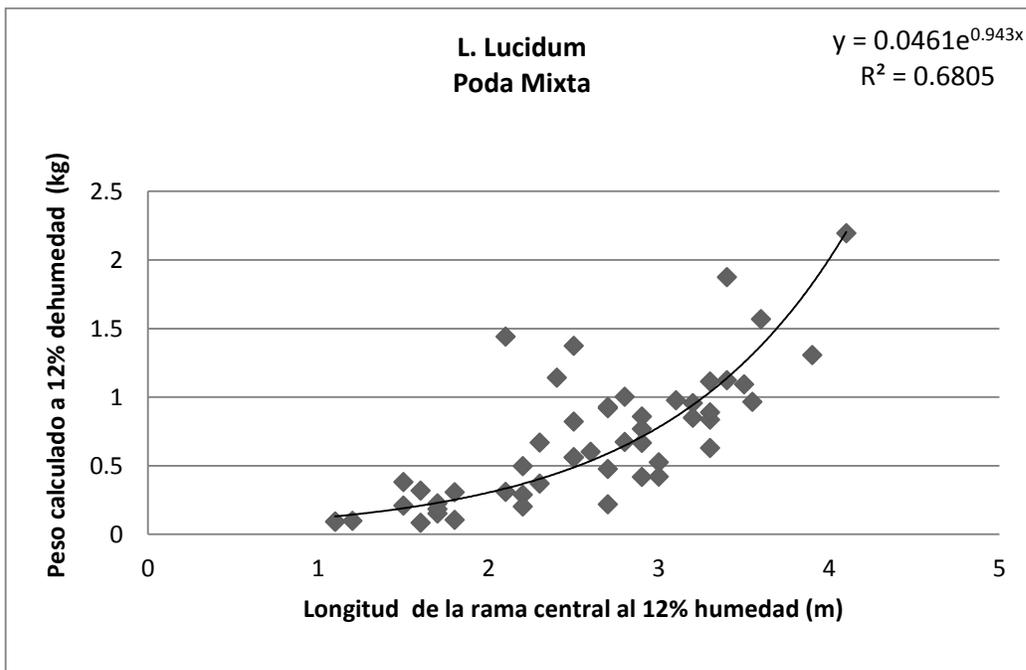


Fig. 14 d) Mixta: Peso calculado vs longitud

Figura. 14 a), b), c), d). Ecuaciones alométricas por tipo de poda para la especie *Ligustum lucidum*.

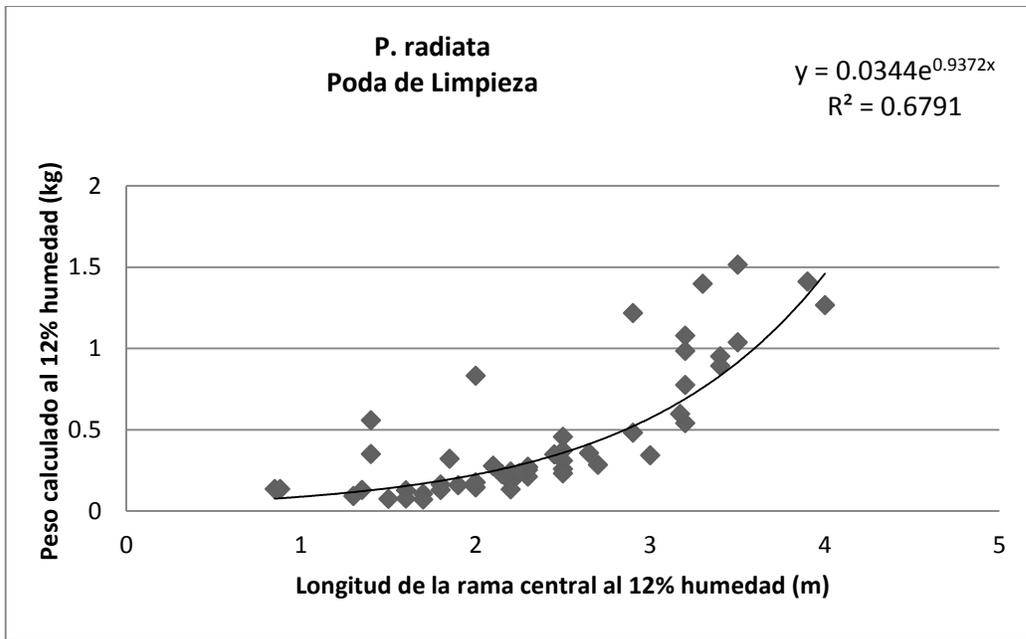


Fig. 15 a) Limpieza: Peso calculado vs longitud

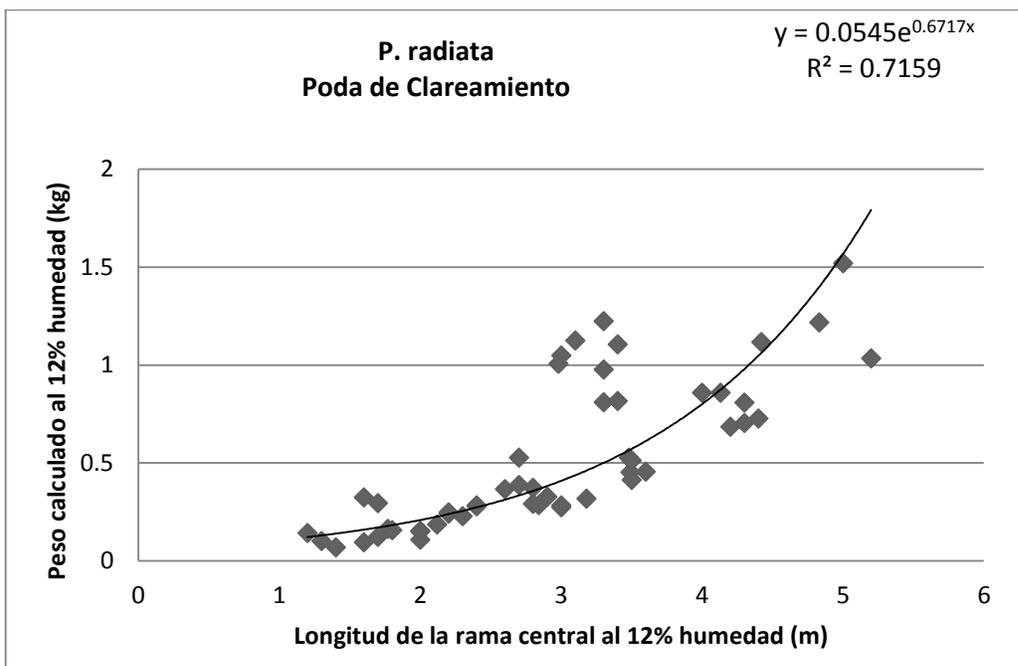


Fig. 15 b) Clareamiento: Peso calculado vs longitud

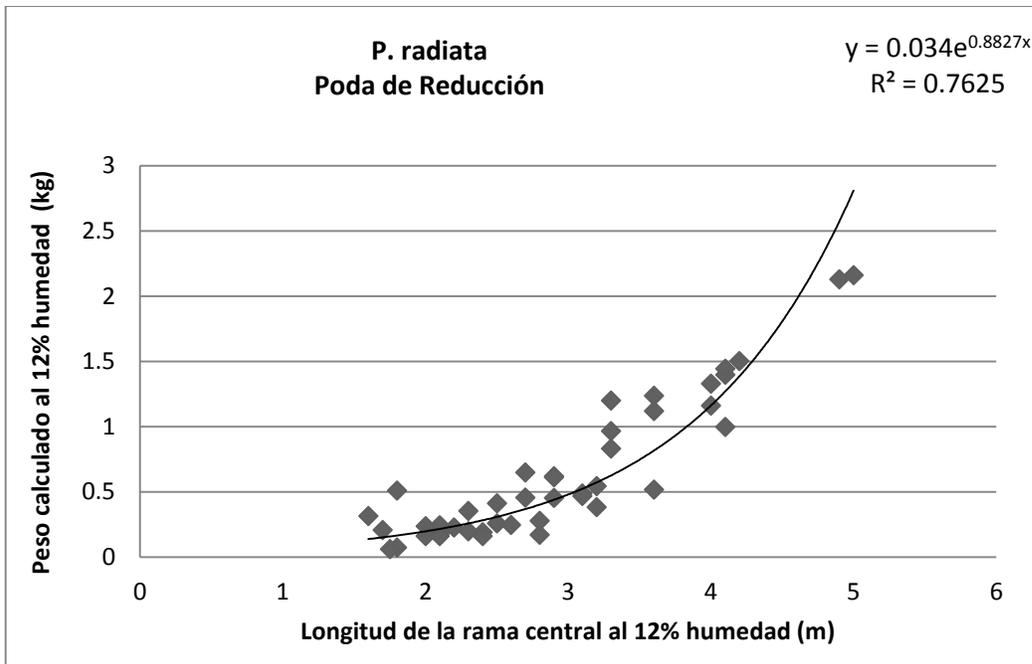


Fig. 15 c) Reducción: Peso calculado vs longitud

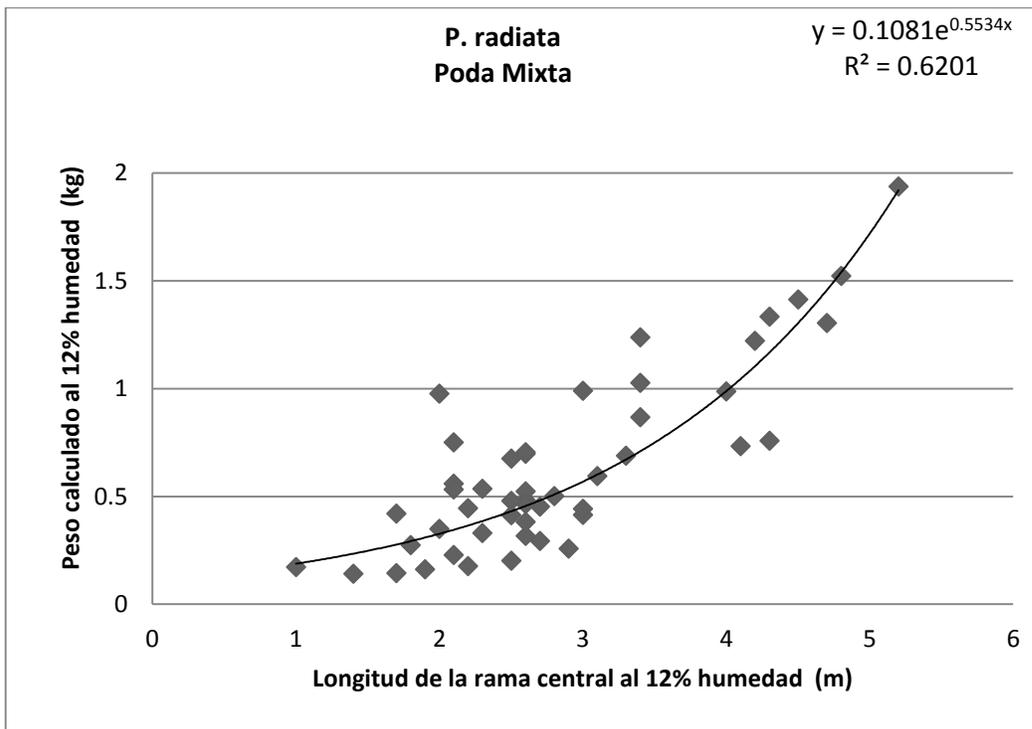


Fig. 15 d) Mixta: Peso calculado vs longitud

Figura 15 a), b), c) d). Ecuaciones alométricas por tipo de poda para la especie *Pinus radiata*.

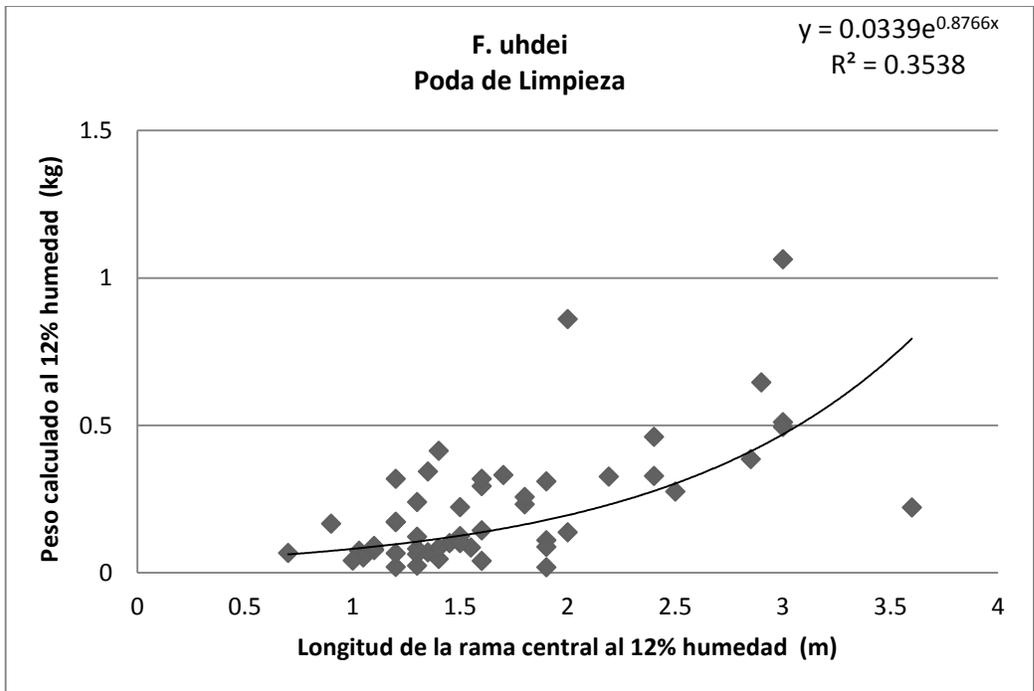


Fig. 16 a) Limpieza: Peso calculado vs longitud

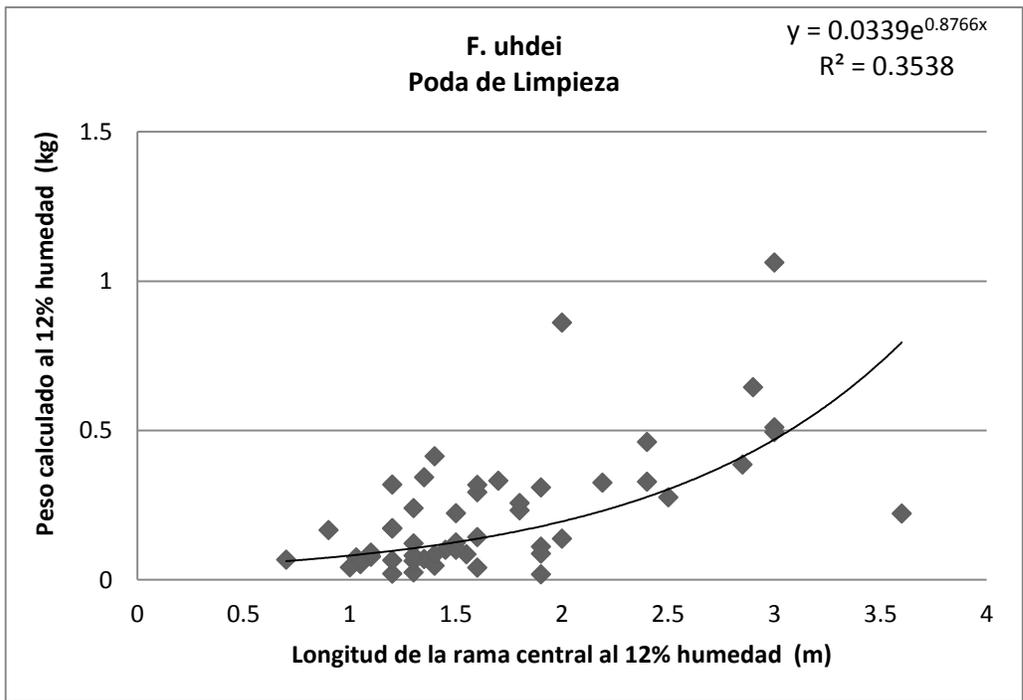


Fig. 16 b) Clareamiento: Peso calculado vs longitud

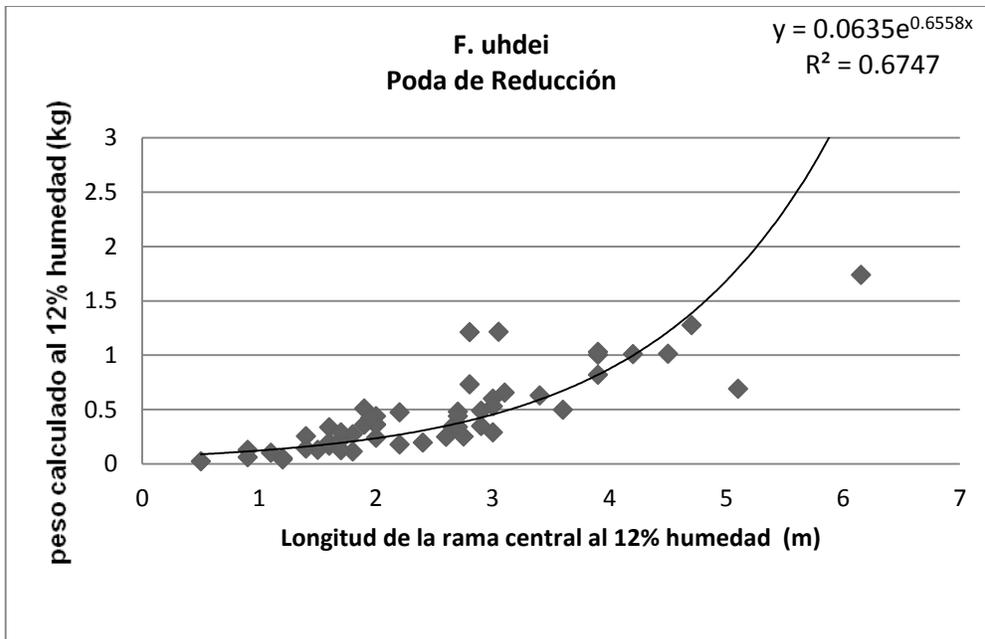


Fig. 16 c) Reducción: Peso calculado vs longitud

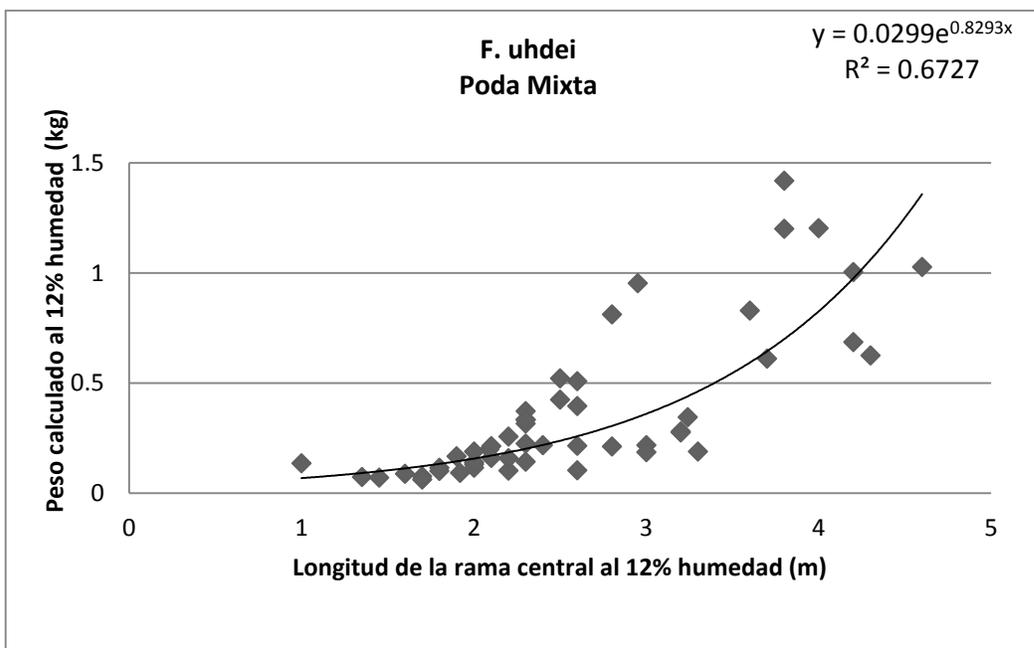


Fig. 16 d) Mixta: Peso calculado vs longitud

Figura 16 a), b), c), d). Ecuaciones alométricas por tipo de poda para la especie *Fraxinus uhdei*

5.4 Validación de la metodología de estimación de biomasa

Con el objetivo de validar los resultados anteriormente explicados, se procedió a estimar la biomasa de las ramas vivas y muertas correspondientes a los tipos de poda y para las tres especies estudiadas. La estimación de biomasa consistió en sumar los cuatro arboles por tipo de poda calculados con las ecuaciones alométricas y sus totales, con el fin de comparar los pesos frescos medidos experimentalmente. Cabe resaltar que en este cálculo se incluyeron los porcentajes de hojas, ramaje secundario y humedad siguiendo a esta nueva metodología. El cuadro 3, presenta la comparación de los resultados, para el peso fresco medido *in situ* y peso fresco calculado a través de la metodología. Se observa que, para la suma total de la poda de reducción se obtuvo 307 kg para el peso experimental, con un error absoluto porcentual de 12.4% con respecto al peso calculado. Por el contrario, la poda de limpieza registro 61 kg con un porcentaje de error de 11%. Analizando las sumas totales por especie, se obtienen errores absolutos de 3.2%, 13.8 y 0.8% para *Ligustrum lucidum*, *Pinus radiata* y *Fraxinus uhdei* respectivamente. Obteniendo un error global absoluto de 5.8% para todas las especies y tipos de poda.

Cuadro 3. Resultados que muestran a) peso fresco medido y b) peso fresco calculado para las tres especies y tipos de poda

Especie \ Poda	<i>L. lucidum</i> (kg)	<i>P. radiata</i> (kg)	<i>F. uhdei</i> (kg)	Peso total por poda(kg)
Limpieza	19.19	26.72	15.08	61.00
Clareamiento	70.04	62.28	27.65	159.97
Reducción	97.18	113.78	96.04	307.00
Mixta	67.98	83.62	63.41	215.01
Peso total por especie	254.39	286.40	202.18	742.97

a) Peso fresco medido experimentalmente

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">Especie</div> Poda	<i>L. lucidum</i> (kg)	<i>P. radiata</i> (kg)	<i>F. uhdei</i> (kg)	Peso total por poda(kg)
Limpieza	23.51	28.79	16.25	68.54
Aclareamiento	74.09	60.13	31.41	165.64
Reducción	93.79	84.93	90.60	269.32
Mixta	68.49	73.06	62.37	203.91
Peso total por especie	25.88	246.91	200.63	707.42

b) Peso fresco calculado por la metodología

La cantidad de biomasa generada no difirió entre las especies trabajadas, pero sí en relación con el tipo de poda aplicado; estas variables no interaccionaron entre sí (cuadro 4). Esto indicó que las pruebas de medias (Tukey con 95% de confianza) únicamente eran pertinentes para encontrar diferencias entre los tipos de podas.

Cuadro 4. Relación de varianzas (F) para las fuentes de variación de la biomasa de tres especies sometidas a 4 tipos de podas. Se muestra que existen diferencias significativas a nivel poda.

	biomasa medida	biomasa estimada
Especie	0.064 NS	0.064 NS
Poda	0.000 *	0.000 *
Interacción	0.695 NS	0.695 NS
* significativo		
NS no significativo		

Todos los análisis fueron realizados con un nivel de confianza de 95% con el paquete de diseños experimentales FAUNI, versión 2.5, (1994) y en IBM SPSS Statistics versión 20.0. (antes PASW).

5.5 Gráficas espejo

De forma esquemática, se muestran los resultados en gráficas espejo de peso calculado fresco vs peso medido experimentalmente para 16 árboles por especie y por tipo de poda (Figura 17). Los resultados muestran que la poda de limpieza se encuentra en la parte baja de las gráficas espejo. Seguido de la poda de limpieza, se muestran los valores correspondientes a la poda de aclareamiento agrupándose de forma regular para las tres especies, con un aumento en la estimación de la biomasa fresca en donde se considera la humedad, las hojas y el ramaje

secundario. En contraste los valores de las podas de reducción y mixta se distribuyen a lo largo de la línea media de la gráfica espejo lo que representa el rango amplio de valores de biomasa que se pueden obtener en ese tipo de podas. Cabe mencionar que para la poda de reducción se consideran ramas que contienen hojas, ramaje secundario y humedad, mientras que para la mixta existe un porcentaje de ramas muertas y otro complementario de ramas vivas (ya que esta se compone de limpieza y clareamiento) puesto que fueron seleccionadas ramas muertas de pesos muy bajos hasta ramas vivas con pesos altos.

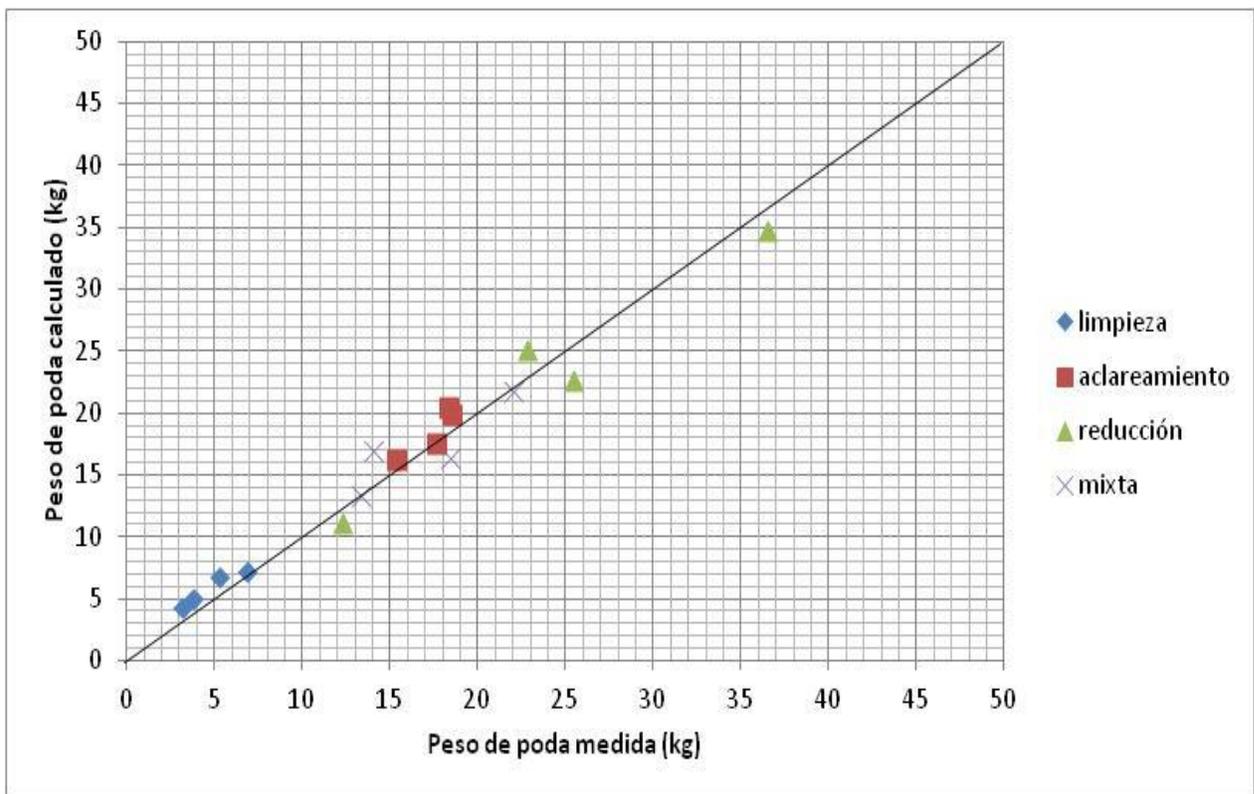


Fig. 17 a) *Ligustrum lucidum*

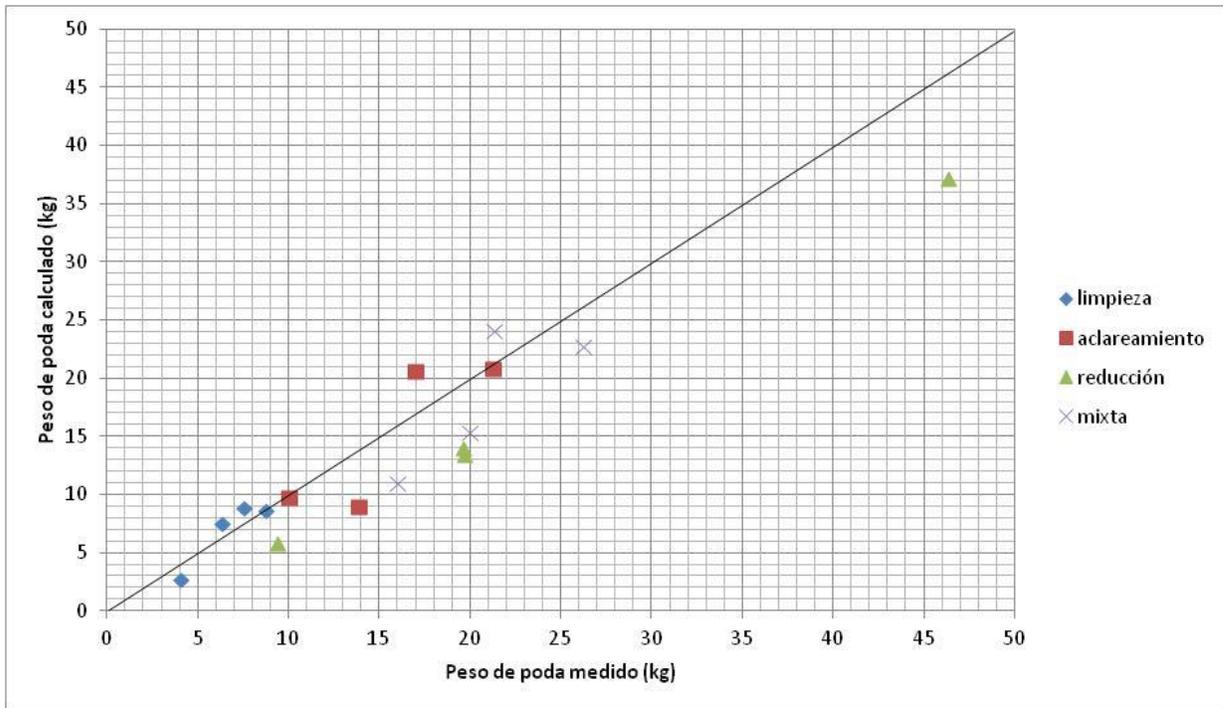


Fig. 17 b) *Pinus radiata*

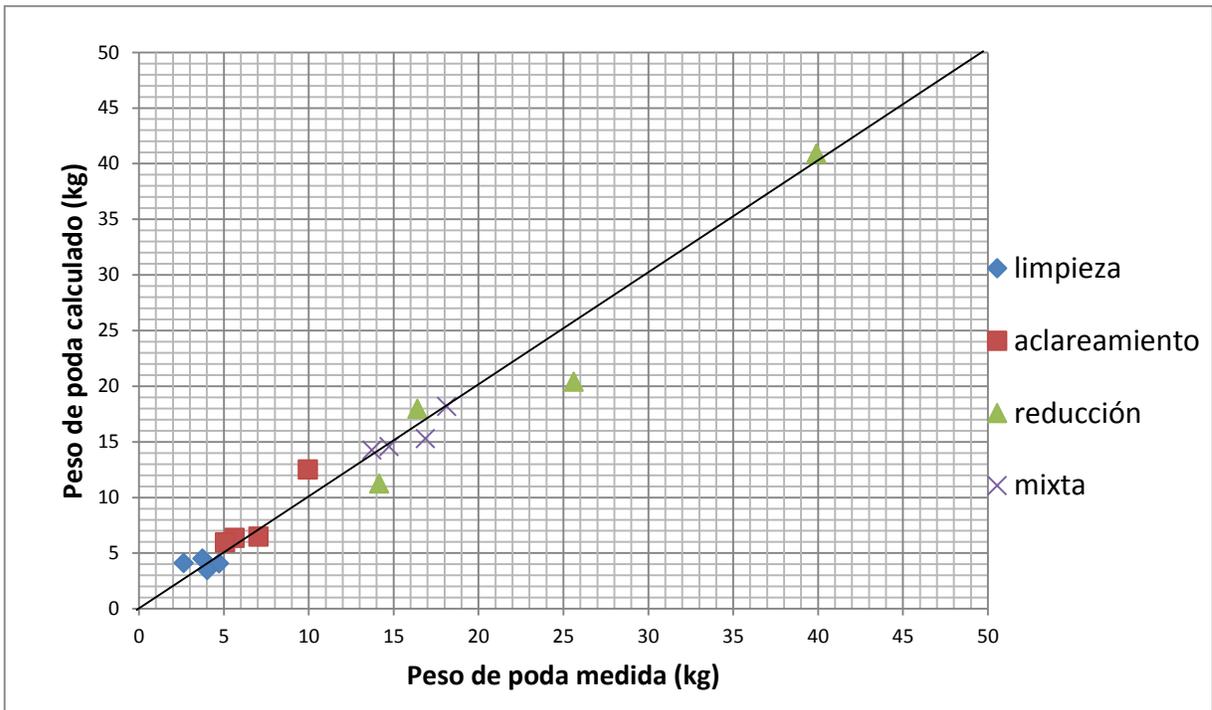


Fig. 17 c) *Fraxinus uhdei*

Figura 18. a), b) y c) Gráficas espejo de pesos de poda calculado y medido para *L. lucidum*, *P. radiata* y *F. uhdei*

5.6 Ecuación para la estimación de biomasa en las especies *L. lucidum*, *P. radiata* y *F. uhdei* en Ciudad Universitaria

La estimación se divide en dos ecuaciones, una para la poda de clareamiento y reducción, en donde se seleccionaron ramas vivas que contienen porcentaje de hojas, ramaje y humedad para cada especie. Para la segunda ecuación solo se incluyeron ramas de la poda de Limpieza es decir ramas muertas, que contienen el 50% del ramaje secundario y sin humedad. La ecuación uno, realiza la sumatoria por tipo de especie y por tipo de poda, en donde esta última involucra términos como el porcentaje de poda seleccionado para la muestra representativa del sitio de estudio; además de la ecuación alométrica exponencial no lineal obtenida para la poda de clareamiento y reducción en función de la longitud promedio de la rama central seca, también incluye los porcentajes de ramaje secundario y de hojas para cada especie, así como el número de ramas centrales secas por cada individuo representante de la muestra y finalmente el número de árboles del rodal.

Para el caso de la segunda ecuación se utilizan los mismos términos con la salvedad de que para la poda de limpieza solo se utiliza el 50% del ramaje secundario. A continuación se presentan las ecuaciones:

Para poda de clareamiento y reducción (ramas vivas)

(10)

$$BG_{rv}(kg) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^2 \% n (e^a * e^{bx}) (1 + \%ps_{ho} + \%ps_{rs}) * rc_s * N$$

Para poda de limpieza (ramas muertas)

(11)

$$BG_{rm}(kg) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^1 \% n (e^a * e^{bx}) \left(1 + \frac{\%pr_s}{2}\right) * rc_s * N$$

donde

BG_{rv}= estimación de biomasa útil para el gasificador con una humedad promedio de 13% obtenida de las podas de aclareamiento y reducción (kg)

BG_{rm}= estimación de biomasa útil para el gasificador con una humedad promedio de 13% obtenida de la poda de Limpieza (kg)

Nota: Para el caso de la poda Mixta se utilizará la cantidad de rc_s proporcionales a la poda de aclareamiento y limpieza respectivamente, de tal manera que la suma de dichas ramas quedará comprendida entre 13 y 15

i= especie estudiada (*L. lucidum*, *P. radiata* y *F. uhdei*)

% n= porcentaje de tipo de poda por especie representativa de la muestra de un rodal, donde

(12)

$$\sum_{n=1}^4 \%n = 1$$

a= coeficiente constante obtenido de la ecuación alométrica exponencial no lineal por especie y tipo de poda.

b= coeficiente multiplicador de la longitud promedio de la rama central de la muestra representativa de un rodal obtenida de la ecuación alométrica exponencial no lineal por especie y tipo de poda

x= longitud promedio de la rama central seca medida en metros por especie y por poda

%ho= porcentaje de hojas con respecto a la rama central seca por especie

%pr_s= porcentaje de hojas con respecto a la rama central seca por especie

rc_s=número de ramas centrales secas de un árbol representativo de la muestra de una población, las cuales están comprendidas entre 13 y 15 para el cálculo de ramas vivas y muertas dependiendo el tipo de poda

N= número de árboles del rodal

Con el objetivo de validar las ecuaciones de estimación de biomasa para el sitio de estudio, se procedió a calcular la generación de biomasa, tomando la longitud

promedio de las 13 ramas para cada uno de los 16 árboles por tipo de poda y especie. El resultado de esta estimación, se muestra en el cuadro 5 en donde se percibe una diferencia significativa para el caso de limpieza de la especie *F. uhdei*, dado que hay una pérdida significativa del ramaje consecuente con respecto a la rama central al momento de que esta última elimina la totalidad de sus hojas y aproximadamente el 50% del ramaje secundario. Con respecto a los demás tipos de poda se observa que un incremento en la generación de biomasa que va de 7.5 a 14 kg dependiendo el tipo de poda y especie.

Finalmente, lo anterior se comparó con el promedio de los pesos frescos sin humedad obtenidos de las ecuaciones alométricas para cada tipo de poda y especie, con el fin de obtener un valor promedio experimental que validara la eficacia para las ecuaciones BG_{rm} y BG_{rv} , ver Cuadros 5 y 6. Se observa que la estimación de biomasa para los dos casos no existen diferencias significativas.

Cuadro 5. Cantidad de biomasa estimada para el gasificador con BG_{rm} y BG_{rv} por tipo de especie y poda para un individuo promedio

Podas \ Especies	<i>Ligustrum lucidum</i> (kg)	<i>Pinus radita</i> (kg)	<i>Fraxinus uhdei</i> (kg)
Limpieza	4.79	5.05	2.72
Clareamiento	11.81	10.05	9.87
Reducción	13.98	.,69	10.74
Mixta	11.75	7.56	10.81

Cuadro 6. Promedio de valores de peso fresco sin humedad calculados a través de la metodología propuesta

Podas \ Especies	<i>Ligustrum lucidum</i> (kg)	<i>Pinus radita</i> (kg)	<i>Fraxinus uhdei</i> (kg)
Limpieza	5.88	7.20	4.06
Clareamiento	14.33	10.11	9.53
Reducción	17.87	9.44	16.45
Mixta	15.58	11.91	11.70

El cuadro 7, muestra la cantidad de biomasa estimada por tipo poda y por especie, considerando que cada tipo de poda representa el 100% del total de los árboles por especie, los datos del inventario del Jardín Botánico son de 1323

individuos de *L. lucidum*, 901 para *P. radiata* y 3377 árboles de *F. uhdei* presentes en Ciudad Universitaria. Los resultados muestran que si la poda de reducción se realiza para el 100% de árboles en las tres especies se obtendrían valores de biomasa entre aproximadamente 8 y 36 toneladas cada dos años, por el contrario la poda de limpieza registro un promedio más bajo de producción de biomasa entre 4.5 y 9 toneladas. Finalmente para clareamiento se obtienen en promedio de 9 a 33 toneladas. A nivel especie se puede obtener mayor cantidad de biomasa de *F. uhdei*, por la cantidad de árboles presentes para esta especie.

Cuadro 7. Cantidad de biomasa estimada para el gasificador con BG_{rm} y BG_{rv} por tipo de especie y poda para el 100% de árboles de Ciudad Universitaria

Podas \ Especies	<i>Ligustrum lucidum</i> (kg)	<i>Pinus radita</i> (kg)	<i>Fraxinus uhdei</i> (kg)
Limpieza	6.34	4.55	9.20
Clareamiento	15.62	9.05	33.32
Reducción	18.49	7.82	36.25
Mixta	15.54	6.81	36.49

Se proyectó un escenario para cada especie variando el porcentaje de poda a aplicar con base en la cantidad de árboles presentes para C.U., es importante mencionar que después de analizar los datos presentados en los siguientes cuadros, el número de ramas no es limitativo a 13 ó 15 como los que fueron utilizadas para este estudio, ya que nuestra estimación se basa en el cálculo de la biomasa de la rama central seca por lo que este valor quedará a criterio del arboricultor. El cuadro 8, muestra el valor de la estimación de biomasa para cada uno de las especies y porcentajes de tipos de poda, teniendo una estimación promedio de 67.8 toneladas en las tres especies para todo el Campus universitario en aproximadamente dos años.

Cuadro 8. a), b) y c) Escenario de generación de biomasa para a partir de las ecuaciones BG_{rm} y BG_{rv} con un porcentaje definido por poda y especie en Ciudad Universitaria

Cuadro a). *L. lucidum*

Podas \ Especie	<i>L. lucidum</i> (kg)
Limpieza	
Clareamiento	
Reducción	
Mixta	

Limpieza 30%	1.902
Clareamiento 20%	3.125
Reducción 20%	3.699
Mixta 30%	16.402
suma total	25.127

Cuadro b). *P. radiata*

Especie	
Poda	<i>P. radiata (kg)</i>
Limpieza 40%	1.82
Clareamiento 40%	3.62
Reducción 20%	1.56
Mixta	0
suma total	7.00

Cuadro c). *F. uhdei*

Especie	
Poda	<i>F. uhdei (kg)</i>
Limpieza 0%	0
Clareamiento 20%	6.66
Reducción 60%	21.75
Mixta 20%	7.30
suma total	35.72

5.7 Análisis estadísticos

Mediciones descriptivas

Los resultados en relación a los caracteres morfométricos del árbol y la estimación de biomasa se observan en el cuadro 9, las variables evaluadas sólo muestran diferencias significativas en copa, densidad y valor promedio de las hojas.

Para el índice de copa en *Pinus radiata* se encontró que la copa es más larga que ancha pues supera la unidad a diferencia de *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* donde la copa es más ancha que larga. Únicamente, con esta última especie la diferencia fue estadísticamente importante. La copa en *Fraxinus uhdei* fue ocho veces mayor al diámetro del fuste, es decir el índice de espacio vital, y superó significativamente a los valores registrados en el resto de las especies trabajadas. Con respecto a las características de la madera, la mayor densidad se registró en *Ligustrum lucidum* al mismo tiempo que el menor contenido de humedad, en ambas características difiere significativamente de *P. radiata* y *F. uhdei*.

La cantidad de hojas con respecto al peso de la rama en *Fraxinus uhdei* estas representaron casi el 50% del total, en cambio en el resto de las especies constituyeron alrededor de la cuarta parte del total de este.

De este análisis preliminar se puede decir que puede existir una relación entre cinco parámetros diferentes: índice de copa, índice de espacio vital, porcentaje de hojas, densidad y humedad, puesto que describen la estructura del árbol y por ende pueden estar relacionadas con la estimación de biomasa.

Cuadro 8. Mediciones dasométricas e índices morfométricos para tres especies arbóreas muestreadas en el Campus de Ciudad Universitaria, Coyoacán D.F., México

Variable \ Especie	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Fraxinus uhdei</i>	<i>Pinus radiata</i>
Largo de la copa (m)	4.7336 a	6.597 a	6.0957 a
Área de la copa (m)	69.4133 a	59.6954 a	50.7136 a
Diámetro promedio de la copa (m)	9.0916 a	8.4391 a	7.2312 a
Altura del fuste (m)	4.0531 a	4.4469 a	3.3506 a
Altura total del árbol (m)	8.7867 a	9.9169 a	9.4463 a
DAP (m)	0.4377 a	0.33 a	0.3784 a
RADIO PROMEDIO (m)	4.5458 a	4.2195 a	3.6156 a
DB (m)	0.522 a	1.1553 a	0.4421 a
Grado de cobertura	0.5244 a	0.6424 a	0.6439 a
Forma de copa	2.2516 a	11.4782 a	1.3316 a
Manto de copa	1.0809 a	0.9706 a	0.8059 a
% copa	0.5244 a	0.6424 a	0.6439 a
Índice de copa	0.5412 b	0.7948 ab	1.0314 a
Índice de espacio vital	6.9989 b	8.3342 a	6.2720 b
Esbeltez	1.0070 a	1.2258 a	1.5676 a
Ramas secundarias	0.433077 a	0.270231 a	0.5538 a
Porcentaje hojas (peso)	0.2771 ab	0.4559 a	0.2261b
Densidad	629.5227 a	456.6005 b	501.1075 b
Humedad	0.8531 b	1.0186 a	1.1365 a

*En cada hilera las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre si

Biomasa a nivel poda y especie

Para la caracterización del material podado se realizó un ANOVA y comparación de medias, Tukey, entre especies y entre tipos de poda, para saber a qué nivel existen diferencias significativas. Para la biomasa medida, las medias por tratamiento oscilaron entre 4 y 24 kg para las alícuotas por tipo de poda *in situ* (cuadro 10). Entre especies las medias fueron muy cercanas pues variaron alrededor de los 14 kg sin diferir entre sí. En cambio los tipo de poda produjeron variaciones importantes, los mayores pesos obtenidos se dieron al realizar las poda de reducción y la mixta, especialmente en la primera que supero significativamente a la limpieza y el clareamiento los cuales difirieron entre sí, con los menores valores en la primera con menos de 6kg de biomasa obtenida en concordancia con los estudios realizados anteriormente.

Cuadro 10. Biomasa medida (kg) de ramas eliminadas en relación con la especie y el tipo de poda

Tipo de poda \ Especie	Limpieza	Clareamiento	Reducción	Mixta	media
<i>Pinus radiata</i>	5.88	18.52	23.45	17.12	16.24 a
<i>Fraxinus uhdei</i>	7.20	15.03	21.23	18.26	15.43 a
<i>Ligustrum lucidum</i>	4.04	7.85	22.65	15.60	12.53 a
media	5.70 c	13.80 b	22.44 a	16.99 ab	

En forma independiente para la última columna y última fila las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí, Tukey 0.05

La biomasa calculada se comportó de forma similar a lo descrito para la cantidad de biomasa de las alícuotas medidas *in situ* (cuadro 11). Es decir, no existieron diferencias significativas dentro de cada especie ni entre especies con respecto a la cantidad de biomasa calculada. Por otro lado, si existen diferencias significativas entre los diferentes tipos de podas, siendo las poda de reducción la que presenta el valor de las medias más alto de alrededor de 25 kg, es decir, a través de esta poda se obtuvo la mayor cantidad de biomasa, a diferencia de la de limpieza con la menor cantidad de biomasa estimada para las tres especies con un promedio de 5.12 kg. Finalmente mostrándose la de clareamiento y mixta como los tipos de podas a través de los cuales se pudo obtener una cantidad de biomasa que oscila entre 13 y 18 kg aproximadamente. La gráfica de la Figura 18, muestra la relación biomasa medida con biomasa estimada, se encontró que los puntos podían ser descritos por una recta que pasaba por el origen y tenía una pendiente de uno, esto muestra que los valores de biomasa estimados por la metodología no difieren de los valores de biomasa medidos.

Cuadro 11. Biomasa calculada (kg) de ramas eliminadas en relación con la especie y el tipo de poda

Especie \ Poda	Limpieza	Aclareo	Reducción	Mixto	Media
<i>Pinus radiata</i>	4.80	17.51	24.29	16.99	15.89 a
<i>Fraxinus uhdei</i>	6.81	15.57	28.44	20.90	17.93 a
<i>Ligustrum lucidum</i>	3.77	6.91	24.01	15.85	12.63 a
Media	5.12 c	13.33 b	25.58 a	17.91 b	

En forma independiente para la última columna y última fila las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí, Tukey 0.05

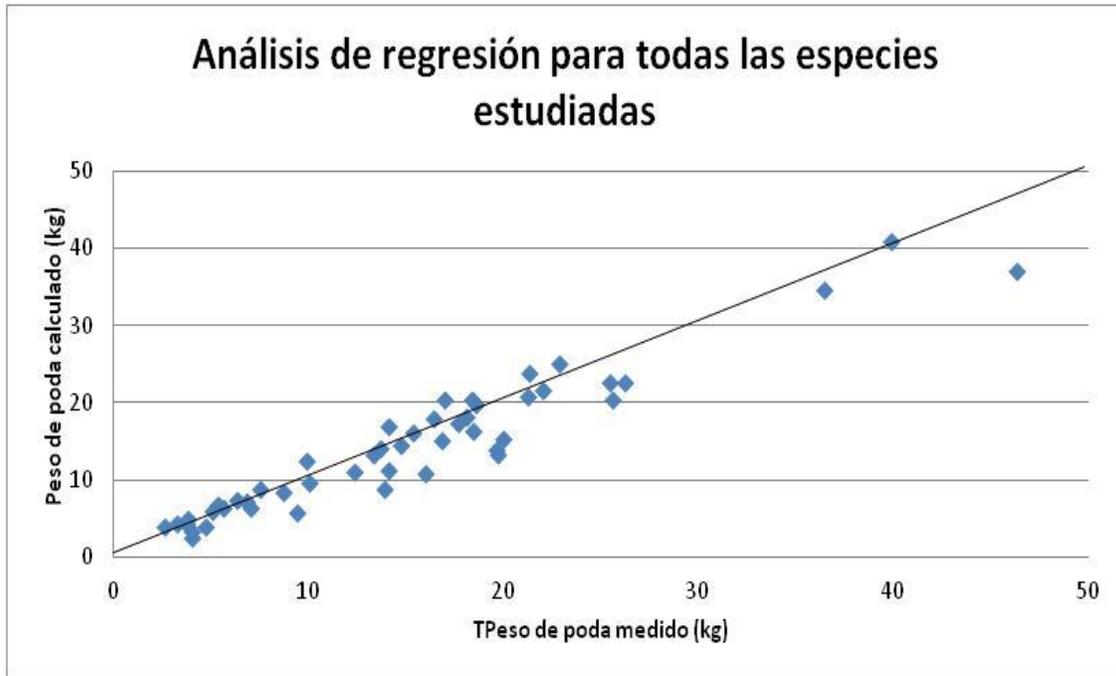


Figura 18. Análisis de regresión para todas las especies estudiadas.

6 Discusión

De acuerdo con Cano-Santana *et al.* (1994) y Avendaño-Hernández *et al* (2009) el estudio de biomasa en ramas, puede ser una alternativa para estimar de una forma indirecta, análisis dimensional alométrico, la cantidad de biomasa de los árboles, sin necesidad de seccionar el árbol completo. Además, cabe resaltar que no existen estudios para la estimación de biomasa en ramas primarias, por lo que este trabajo resulta importante.

Las ecuaciones planteadas para este trabajo de investigación, permitieron estimar el valor de peso seco de la rama central, considerando que las ramas estructurales de la copa de los arboles puede aportar una mayor cantidad de biomasa en comparación con las ramas secundarias y hojas. De acuerdo con Arno-Seitz (1995), las ramas incluyen diversos factores bióticos y abióticos que han incidido en el desarrollo del árbol, por lo tanto el estudio de éstas, permite realizar estimaciones de biomasa en la fronda de los árboles.

Las ecuaciones alométricas determinadas para cada tipo de poda, permitieron conocer la relación del peso estimado en función de la longitud promedio, de una muestra representativa del rodal de estudio. Por otro lado, la determinación de porcentajes de hojas y de ramas secundarias por especie, determinó la cantidad de biomasa que representan estos elementos con respecto a la biomasa que puede aportar solo las ramas centrales.

Parámetros de biomasa

Los resultados de las variables que describen al árbol, como DAP, DB, DC, altura total e índices morfométricos, revelaron que la muestra estuvo integrada por individuos, que a pesar de ser de diferentes especies presentaron un crecimiento similar, pues no difirieron en la mayoría de sus variables descriptivas, esta situación es ventajosa porque se comparó el efecto de la poda en forma equitativa para las tres especies. Probablemente, los individuos muestreados presentan una uniformidad en cuanto a la edad y condiciones ambientales bajo las cuales se

desarrollan; el muestreo se llevó a cabo en diferentes sitios de C.U., esperando encontrar diferencias significativas en cuanto al DAP, altura total y DB principalmente, ya que estas son las principales mediciones que diferentes autores como Velásquez-Martí (2011), Gyenge *et al.* (2009), Avendaño-Hernández *et al.* (2008) y Arias (2005) las ubican como variables que están directamente relacionadas con la producción de biomasa, puesto que estas características revelan el tiempo, el clima y las condiciones bajo las cuales se desarrolla el individuo en un espacio determinado. Solamente para *F. uhdei* se encontró que posiblemente el DAP, DB, altura total y diámetro promedio de la copa son caracteres morfométricos que están relacionados con la estimación de biomasa puesto que estos parámetros describen el desarrollo del individuo.

Densidad y humedad

Avendaño-Hernández *et al.* (2008) recomienda que al citar la densidad de una madera se debe mencionar el índice de humedad de esta misma, ya que la densidad varía dependiendo de la humedad, parámetro que influye en la variación del peso, por ello en los resultados obtenidos para cada especie en cuanto a estos parámetro fueron diferentes.

La densidad y la humedad indicaron que, la mayor densidad la registró *L. lucidum* con 6.27.34 kg/m³ y el contenido de humedad más alto lo registraron *P. radita* y *F. uhdei*, esto se puede relacionar con la conformación celular en la madera para los tres tipos de especies no es el mismo. Las diferencias de densidad se pueden atribuir a las características físicas de la madera como la higroscopicidad principalmente y a sus características fisiológicas y anatómicas. En el tejido celular el grado de porosidad se ve afectado por la humedad, el tejido será más poroso debido a la pérdida de agua y la madera es menos densa, por otro lado entre menos porosa sea la madera será más densa, lo que indica que la madera seca tiene más aire que celulosa por unidad de volumen conforme esta pierde humedad (López de Juambelz, 2000). La humedad, entonces, es un factor importante ya que el desprendimiento o absorción de agua en relación con el ambiente afectara el

volumen de la madera y por ende su densidad, es decir, es el peso de agua perdido en relación a su peso seco.

Porcentaje de hojas

La cantidad de hojas presentes en las ramas, fue más abundante en *F. uhdei* con un 90% por encima del 21% de *P. radiata* como el más bajo, estos resultados pueden atribuirse a que *F. uhdei* presenta hojas pinnaticompuestas de 20 a 30 cm de longitud 5 a 9 folíolos, consideradas como gruesas porque los folíolos son mayores a 15cm de longitud. A diferencia del trueno que presenta hojas de ovadas a oval-lanceoladas de 6-12 cm de longitud como textura mediana, *P. radiata* se mostró como el de menor porcentaje de hojas, pues presenta folíolos aciculares (forma de aguja) en fascículos de tres en tres, también clasificadas como de mediana textura según López de Juambelz (2000). Por tales características que distinguen las hojas de cada especie, los resultado obtenidos demostraron diferencias en la cantidad de masa que representan las hojas, el fresno posee hojas grandes y gruesas en comparación con las del trueno y el pino.

Ramas secundarias

Con respecto al porcentaje de ramas secundarias, se obtuvo que *L. lucidum* presento 97.7% de ramaje secundario, a diferencia de *P. radiata* y *F. uhdei*, pues *L. lucidum* presenta ramas con una orientación oblicua y con meristemas a lo largo de sus ramas, lo que propicia al desarrollo de un ramaje secundario con respecto a la rama central más abundante, a diferencia de aquellos árboles que presentan desarrollo transversal en sus ramas y con yemas apicales como el caso de *P. radiata* (Lopez de Juambelz, 2000).

Biomasa

En cuanto a los volúmenes de madera retirada no se encontraron diferencias entre especies, esto demuestra que no hay diferencias significativas en la cantidad de biomasa que poseen las especies estimadas con el método diseñado para este trabajo. Sin embargo, se obtuvieron valores diferentes de cantidad de biomasa en

cuanto al tipo de poda, puesto que los criterios y objetivos bajo los cuales se rige cada tipo de poda son diferentes.

Con respecto al peso fresco y peso seco en función de la longitud de las tres especies a nivel poda, se encontró que para la poda de limpieza *P. radiata* presentó el mejor ajuste con $R^2=0.68$, al igual que para clareamiento con $R^2=0.71$ y reducción con $R^2=0.76$, para éste último tipo de poda *F. uhdei* también presentó un buen ajuste con $R^2=0.67$ al igual que para la poda Mixta con $R^2=0.67$.

La poda de limpieza en *P. radiata* mostró los pesos menores a 1 kg, puesto que las ramas de esta especie son más delgadas a diferencia de *F. uhdei* y *L. lucidum* además de que para este tipo de poda solamente se retiraron ramas muertas, cabe resaltar que esta especie mostró el mejor ajuste.

Para la poda de clareamiento, se eliminaron ramas vivas estructurales de la corona del árbol, que a diferencia de los otros tipos de poda, todas las ramas fueron vivas, los resultados mostraron los pesos altos a diferencia de limpieza y mixta. *P. radiata* también se registró con el mejor ajuste para este tipo de poda, lo que muestra coherencia entre la longitud y peso de cada rama, es decir la producción de biomasa ésta en función de la longitud de las ramas para este tipo de poda.

En la poda de reducción se mostraron los mejores ajustes para *P. radiata* y *F. uhdei*, debido a que las ramas a ser eliminadas en este caso. Por lo general son ramas estructurales o codominantes que compiten entre ellas por luz, por lo general son las que se traslapan unas con otras, impidiendo el libre crecimiento; el principal objetivo de reducir el peso a la estructura del árbol que son ramas muy largas y pesadas con el riesgo de desgarrarse o dirigir el crecimiento deforme del árbol. En este tipo de poda, al igual que clareamiento, se registraron los pesos más altos y también las ramas más largas.

En el caso de la poda mixta, se observó una dispersión amplia de los datos obtenidos, peso vs longitud, puesto que la poda de limpieza integra tanto ramas vivas de la poda de clareamiento, como ramas muertas de la poda de limpieza, se registraron pesos muy bajos y ramas muy largas y pesadas; por lo anterior en las formula determinada para este tipo de poda se realizó la suma de la fórmula de ramas vivas más la de ramas muertas.

De acuerdo con la validación de la metodología de estimación de biomasa, se registraron porcentajes muy bajos de error absoluto con respecto al peso calculado por tipo de poda, puesto que es a nivel poda donde se encontraron diferencias significativas; tales porcentajes fueron, para limpieza 11%, para clareamiento 4.5%, para reducción 12.4 %, y para mixta 5.5%; y con respecto al error global absoluto (es decir por la suma total de biomasa por especie y tipo de poda) se registró un 5.8% de error absoluto.

Los resultados finales obtenidos a través de las ecuaciones determinadas, mostraron que a través de la poda de limpieza se obtienen los valores más bajos de biomasa con 64 kg en promedio por individuo, debido a que las ramas seleccionadas en este tipo de poda no presentan humedad, ni hojas y solamente la mitad del ramaje secundario. Seguida de clareamiento en la que se obtuvieron 162 kg en promedio por árbol, las ramas retiradas para este caso fueron ramas nacientes de la corona, que por lo general son ramas cortas, a diferencia de las podas reducción y mixta, de las cuales se pudo obtener 288 y 209 kg en promedio por individuo respectivamente. La poda de reducción es a través de la cual se puede obtener la mayor cantidad de biomasa de ramas, pues en este caso se eliminan ramas largas y por ende con mayor concentración de biomasa.

Finalmente, como una proyección de la cantidad de biomasa que puede ser obtenida a través de las especies *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus uhdei* y *Pinus radiata* que se encuentran en los jardines de Ciudad Universitaria se estima que con un porcentaje de poda de 100% para cada tipo, se pueden generar para limpieza de

4.5 a 9 toneladas, para clareamiento de 9 a 33 toneladas y para reducción de 8 a 30 toneladas cada dos años, para ser utilizada para el gasificador del Instituto de Ingeniería, aunque estos valores pueden cambiar de acuerdo a los escenarios de podas que se especifiquen.

Las ecuaciones determinadas para la estimación de biomasa en este trabajo fueron determinadas básicamente una para ramas vivas, que contienen hojas, ramaje secundario y humedad; y otra para ramas muertas, que solamente contienen el 50% del ramaje secundario muerto. Bajo tal consideración, para la ecuación de ramas vivas se incluyeron parámetros como el porcentaje de árboles a podar, la ecuación alométrica exponencial no lineal resuelta por el método de mínimos cuadrados y obtenida para la poda de clareamiento y reducción, en función de la longitud promedio de la rama central seca, además de los porcentajes de ramaje secundario y de hojas para cada especie, así como el tamaño de la muestra de ramas centrales podadas. Para el caso de la ecuación con ramas muertas, se utilizaron los mismos parámetros pero con la salvedad de que para la poda de limpieza solo se utiliza el 50% del ramaje secundario.

Los estudios de estimación de biomasa que se han realizado para árboles, han considerado variables dendrométricas como, DAP, DB y altura total principalmente, este estudio se basó en la estimación de biomasa para ramas a través de parámetros como la proporción de ramas secundarias y hojas, parámetros de humedad y longitud de la rama central.

7 Conclusiones

La obtención de pocas variables de fácil medición como: diámetro, longitud, peso y humedad de una rama, con base en la utilización de podas establecidas en la Norma ANSI A300, se pudo estimar la cantidad de biomasa de ramas primarias en las especies *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus uhdei* y *Pinus radiata* para Ciudad Universitaria. La mayor cantidad de biomasa obtenida fue a través de la poda de reducción con 288 kg en promedio y la poda de limpieza con la menor producción de biomasa con 64 kg en promedio.

Es necesario realizar estudios más profundos con respecto a los índices morfométricos y dendrométricos, sobre todo para índice de copa y espacio vital, altura total del árbol y diámetros a la altura del pecho, basal y de copa, para conocer su relación y el posible uso de éstos en ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa

Se recomienda diseñar un plan de manejo de poda para los jardines de Ciudad Universitaria con el fin de mantenerlos en buen estado, al mismo tiempo que se puede obtener biomasa para sustentar el gasificador del Instituto de Ingeniería.

8 Literatura

- Acosta-Mireles M., Vargas-Hernández J., Velázquez-Martínez A., Etchevers-Barra J., 2002, Estimación de biomasa mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencias*, vol 36 no.6, pp 725-736.
- American National Standard, ANSI A300 (part 1)-2008 Pruning Revision of ANSI A300 (PART 1)-2008, pp. 13
- Arias, D., 2004, Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación de la zona sur de Costa Rica, *Revista forestal Kurú*. 1(2):1.-11.
- Arias D., 2005, Morfometría del árbol en plantaciones forestales tropicales, *Revista forestales, Costa Rica*, 2(5) pp13
- Arno-Seitz R., 1995, Manual de podas de especies arbóreas, Florestais FUPEF, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná Curitiba, 56 pp
- AVENDAÑO, H. D. M. 2006. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham., en Tlaxcala, México. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 66 p
- Barrera-Galván, M., 2008, Instrumentación de una planta piloto de gasificación de residuos biomásicos de 250 kWe. Tesis de licenciatura. Facultad de estudios superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., pp. 134
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer, FAO, Forestry Paper, vol 53, no. 13.
- Bedker J., J. O'Brien y Mielke M., 2004, Como podar árboles, United States Department of Agriculture USDA, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry, NAFR-02-04
- Calderón de R. G. y Rzedowski J. 2004. Familia Oleaceae (Fascículo 124). In: Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Ed: J. Rzedowski y G. C. de Rzedowski. Instituto de Ecología, A.C., Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. 37 p.
- Cano-Santana Z., J. Castillo-López y P. Moreno-Quintana., 2007. Generación de energía eléctrica para el alumbrado de algunas calles de la Ciudad Universitaria por

medio de gasificación de residuos biomásicos orgánicos. Informe de circulación restringida, informe.

- Caputo A., 2005, Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants effects of logistic variables, *Biomass and Bioenergy*, pp 35–51.
- Coder D., 2000, Pruning guide for storm forcé reduction in the tree crowns, *Tree biomechanics series*, University of Georgia. Pags. 3.
- Costas R., 2005, Stand density and prune effects on the yield of a seven year old *Pinus taeda*, *Ciência Florestal*, Vol. 15, No. 3, pp. 275-284
- Costas R., 2007, Sistema de ecuaciones de producción y crecimiento de *Pinus taeda*, L. con variables asociadas a las podas, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 16(2), 136-144.
- David W., R. Cox y O'Meara C., 2010, Pruning mature shade trees Colorado Master Gardener, notes 616, Colorado State University Extension.
- De la Rosa-Urbalejo, D., 2010, Estudio de la producción de gas de síntesis en un gasificador que opera con residuos sólidos. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., pp 92
- Diagnóstico y caracterización de la 2ª sección e inventario total de su arbolado, informe final. Benavides; <http://www.sma.df.gob.mx>
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J.D. Etchevers- Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula*, *Revista forestal, Madera y Bosques* 13(1):25-34
- Djomo, A.N., Ibrahima, A., Saborowski, J., Gravenhorst., 2010, Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, ScienceDirect, No. 260, pp. 1873-1885.
- Dujesiefken D., C. Drenou, Oven P. y H. Stobbe, 2000, Capitulo 15 The effects of pruning type on wind Loading of *Acer rubrum*, *Arboricultural*, pp73.
- Elvir J., 2008, Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 17(1), 67-78.

- Fehrmann, L. y Kleinn, C., 2006, General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe, Science Direct, Forest Ecology and Management, No. 236, pp 412-421.
- Francis, John K. 1990. *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh. Fresno, tropical ash. SO-ITF-SM-28. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 4 p.
- García-Ríos, M., 2009, Evaluación de podas y secuelas en el arbolado urbano en un Parque en la Delegación de Tlalpan. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., pp.78
- Gasparri I., E. Manghi, 2004, Estimación de volumen, biomasa y Contenido de carbono de las regiones Forestales Argentinas, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, República Argentina Ministerio de Salud y Ambiente Dirección de Bosques, anuario.
- Gilman, F., y Dennis G. Watson, 1993 *Ligustrum lucidum*, Universidad de Florida, vol 15, no.4.
- Gobierno de Distrito Federal, 2000, Manual técnico para la poda, derribo y trasplante de árboles y arbustos de la ciudad de México, México. pp.166
- Gyenge J., Fernández M., M. Sarasola, Urquiza M., T. Schlichter, 2009, Equations for above-ground biomass and stem volumen of some native woody species growing in Foyel valley, NW Patagonia Argentina. *Bosque*, vol 30 n.2 pp 7.
- Hayes E., 2007, Summary of presentations made by both Dr. Ed Gilman from the University Florida at the 5th Annual Rochestre and Dr. Bruce Fraedrich , Structural Pruning of Landscape Trees, *Brooklyn Center*.
- Hernández B., 2010, Propuesta de un programa de podas para las especies *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum* y *Pinus radiata*, en Áreas Ajardinadas de Ciudad Universitaria, México D.F, Cave del programa: 2010-12/95820
- ISA, Pruning Landscape Trees, Agricultural Research and Cooperative Extension, College of Agricultural Sciences.
- Jaramillo V., Ciclo global del carbono , INE <http://www.ine.gob.mx>, 12/10/2010
- John K. 1990. *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh. Fresno, tropical ash. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 4 p.
- Klingeman B., Campbell A. y R. Maxey, 2008, Best Management Practices for Pruning Landscape Trees, Shrubs and Ground Covers, *Originally developed as*

“Pruning Landscape Trees, Shrubs and Groundcovers”, The university of Tennessee, Institute of agriculture, folleto PB1619.

- López de Juambelz, R., La Vegetación en el Diseño de los Espacios Exteriores, editado por la Facultad de Arquitectura de la UNAM, ISBN: 968-36- 6715-5. 2000
- López-Guadarrama, D., 2008, Estudio calorimétrico y del cromatograma base de la mezcla patrón del gas de síntesis generada en un gasificador que opera con biomasa. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México D. F.. pp 91
- Malleux J.,2003, Estudio de la relación D.A.P. con el diámetro de Copa en un bosque húmedo sub tropical, Revista forestal de Perú, v.4 (1-2):1-5,
- Martínez G. L. 2008. Árboles y áreas verdes urbanas de la Ciudad de México y su zona metropolitana. Fundación Xochitla. Tepotzotlán, Edo. de México, México. 549p.
- Masera-Ceruti, O., 2006, La bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. CONAFOR, Mundi-prensa, México.
- Moore W., A.de l'Arbre, 2002, El modelo de las zonas del árbol Sciences, numero 8 (3).
- Motnoya G., *et al.*, Desarrollo forestal sustentable: captura de carbón en las zonas tzeltal y tojolabal del Estado de Chiapas, INE- ECOSUR. Pp. 50
- MuñozF., 2005, Growth characteristics in diameter, height, and volume of a *Eucalyptusnitens*plantation with different silvicultural treatment for pruning and thinning,Bosque, Vol. 26 N°1, pp. 93-99
- Najera G., 2010, Identification of variables for the morphological characterisation of hot peppers (*Capsicum spp*) in Tabasco, México. Uciencia, 26(3):225-234
- Navarro-Cerrillo, R. M., Hernández-Bermejo, J. E., Hernández-Clemente, R. 2011. Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. Applied Vegetation Science, 14: 256 –267.
- Norma del Distrito Federal, México, NADF-001-RNAT-2006
- Phillips J.F., Duque A.J., Yepes A.P., Cabrera K.R., García M.C., Navarrete D.A., Álvarez E., Cárdenas D. 2011. Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales -IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 68 pp.

- Parikka M., 2004, Global biomass fuel resources, science direct Biomass and Bioenergy, pp. 613–620
- Rapagna S., N. Janda, Kiennemann A., P. Foscolo, 2000, Steam-gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles, Biomass and Bioenergy Pergamon pp. 187-197
- Red interamericana de información sobre diversidad, iabin, Universidad de España, Facultad de Ciencias, base de datos de invasiones biológicas para Uruguay, <http://inbuy.fvien.edu.uy>, consulta 14/07/2012
- RZEDOWSKI, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 8(1-2):59-129
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC, <http://www.ipcc.ch/>, 26/08/2011
- REMBIO, Red Mexicana de Bioenergía, 2006, <http://www.rembio.org.mx>, 25/06/2011
- REPSA, Reserva Ecológica del Pedregal. <http://www.repsa.unam.mx>, Consulta: 27/08/2010
- Rodríguez Sánchez, L. M. y E. J. Cohen-Fernández. 2003. Guía de árboles y arbustos de la zona metropolitana de la Ciudad de México. EMECEAC, UAM, Gobierno del Distrito Federal y SEMARNAT. México, D.F.
- Sánchez de L. C. J. M. 2005. Las especies del género *Ligustrum* cultivadas en España. In: Árboles ornamentales. Disponible en: <http://www.arrakis.es/~jmanuel/Ligustrum.pdf>
- Santacruz García, Noé. Situación del arbolado del Parque Nacional Xicohtécatl, Tlaxcala, México. *Rev. Fores. Latino.*, jun. 2008, vol.23, no.43, p.69-89
- Schlegel B., Gayoso J. y J. Guerra, 2000, Universidad Austral de Chile, Manual de procedimientos muestreo de biomasa forestal, Proyecto FONDEF D9811076.
- Segura, M. y Kanninen, M., 2006, Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together, *Agroforest Syst*, 68:143–150
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2001. Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. México,D.F.
- Sherinski J., 2002, Pruning guide. Sharp, advice for the pruning of trees and shrubs, STIHL incorporated 0457-970-0142.M20.D2.CP

- Siddiqui, T., Farrakh, N. y Ahmed, I., 2010, Effect of different pruning intensities on the growth of *Acacia nilotica* (Kikar), Nota en *Agrociencia* 44: 93-97
- Smiley E. y B. Kane, 2006, *Arboriculture & Urban Forestry*, Sociedad Internacional de Arboricultura ISA, 2006, La poda de árboles jóvenes, 32(1): January
- Thompson L. y B. Whalen, 2002, City of Burlington, Vermont Urban Forestry Master Plan, The USDA Forest Service, The United States Department of Agriculture Forest Service, folleto.
- Velazquez-Martí, B., 2011, Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean almond groves. *Renewable Energy, Science Direct*, No. 36 pp. 621-626