



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**“Almacenamiento de carbono de tres especies
forestales presentes en áreas verdes de la ciudad de
Lima”**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias Ambientales
con mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento
Ambiental

AUTOR

Karin BEGAZO CURIE

ASESOR

Dr. Jorge Leonardo JAVE NAKAYO

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Begazo, K. (2020). *Almacenamiento de carbono de tres especies forestales presentes en áreas verdes de la ciudad de Lima*. Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias Ambientales con mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	0000-0003-4363-3599
DNI o pasaporte del autor	10761407
Código ORCID del asesor	0000-0003-3536-881X
DNI o pasaporte del asesor	010066653
Grupo de investigación	Cambio climático y sostenibilidad ambiental
Agencia financiadora	Recursos propios
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lugar: Lima Coordenadas geográficas: 12°05'06'' de Latitud Sur y 76°75'00''
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2013-2020
Disciplinas OCDE	Forestal http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.02 Ciencias del medio ambiente http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los diez días del mes de diciembre del año 2020, siendo las 11:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000121-2020-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 07 de diciembre del 2020, con la finalidad de evaluar la sustentación virtual al amparo de la Directiva de la UNMSM aprobada con Resolución Rectoral N°01357-R-20 de la siguiente tesis:

TITULO

«ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE TRES ESPECIES FORESTALES PRESENTES EN ÁREAS VERDES DE LA CIUDAD DE LIMA»

Que, presenta la Bach. **KARIN BEGAZO CURIE**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL**.

El Miembro del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 04606-FIGMMG-2013 del 20 de junio del 2013, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO 17

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL** a la Bach. **KARIN BEGAZO CURIE**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.



Firmado digitalmente por CABRERA
CARRANZA Carlos Francisco FAU
20140602282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 10.12.2020 12:21:58 -05:00

DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Presidente

MG. NORA ROSA CONCEPCIÓN MALCA CASAVILCA
Miembro

MG. JOSE JORGE ESPINOZA ECHE
Miembro

DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Asesor

DEDICATORIA

Para mis amados Adrián y Alexandra

AGRADECIMIENTOS

Al comité evaluador por sus valiosos comentarios al presente trabajo de tesis

Al Ing. Ignacio Lombardi Indacochea (Vicerrector UNALM 2015) por brindarme la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación.

Al Ing. Martín Araujo Flores, por su apoyo y soporte en el desarrollo del presente trabajo.

A todos los que colaboraron de una u otra forma en el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
SUMMARY.....	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	11
1.2.1 Problema general.....	13
1.2.2. Problemas específicos.....	13
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	17
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1. Localización del área de estudio.....	48
3.2. Características del área de estudio.....	48
3.3. Materiales y equipos utilizados.....	49
3.4. Criterios de Selección de especies y área de estudio.....	49
3.5. Características de la plantación.....	50
3.6. Selección de los árboles.....	51
3.8. Trabajo de laboratorio.....	56
3.8.1. <i>Determinación del contenido de humedad.....</i>	<i>56</i>
3.8.2. <i>Determinación de la fracción de carbono.....</i>	<i>58</i>
3.9. Cálculo de la biomasa aérea.....	59
3.10. Cálculo de la cantidad de carbono.....	60
3.11. Análisis de los datos.....	60
3.12. Selección de modelos de biomasa aérea.....	61
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados.....	63
4.1.1. Rango de validez de las variables.....	63
4.1.2. Contenido de carbono orgánico presente en las especies en estudio....	63
4.1.3. Biomasa y carbono almacenado.....	65
4.1.3.1. <i>Diferencias entre la biomasa y carbono total almacenado entre especies</i>	<i>66</i>
4.1.3.2. <i>Biomasa y carbono almacenado por componentes entre especies...</i>	<i>67</i>

4.1.3.3. Biomasa y carbono almacenados por componente dentro de la misma especie.....	70
4.1.4. Selección de modelos de biomasa aérea.....	74
4.1.4.1. Selección de modelos de biomasa aérea para <i>Tecoma stans</i> (“huaranguay”).....	76
4.1.4.2. Selección de modelos de biomasa aérea para <i>Grevillea robusta</i>	78
4.1.4.3. Selección de modelos de biomasa aérea para <i>Schinus molle</i>	80
4.2. Pruebas de hipótesis.....	83
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXOS.....	98

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidad de árboles extraídos por especie y rango diamétrico.....	51
Cuadro 2. Modelos alométricos ensayados para la estimación de la biomasa sobre el suelo.....	62
Cuadro 3. Rango de validez de las variables utilizadas.....	63
Cuadro 4. Fracción de carbono total y por componente del árbol según especie.....	64
Cuadro 5. Biomasa aérea total y por componente según especie.....	65
Cuadro 6. Contenido de carbono total y por componentes según especie.....	66
Cuadro 7. Análisis de varianza para la biomasa total entre especies.....	66
Cuadro 8. Análisis de varianza para carbono total entre especies.....	67
Cuadro 9. Análisis de varianza de la biomasa del fuste entre especies.....	67
Cuadro 10. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer de las diferencias entre promedios de biomasa del fuste entre especies.....	68
Cuadro 11. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en el fuste.....	68
Cuadro 12. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en las ramas.....	69
Cuadro 13. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en las hojas.....	69
Cuadro 14. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer de las diferencias entre promedios de carbono del fuste entre especies.....	69
Cuadro 15. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie <i>Tecoma stans</i>	70
Cuadro 16. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie <i>Grevillea robusta</i>	70
Cuadro 17. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie <i>Schinus molle</i>	71
Cuadro 18. Valores encontrados en el test de Tukey-Kramer para diferencias significativas entre promedios de biomasa por componentes dentro de la especie....	71
Cuadro 19. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes dentro de la especie <i>Tecoma stans</i>	72
Cuadro 20. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes dentro de la especie <i>Schinus molle</i>	72
Cuadro 21. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes de la especie <i>Grevillea robusta</i>	72
Cuadro 22. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer para diferencias significativas entre promedios de carbono por componente dentro de la especie.....	73
Cuadro 23. Modelos alométricos seleccionados y estadígrafos obtenidos para la Biomasa aérea total de <i>Tecoma stans</i>	77
Cuadro 24. Modelos alométricos y estadísticos obtenidos para la biomasa aérea total de <i>Grevillea robusta</i>	79

<i>Cuadro 25. Modelos alométricos y estadísticos obtenidos para la Biomasa aérea total de Schinus molle.</i>	81
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mercado global de carbono. Fuente. Joanne Nova.com.au (2012).....	27
Figura 2. Beneficios económicos del arbolado urbano. Fuente. Daigneau (2013).....	32
Figura 3. <i>Tecoma stans</i> (L.) Jussieu ex H.B.K var. <i>stans</i> ("huaranguay). (a) Árbol de huaranguay. (b) Hojas, flores y fruto de Huaranguay. Fuente. Montesinos 2015.....	44
Figura 4. <i>Schinus molle</i> L. ("molle andino"). (a) Árbol de molle (b) Hojas y fruto de molle. Fuente. www.elnougarden.com. (2015).....	45
Figura 5. <i>Grevillea robusta</i> A. Cunn ex R.Br. ("grevilea"): (a) Arbol de grevillea. (b) Flores (c) Hojas. Fuente. http://www.jardinerosenaccion.es (2015).....	47
Figura 6. Localización del área de estudio. Fuente. Begazo 2015.....	48
Figura 7. Corte del árbol. Fuente. Begazo 2015.....	52
Figura 8. Medición de la altura total. Fuente. Begazo 2015.....	52
Figura 9. Secciones de los árboles para la medición de biomasa aérea. Fuente. Begazo 2015.....	53
Figura 10. Pesado de componentes del árbol: (a) pesado de rama pequeña. (b) pesado de ramas grandes. (c) pesado de sección del fuste. Fuente. Begazo (2015).....	54
Figura 11. Pesado de hojas (a) Deshojado y (b) Pesado de hojas. Fuente. Begazo 2015.....	55
Figura 12. División y codificación de secciones del árbol. (a) Codificación para muestras de fuste y ramas mayores a 10 cm de diámetro (b) Codificación de muestras de fuste y ramas menores a 10 cm. Fuente. Begazo (2015).....	56
Figura 13. Secado de las muestras. (a) Secado en estufa (b) Enfriamiento de la muestra en desecador con sílica-gel. Fuente. Begazo (2015).....	57
Figura 14. Registro del peso seco de las muestras. (a) Hojas (b) Rama. Fuente. Begazo (2015).....	57
Figura 15. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de <i>Tecoma stans</i> . Fuente. Begazo (2015).....	77
Figura 16. Comparación de la precisión entre los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para <i>Tecoma stans</i> . Begazo (2015).....	78
Figura 17. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de <i>Grevillea robusta</i> . Begazo (2015).....	78
Figura 18. Comparación de la precisión entre los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para <i>Grevillea robusta</i> . Begazo (2015).....	80
Figura 19. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de <i>S. molle</i> . Begazo (2015).....	81
Figura 20. Comparación de la precisión de los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para <i>Grevillea robusta</i> . Begazo (2015).....	82

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa, y la generación de modelos alométricos de especies forestales en áreas urbanas. Se analizaron 44 árboles, usando el ensayo destructivo, correspondientes a las especies *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br, y *Schinus molle* L., de los cuales se midió el diámetro (dap), altura total (ht) y altura comercial (hc), se registró el peso húmedo del fuste, ramas y hojas y se determinó, la fracción de carbón orgánico para cada especie, siendo de 50.82 % para *Tecoma stans*, 51.01% para *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br y 46.57% para *Schinus molle*.

Los resultados de carbono almacenado en la biomasa fueron de 21.96 kg/árbol para *Tecoma stans*, 34.98 kg/árbol para *Grevillea robusta* y 14.52 kg/árbol para *Schinus molle*, sin encontrarse diferencias significativas entre ellas. Sin embargo, cuando se comparó el carbono almacenado por componentes entre las tres especies, se encontró que es el tronco del árbol el componente que difiere, y para el caso de la especie *Grevillea robusta*, es su fuste el que almacena la mayor cantidad de carbono. Se comparó el carbono almacenado en cada especie, diferenciando entre componentes estructurales y se encontró que no existe diferencias significativas entre el carbono almacenado en el fuste y ramas de *Tecoma stans* y *Schinus molle* y que las hojas son la que menos carbono almacenan. En el caso de *Grevillea robusta*, el carbono almacenado en el tronco sí difiere significativamente al almacenado del resto de componentes.

Se ensayaron varios modelos alométricos, en base a variables de fácil medición en campo (dap, ht y hc) y se encontró que la variable que más se ajusta a los datos es el diámetro. La selección de modelos, se basó en aquellos que tuvieran mayor ajuste a los datos, para lo cual se utilizó el Coeficiente de Determinación, Error Estándar de la Estimación y el Índice de Furnival.

Palabras clave: Biomasa, almacenamiento carbono, fracción de carbono, ecuaciones alométricas, áreas urbanas, *Tecoma stans*, *Schinus molle*, *Grevillea robusta*.

SUMMARY

The objective of the study was to determine the quantity of carbon storage and the generation of allometric models for aboveground biomass for urban areas species from the city of Lima. Through destructive tree sampling, 45 trees were evaluated: 15 for *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, 15 from *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br, y 14 individuals from *Schinus molle* L. For each individual were registered parameters of easy measurement in field, such as diameter at breast height (dbh), total height and commercial tree height, and the fresh weight of each component from the tree (trunk, branches and leaves) were measured for later measurement of the aboveground biomass. Likewise, the fraction carbon was determined being 50.82 % for *Tecoma stans*, 51.01% for *Grevillea robusta* and 46.57 % for *Schinus molle*.

The results of carbon storage in the aboveground biomass were 21.96 kg/tree for *Tecoma stans*, 34.98 kg/tree for *Grevillea robusta* y 14.52 kg/tree for *Schinus molle*. No statistical differences were found for these results. However when it was compared the carbon storage for components between species, it was found significant differences for the trunk between the three species, being the trunk of *Grevillea robusta* the component with the most carbon stored. In addition, it was compared the carbon storage for each component inside the specie. The results obtained shows that there is not significant differences between the trunk and branches in two species (*Tecoma stans*, and *Schinus molle*). Different results were found for *Grevillea robusta* where the trunk is the component that differs significantly from branches and leaves.

It was also generated allometric models for the species. The diameter at breast height was the parameter with better adjustment for the data. The selection of the adjusted model considered the highest rates for the determination coefficient and the lowest values for the Root square mean error and the Furnival Index.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

Hacia el año 2012 el Ministerio de Medio Ambiente (MINAM) realiza la última actualización del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), encontrando que la cantidad de CO₂ equivalente emitida a la atmósfera fue de 171 310 Giga gramos, y que en el Perú, el Cambio de Uso del Suelo es la principal causa de emisiones de GEI, con 86 742 Gg CO_{2e} representando el 51% del INGEI 2012 y dentro de este sector, la principal fuente de emisiones es la eliminación de bosques y pasturas con 79 772 Gg CO_{2e}. Asimismo MINAM (2012) identifica que el segundo sector con mayor emisión de GEI es Energía con 44 638 Gg CO_{2e}, representando el 26% del total de emisiones y dentro de este sector, destaca la fuente de emisión generada por la quema de combustibles fósiles en el sector Transporte con 17 847 Gg CO_{2e}. Agricultura, representa el 15% del total de emisiones y es el tercer sector con mayores emisiones alcanzando 26 044 Gg CO_{2e}. En conjunto, estos tres sectores representan alrededor del 92% del total de las emisiones de GEI en el Perú para el año 2012 (MINAM 2012).

El arbolado y los bosques urbanos juegan un papel importante en las ciudades, pues contribuyen a mitigar los niveles de CO₂ a través del almacenamiento y secuestro de carbono, así como también proveen múltiples beneficios a la comunidad como el incremento en la calidad del aire (captación de material particulado) y del agua, espacios para la recreación, ocio y relajación, reducción de la demanda de energía al

generar un microclima, genera un valor emocional y estético para los residentes, provee de hábitat para fauna local, entre otros. (Ferrini y Fini 2011). Sin embargo, no son valorados en su real dimensión, ya que los servicios ecosistémicos que presentan no son bien entendidos ni cuantificados, de ahí que exista muy poca información documentada y cuantificada relacionada a esta temática en escenarios urbanos.

Los árboles ubicados en áreas urbanas experimentan mayor estrés (contaminación, podas, plagas, daños estructurales, entre otros) que los ubicados en ecosistemas naturales, por ello los datos reportados de la cantidad de carbono almacenado y secuestrado difieren entre sí cuando se trabaja en su cuantificación utilizando metodologías desarrolladas para bosques naturales (Nowak y Crane 2002). Es por ello, que se requiere investigación específica para el arbolado urbano, además de estrategias y políticas especiales para el desarrollo de estas áreas, así como para futuros planes de incremento de espacios verdes en las ciudades.

Las investigaciones sobre cuantificación de biomasa y almacenamiento de carbono no son solo importantes para comprender la dinámica del ecosistema forestal urbano sino para entender las áreas verdes, no solo como un lugar de esparcimiento sino como un recurso que puede aportar valor ambiental y económico a las ciudades. De la misma manera, las iniciativas para la captura de carbono que se derivan de los Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto, o de Mercados Voluntarios requieren de información confiable para la negociación de los proyectos. En base a lo antes mencionado se resalta la importancia del presente trabajo puesto que permitirá generar información acerca de la cantidad de carbono que pueden almacenar las especies forestales presentes en áreas verdes, sino también permitirá generar ecuaciones alométricas para tres especies arbóreas utilizadas comúnmente en áreas verdes de Lima: *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, *Grevillea robusta* A. Cunn ex R.Br., *Schinus molle* L., permitiendo el desarrollo de políticas

efectivas para el manejo ambientalmente sostenible de la ciudad de Lima.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son las diferencias significativas entre la cantidad de carbono que almacenan la biomasa aérea de las especies *Grevillea robusta*, *Tecoma stans* y *Schinus molle*?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuál es la diferencia entre tres especies forestales seleccionadas difieren en cuanto a la biomasa aérea y el carbono almacenado según componente del árbol?
2. ¿Cuál es la diferencia dentro de cada especie en cuanto a la biomasa aérea y el carbono almacenado según componente del árbol?
3. ¿En qué medida el diámetro y la altura de los árboles permite explicar la cantidad de biomasa aérea?

1.3. Justificación teórica

El cambio climático es consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono; el cual se obtiene de la combustión de combustibles fósiles y al cambio de uso de suelo (IPCC 2014, EPA 2017); es un problema latente y de gran preocupación en el país. El Perú es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, teniendo como

compromiso elaborar el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) y con ello fortalecer los sistemas de información nacional. Asimismo, como parte de las estrategias derivadas del Protocolo de Kioto, el Perú tiene la oportunidad de desarrollar proyectos de reforestación para la fijación y almacenamiento de carbono (UNFCCC 2013), el cual es fijado y almacenado por las plantas de manera natural.

El análisis del almacenamiento de carbono explora el carbono contenido en la vegetación, el cual es producido a través de la fotosíntesis. Este proceso involucra que las células de las plantas conviertan carbono, a partir de dióxido de carbono que toman del ambiente, en azúcares que pueden ser almacenados en las hojas, ramas, y raíces contribuyendo al crecimiento del árbol. El método que se usará en la presente investigación se basa en la estrecha relación entre la cantidad de carbono almacenado y la cantidad de biomasa del árbol, así a mayor cantidad de biomasa mayor será la proporción de carbono que se almacena en el árbol (Yin, Yin, Zhao, y Yang 2012).

De acuerdo con Gould (1966) citado por Picard, Saint-André, y Henry (2012) a escala poblacional existe una relación entre las diferentes proporciones de un individuo. Esta relación se fundamenta en el desarrollo ontogénico de los individuos lo cual es bastante similar para todos, excepto la variación ligada al desarrollo particular que tuvo cada individuo. Por lo tanto, se puede decir que los individuos que se desarrollan bajo las mismas condiciones, siguen un patrón en cuanto a sus proporciones, entre el tamaño de la corona del árbol y el diámetro, entre la altura y el diámetro y entre la biomasa y el diámetro, como lo indican King, 1996; Archibald & Bond, 2003; Bohlman & O'Brien, 2006; Dietze *et al.*, 2008 citados por Picard, Saint-André, y Henry 2012.

Según Picard, Saint-André, y Henry (2012), la alometría permite predecir una medida de un árbol (por ejemplo, su biomasa) en función

de otra medida (usualmente, el diámetro, pues es de fácil medición). Los modelos de predicción de la biomasa relacionan dos elementos: la determinación directa de la biomasa de los árboles y su estimación a partir de los datos del inventario forestal. De esta manera determinar el peso de los árboles para medir su biomasa es fundamental para el proceso de elaboración de ecuaciones alométricas.

Información sobre el arbolado urbano es muy escasa, principalmente en lo relacionado a la dinámica de crecimiento de los árboles y a la valoración de los servicios ambientales que brindan, dado que el desarrollo de los árboles que crecen en zonas urbanas es diferente al encontrado en bosques naturales y para los cuales, si existe variedad de información, de ahí la importancia de desarrollar investigaciones que permitan estimar efectivamente sus beneficios y cuantificarlos.

1.4. Justificación práctica

El Estado a través del Ministerio del Ambiente, Gobiernos locales y Organismos no gubernamentales vienen desarrollando esfuerzos para mitigar los efectos del cambio climático. Una de estas iniciativas es la forestación y reforestación con fines de captura de carbono. (MINAM 2016, FONAM 2016). De esta iniciativa, se hace posible la presentación de proyectos de reforestación con lo cual, los gobiernos locales se verían beneficiados al recibir un pago por realizar el almacenamiento y captura de carbono, dentro de las diferentes alternativas de mercados de bonos de carbono.

Asimismo, la gestión de áreas verdes en zonas urbanas conlleva la adecuada selección de especies forestales basadas no solo en principios ecológicos, sociales, económicos y paisajísticos sino también ambientales (los árboles brindan una serie de beneficios ambientales como por ejemplo provee de sombra, es hábitat para animales y plantas, capta material particulado, secuestro y almacenamiento de carbono entre otros- FAO 2016-) y considerando las características propias de la especie (Castillo y Ferro 2015). La

presente investigación contribuirá a generar información para la adecuada gestión de las oficinas de planificación de áreas verdes de los Gobiernos locales, en relación a especies forestales que puedan ser consideradas como alternativas para ser plantadas en zonas urbanas, para ello la investigación consideró especies adaptadas a condiciones de aridez, rápido crecimiento y fáciles de mantener (menores costos) y que además presenten aspectos estéticos y ambientales idóneos para ser usadas en áreas urbanas como las de Lima Metropolitana.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar si existen variación en la cantidad de carbono que almacena la biomasa aérea de tres especies forestales presentes en áreas verdes en la ciudad de Lima.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar y comparar la biomasa aérea total y el carbono almacenado en los componentes del árbol entre especies.
- Determinar y comparar la biomasa aérea total y el carbono almacenado entre componentes dentro de la especie.
- Ajustar modelos alométricos de biomasa aérea a partir del diámetro y altura de los árboles.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Estimación de carbono en biomasa forestal en áreas verdes*

Numerosa investigación ha sido realizada para la determinación del almacenamiento y captura de carbono en áreas boscosas, sin embargo, muy poca información se encuentra para el caso de áreas verdes en zonas urbanas, en el caso del Perú, no existe información documentada al respecto.

G Sandhya Kiran et al (2011) realizan una investigación para cuantificar la cantidad de carbono secuestrado por árboles ubicados en las veredas de la ciudad de Vadodara-India, encontrando que dichos árboles secuestran 73.59 t CO₂, lo cual representa el 22 % del total de carbono emitido por la ciudad, concluyendo con la evidente importancia de plantar árboles en veredas para mitigar las emisiones de carbono por fuentes antropogénicas.

Pérez (2010) analiza las posibilidades de poder financiar proyectos a nivel urbano y a nivel nacional, delineados o realizados considerando criterios de sostenibilidad y de respeto con el medio ambiente. Estos proyectos generarían bonos de carbono los cuales podrían ser negociados en el mercado internacional. Pérez (2010) analiza específicamente proyectos a nivel urbano, los llamados proyectos “*Ecociudad*”. Esta investigación, investigó los proyectos de

Ecociudad que se están implementando en la ciudad de Dongtan en China.

Walsh (2012) determina la aptitud de los bosques urbanos para el secuestro y almacén de carbono en el “*Parque Industrial Burnside*” en Nueva Escocia, Canadá indicando que los asentamientos urbanos e industriales constituyen áreas potenciales para la captura y almacén de carbono a través de la plantación de árboles. La investigación examina el grado en el que una plantación intensiva de árboles puede mejorar el almacén y secuestro de carbono en el Parque Industrial Burnside, desarrollándose para ello un análisis geo-espacial y una construcción de un modelo de carbono para la zona. Asimismo, se encontró que, si todos los espacios potenciales en el área de estudio son plantados con árboles para el año 2020, entonces se obtendría 26 368 T de carbono almacenados a una tasa de 635 T C/año, lo cual sería alcanzado para el 2050.

Waran, A et al (2001) evaluó la cantidad de carbono almacenada en los árboles dentro y en los alrededores de la ciudad de Pune-India, obteniéndose una tasa de secuestro de 15 000 T/año y esto constituye un 2% de carbón secuestrado del total emitido por la ciudad de Pune (780 000 T CO₂ /año). Asimismo, señalan la importancia de la determinación de esta información ya que constituye un marco referencial para implementar futuros proyectos de reforestación en zonas menos congestionadas (periféricas a la ciudad) y con medianas a bajas tasas de emisión de dióxido de carbono.

Mc Hale et al (2009) analizaron las diferencias existentes entre la biomasa resultante de utilizar ecuaciones alométricas generales de bosques tradicionales y la biomasa generada a partir de datos propios de especies de áreas urbanas, encontrándose que existen mucha diferencia, encontrándose que dependiendo de la escala de trabajo, las especies, la densidad y las características en las que se desarrolla, la variabilidad en los resultados puede ser entre 60 a 300 %, por lo que no hay seguridad en la precisión de la información como resultado del

uso de estas ecuaciones generales. Los resultados de sus investigaciones demuestran que el uso de ecuaciones específicas por especie, que se desarrollan en áreas urbanas aplicadas a la estimación de biomasa ha demostrado una variabilidad mucho menor entre los resultados (menos del 10%).

Troxel et al (2013) realiza el 2013 una investigación para estudiar las interacciones entre la edad, las dimensiones de la copa, y el tronco de árboles urbanos jóvenes en la ciudad de New Haven, CT, EE.UU, e identificar las relaciones alométricas y generar ecuaciones predictivas de crecimiento y biomasa para la región. Asimismo, indica que el conocimiento de las ecuaciones alométricas puede permitir a los planificadores de áreas urbanas satisfacer los objetivos sociales económicos y ambientales en las ciudades. Sin embargo, los datos del arbolado joven, a nivel de ecosistemas urbanos, son bastante limitados.

Chavan y Rasal en el año 2010, investigaron el carbono total secuestrado por los árboles del campus de la “Universidad Dr. B.A.M Aurangabad”, utilizando el método no destructivo para la determinación de la biomasa y el carbono orgánico de los árboles del campus. El diámetro mayor a 10 cm y la altura fueron considerados para la medición de la biomasa y el contenido de carbono. Asimismo, las estimaciones de biomasa y carbono fueron comparadas con modelos alométricos. De la investigación se pudo determinar que las estimaciones basadas en modelos teóricos pueden determinar efectivamente la biomasa considerando métodos no destructivos.

El arbolado urbano, debido a su baja densidad (individuos por Ha) almacena menos C por ha (25.1 tC/ha), que los ubicados en bosques naturales (53.5 tC/ha). Sin embargo, en base a la superficie cubierta por un individuo, el carbono almacenado y secuestrado es mayor que en áreas naturales. Esto es debido a la mayor dimensión que desarrollan estos árboles y al relativamente rápido crecimiento que

experimentan los árboles en zonas urbanas dado que se encuentran que la estructura forestal es más abierta y a que no existe competencia entre árboles en comparación con aquellos que se desarrollan en áreas naturales. Árboles individuales en áreas urbanas, en promedio, contiene, aproximadamente cuatro veces más C que árboles individuales en áreas naturales. Asimismo, dadas las diferencias en la estructura y composición del arbolado urbano en comparación con bosques naturales, es necesario desarrollar mayor investigación en ecuaciones para biomasa forestal urbana. Así, con un mayor entendimiento y cuantificación de los ecosistemas urbanos, pueden ser usados para desarrollar planes de manejo y políticas nacionales que puedan incrementar significativamente la calidad del medio ambiente y la salud de la población. (Nowak y Crane 2002).

Nowak, Gregory y Rowntree en 1994 realizan un proyecto de 3 años (Proyecto de Clima en los Bosques Urbanos de Chicago) para cuantificar los efectos de la vegetación en el ambiente local y contribuir en la planificación y manejo de la ciudad para incrementar los beneficios ambientales netos (secuestro carbono, remoción de material particulado, efecto en el aire y la temperatura) derivados de los bosques urbanos en la ciudad de Chicago.

Nowak, et al (2013) cuantifica el almacenamiento y secuestro de carbono de árboles urbanos en los Estados Unidos para evaluar el rol del arbolado urbano en el cambio climático. Para ello se tomó información de los árboles de 28 ciudades y 6 estados para determinar la densidad de carbono promedio por unidad de área cubierta por árbol. Posteriormente los datos fueron proyectados para determinar el almacenamiento de carbono y el secuestro anual a escala estatal y nacional. La investigación encontró que la densidad de carbono almacenado promedio fue de 7.69 Kg C /m^2 de cobertura arbórea y la ensidad promedio de secuestro es de 0.28 Kg C/m^2 de cobertura arbórea por año. La cantidad total de carbono almacenado en las áreas urbanas de los Estados Unidos es estimada en 643 millones de

toneladas y la cantidad de carbono secuestrada anualmente es estimada en 25.6 millones de toneladas.

Brack (2012) menciona que desde 1820, en Canberra (Australia), fueron eliminados gran cantidad de árboles como resultado de la expansión de áreas para pasturas con fines ganaderos, dejando algunos remanentes de bosque y algunas plantaciones dentro de las propiedades privadas. Con la selección de Canberra como la capital de Australia, extensas plantaciones forestales empezaron en 1911. Estas plantaciones han generado numerosos beneficios, incluyendo valores estéticos y la disminución de eventos climáticos extremos. Actualmente, sin embargo, se ha considerado que los beneficios pueden superar la mitigación de la contaminación y el secuestro de carbono. La investigación realizada por Brack analiza el valor de un bosque urbano en Canberra con particular interés en la mitigación de la contaminación y secuestro de carbono. Para ello se utilizó un inventario forestal y un sistema de soporte para decisiones (DISMUT) desarrollado para asistir en el manejo de aproximadamente 40 000 árboles plantados en Canberra. Se estimó que los árboles plantados tienen un valor combinado que incluye la reducción de la energía, mitigación de la contaminación y secuestro de carbono, dicho valor es de US\$ 20-67 millones durante el periodo 2008-2012

Krisdianto et al (2012) Los beneficios de los árboles en áreas urbanas en la ciudad de Bamjarbaru (Indonesia) fueron investigadas durante la estación seca del 2011. Aproximadamente 19 ha de áreas verdes homogéneas con 3770 árboles de *Pinus merkusii*, fue estudiada con el objeto de evaluar la biomasa, el almacén de carbono, el secuestro de carbono y la reducción de la incomodidad térmica. La biomasa de 404 sobre el suelo (en estado fresco y seco) de 404 árboles, fue calculada usando ecuaciones alométrica en base al diámetro a la altura del pecho (DAP). El secuestro y almacenamiento de carbono fue calculado como una porción del carbono total, considerando el factor de crecimiento del pino. Estos resultados fueron complementados con el cálculo del

balance entre CO₂ y O₂ producidos en la fotosíntesis. Los resultados revelan que el diámetro de los árboles distribuidos en 9 clases, con un intervalo aproximado entre 35.5-41.4 cm y 41.5-47.4 cm y de otros distribuidos de 23.9 a 76.4 cm. La biomasa consistió en 0.032 Gg/ha de carbono total y de 0.025 Gg/ha de carbono almacenado. Asimismo, se encontró 2 216 915 toneladas o 883.441 kg/ha de CO₂ y 21 134.064 t/año de carbono secuestrado. Asimismo, la población se puede beneficiar de la emisión de oxígeno del proceso de fotosíntesis en una cantidad de 56 357.505 t/año, lo cual es suficiente para suplir las necesidades de cerca del 5% de la población local. La plantación de pino provee de un efecto de enfriamiento al reducir el Índice de Temperatura-Humedad de 6° a 7° de un valor exterior de 32°C. Así el estudio concluye que la plantación de pino en la ciudad de Bamjarbaru es efectiva en mitigar los efectos del cambio climático y situaciones de extremo calor.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 *Cambio Climático*

En 1992 durante la Conferencia de las Naciones Unidas para el Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), ciento sesenta y cinco países firmaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), buscando la reducción de GEI en la atmósfera. Este convenio entró en vigencia el 21 de marzo de 1994 y hasta 2014 son 194 países los que han firmado (ONU 2014).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) define el cambio climático como el “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Artículo 1.2) Del mismo modo la CMCC hace una distinción entre "cambio climático", el cual es atribuido a actividades humanas que alteran la

composición de la atmósfera, y "variabilidad del clima", atribuido a causas naturales (IPCC 2001).

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático-IPCC (2001) señala que los agentes principales en el cambio climático son: el aumento en las emisiones de GEI y de aerosoles, así como las variaciones en la actividad solar las cuales podrían variar el balance de radiación de la Tierra y por ende del clima.

El cambio climático, en los últimos años, ha cobrado importancia y es uno de los asuntos primordiales y de gran preocupación para la población a nivel mundial. Según la Organización Meteorológica Mundial (2014), para el año 2013 se reportó que la cantidad de CO₂ en la atmósfera se había incrementado de 280 ppm en los años 1750 a 397 ppm en el año 2013, y que el incremento del 2012 al 2013 fue de 2.9 ppm. Si este incremento continúa, los impactos serán cada vez más mayores para el cambio del clima, y como resultado un desbalance en el sistema (IPCC 2007).

El dióxido de carbono es un GEI, de particular interés pues actividades antropogénicas primarias como el consumo de combustible fósil, y el cambio de uso de la tierra a través de la deforestación, tienen influencia en sus niveles de concentración en la atmósfera (IPCC 2007; UNCC 2007). El IPCC identificó opciones viables para la captura y almacenamiento de CO₂ para mitigar los niveles de CO₂ atmosférico. Una de ellas se relaciona a incrementar la capacidad de las fuentes biológicas de absorción de carbono. (IPCC, 2005).

Con el fin de reducir las emisiones colectivas de los gases que causan el cambio climático y el efecto invernadero, los países industrializados y los países en vías de transición acogen el Protocolo de Kioto (acuerdo jurídicamente vinculante) en el marco de la CMNUCC (Comunidad Andina de Naciones 2007).

Eguren (2004), señala que los países firmantes del Protocolo de Kyoto, tienen el compromiso de reducir su emisión de gases de efecto invernadero por debajo de los niveles de emisión de 1990 (al menos hasta 5.2%), durante el periodo 2008-2012 y con objetivos específicos que varían entre los países. Asimismo, el protocolo permitió que se generen tres mecanismos para que los países firmantes puedan lograr sus metas nacionales:

- El comercio de emisiones entre países desarrollados
- El mecanismo de Implementación Conjunta,
- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

En el caso de países en vías de desarrollo como el Perú, el Protocolo no establece compromisos de reducción para los países en vías de desarrollo, ya que las prioridades para estos países están orientadas al desarrollo económico y social, la erradicación de la pobreza y la adaptación de los sistemas al cambio climático. Sin embargo, tenemos la responsabilidad de reportar las emisiones de nuestro país y las medidas previstas para mitigarlas. En el caso de los países industrializados, de los que se sabe son los mayores generadores de emisiones, sí se establece compromisos de reducción.

2.2.2. Gases de efecto invernadero (GEI)

El IPCC (2013) identifica a los gases de efecto invernadero como “componentes gaseosos de la atmósfera, que pueden ser de origen natural o antrópico, y que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la atmósfera, la superficie de la Tierra y por las nubes”. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero primarios presentes en la atmósfera son el metano (CH₄), el dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), y el ozono (O₃).

De acuerdo a la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, 2020), el dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro que es liberado a la atmósfera por medio de la quema de hidrocarburos, cambios en el uso del suelo y algunas actividades industriales. El dióxido de carbono es secuestrado o “capturado” de la atmósfera cuando lo absorben las plantas como parte del proceso de fotosíntesis.

Sobre el gas metano (CH_4), la EPA (2020) indica que este gas es emitido a la atmósfera durante la fabricación y traslado de carbón, gas natural y petróleo. Asimismo, puede ser emitido en las prácticas ganaderas y agrícolas y en los rellenos sanitarios debido a la descomposición de residuos sólidos.

Otro gas de efecto invernadero es el óxido nitroso (N_2O), el cual es emitido por el uso de fertilizantes en la agricultura, en la combustión de hidrocarburos y residuos sólidos (quema de carbón y biomasa) y también en las aguas residuales producidas en las actividades ganaderas (EPA 2020).

Los gases fluorados son gases de efecto invernadero creados por el hombre que son utilizados en un sinnúmero de aplicaciones como refrigerantes, aerosoles, solventes, equipos de calefacción y en espumas. Son gases usualmente emitidos en pequeñas cantidades, pero de gran contribución en el calentamiento global (EPA 2020).

2.2.3. Consecuencias del cambio climático

La amenaza del cambio climático es un tema pendiente para la sociedad en el siglo 21. Aunque se sabe que las fluctuaciones del clima de la tierra ocurren naturalmente, en la actualidad son las actividades humanas las que constituyen la principal causa del incremento de los GEI (IPCC, 2007; UNCCC, 2007). Los cambios

observados en la temperatura, variación en los regímenes de lluvia, salinidad en el océano y ocurrencia de eventos climáticos extremos son ejemplos de que el clima en la tierra ha empezado a cambiar (IPCC, 2007; UNCCC, 2007).

Estudios desarrollados por el **IPCC** analizaron diferentes escenarios de emisiones y los resultados de los estudios señalan que la temperatura en la superficie se mantendrá al incremento a lo largo del siglo XXI. Siendo presumible la ocurrencia más frecuente y de mayor duración de olas de calor. Asimismo, indican que las precipitaciones serían alteradas, con eventos más fuertes y de mayor frecuencia en muchas regiones. Asimismo, indican que estas variaciones en los regímenes de lluvias no serán uniformes, señalando que, en las latitudes altas, en el océano Pacífico ecuatorial, y en regiones húmedas de latitud media se experimente un aumento en la precipitación media anual, y que la precipitación promedio disminuiría en muchas zonas subtropicales y de latitud media (IPCC 2014).

Otro impacto del cambio climático sería en el incremento de la temperatura y del nivel del mar, el cual continuará calentándose durante el presente siglo, siendo este calentamiento más importante en la en las regiones tropicales y en las regiones subtropicales del hemisferio norte. El incremento en el nivel del mar se daría en un ritmo más rápido para el periodo 2081-20100, y que esta elevación no sería uniforme entre las regiones. Estos estudios señalan también, que alrededor del 70% de las costas a nivel mundial experimentarían un cambio en el nivel del mar (IPCC 2010).

Las proyecciones del IPCC señalan que el incremento en la temperatura generaría derretimiento de los glaciares lo cual produciría una reducción global en su volumen, exceptuando los ubicados en la Antártida y Groenlandia (IPCC 2014).

2.2.4. Mercados de carbono

El comercio de bonos de carbono son esquemas por medio de los cuales se pueden negociar las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero, constituyendo una importante oportunidad de financiar proyectos de desarrollo que reduzcan los GEI y en el cual pueden participar los gobiernos, las empresas privadas o individuos (CeroCo2, 2008). Estos mercados incluyen el sistema regulado y el sistema voluntario.

Existen una serie de iniciativas y esfuerzos en marcha no solo para reducir las emisiones de carbono sino también para promover actividades orientadas al almacenamiento y captura de carbono. Lo cual ha convertido al carbono en una interesante alternativa generadora de negocios. Con la finalidad de facilitar el comercio de carbono se acordó utilizar una sola unidad de medida, para ello los GEI se transforman en CO₂ equivalentes (CO₂-eq), los cuales son comercializados en los mercados de carbono. La moneda utilizada son los créditos de carbono. (Seeberg-Elverfeldt 2010).

Según el Banco Mundial en su publicación anual “Estado y tendencia del Mercado de carbono 2012”, citado por (Nova 2012) señala que el mercado mundial de carbono alcanzo sus valores más altos el 2011, con 176 billones de dólares negociados (Figura 1), señalando que el mercado de carbono es una inversión interesante y de rápido auge, dado que hace más de 10 años no existía en el mercado.

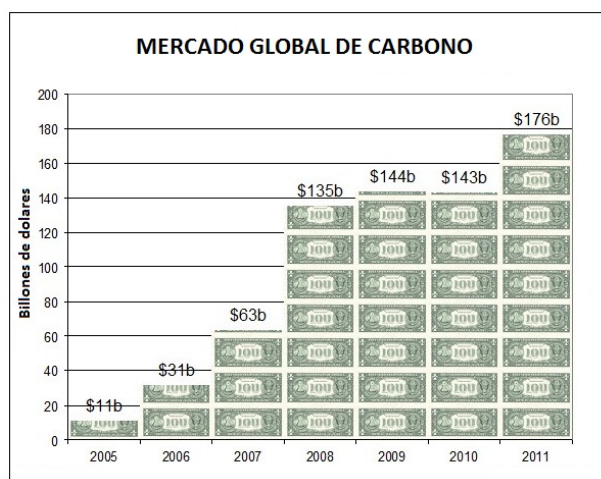


Figura 1. Mercado global de carbono. Fuente. Joanne Nova.com.au (2012)

Para hacer realidad las estrategias de negociaciones de créditos de carbono para la mitigación del cambio climático, a través de proyectos en el sector forestal es de importancia cuantificar y analizar el carbono contenido particularmente en el estrato de la biomasa sobre el suelo. En ese sentido, los modelos de biomasa son las de uso más común cuando se quiere estimar tanto el almacenamiento como el secuestro de carbono en los bosques, y como consecuencia son las más adoptadas en la mayoría de las investigaciones (Higuchi, 1998, citado por Gonzales 2008, p.9).

En el mercado de carbono se diferencian dos tipos de comercio: el que surge del cumplimiento mandatorio o regulado y los mercados voluntarios. El del cumplimiento regulado es empleado por países o empresas que necesitan reducir sus emisiones y deben rendir cuentas de las mismas. Por lo tanto, este tipo de mercado se encuentra bajo regulaciones obligatorias (que pueden ser nacionales o internacionales) de disminución de las emisiones de dióxido de carbono. En el caso del mercado voluntario el mercado de bonos de carbono es facultativo. Ambos mercados difieren significativamente en las dimensiones de comercio (Hamilton *et al.*, 2009 citado por Seeberg-Elverfeldt 2010, p.5).

Eguren (2004) indica que el propósito del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es apoyar a los países a adecuarse a sus compromisos de disminución de gases de efecto invernadero y ayudar a los países en desarrollo a lograr un desarrollo sostenible, a través de la implementación de proyectos de inversión en los que se ponen en venta “Certificados de Emisiones Reducidas” (CER’s) mitigando la emisión o secuestro de los GEI de la atmósfera.

El Fondo Nacional del Ambiente -FONAM- (2016) refiere que el MDL tiene como objetivos principales: Ayudar a los países desarrollados considerados en el Anexo I, del Protocolo de Kioto, a cumplir sus metas de reducción de emisiones de GEI; y apoyar a los países en desarrollo en la transferencia tecnológica y fomentar el desarrollo sostenible. El Perú es un país que ha ratificado su firma en el protocolo de Kioto y por ende se puede ver beneficiado por la implementación de esta estrategia.

Los mercados voluntarios de carbono fueron creados fuera de los esquemas regulatorios para que las empresas o individuos voluntariamente puedan adquirir bonos de carbón con la finalidad de reducir sus emisiones de GEI, sin tener estas empresas compromisos de reducción, sino más bien para mejorar su imagen o para reducir su huella de carbono. (Bellasen et al., citado por Guigon 2010)

En este tipo de mercado, los créditos de carbono son conocidos como Reducción Verificada de las Emisiones, las cuales equivalen a las CERs (certificados de reducción de emisiones) en el MDL. Para proyectos a pequeña escala de agricultura, forestación y cambio de uso de suelo (AFOLU por sus siglas en inglés) en países en desarrollo, el mercado voluntario es más atractivo ya que el mercado regulado (MDL) es mucho más complejo en el registro de los proyectos, especialmente los del sector AFOLU y por ende menos atractivos que los del mercado voluntario (FAO 2020).

2.2.5. *Ecosistemas forestales como opción para la mitigación de emisiones de dióxido de carbono*

De acuerdo con Rojo, Jasso y Velásquez (2003) el dióxido de carbono capturado por las plantas es su única fuente de carbono, el cual es incorporado luego en sus tejidos, en forma de azúcares, a través del proceso de fotosíntesis. Según Hoen y Solberg (1994) citados por Rojo, Jasso y Velásquez (2003), la producción forestal influye en el flujo del carbono hacia la atmósfera por medio de la fijación y la emisión. La fijación de carbono representa el incremento de la biomasa en árboles mediante la fotosíntesis, y en el caso de la emisión esta representa la descomposición de la biomasa.

Los tejidos vivos están compuestos esencialmente de carbono, de tal forma que el balance entre la producción primaria y descomposición determina el almacén de carbono a nivel global (Schlesinger 1997 citado por Dawidson y Nilsson 2000). Las plantas y algas usan energía solar y a través de sus procesos fotosintéticos convierten el dióxido de carbono de la atmósfera en carbohidratos: $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$ (1). Dawidson y Nilsson (2000) indican que en promedio la contribución del carbono en el tejido vegetal es relativamente constante oscilando entre 45 a 50%.

Según Brown y Lugo (1980) los bosques tropicales han sido considerados de importancia pues influyen en el equilibrio del carbono almacenando y liberando grandes cantidades de carbono, por medio de la respiración. Los mismos autores señalan que los bosques liberan carbono debido a las actividades humanas, como la extracción de la madera, y el cambio de uso de suelo a través de la roza y quema de los bosques.

Moura-Costa (2001) indica que el secuestro de carbono que ocurre en las plantas se fundamenta en que durante la fotosíntesis las plantas captan dióxido de carbono de la atmósfera y lo emplean para elaborar compuestos necesarios (azúcares) para su crecimiento y que son

almacenados en la estructura de la planta, pero también liberados como CO₂, CO y metano al momento de la descomposición. Asimismo, el autor, indica que las iniciativas orientadas a reducir los GEI de la atmósfera serían igual de efectivas en el caso de realizarse cerca de los puntos de emisión o si se realizaran en un extremo opuesto debido a que el CO₂ es un gas que se propaga a nivel global. De otro lado, Moura-Costa también señala que las actividades forestales secuestran carbono, y que esta captura estaría basada en el incremento de la biomasa en la vegetación y que cualquier actividad que modifique la cantidad de biomasa determina su capacidad de almacenar carbono.

Los árboles capturan el CO₂ del ambiente que los rodea, a través del proceso de fotosíntesis, generándose azúcares, que participan en el desarrollo de las diferentes estructuras del árbol (flores, frutos, follaje, ramas y fuste), los cuales proporcionan los elementos necesarios para su crecimiento en altura y diámetro. El carbono se deposita primordialmente en el leño de los árboles y ramas principales, pero también en el follaje, tallos, y sistemas radiculares. Estos componentes cuando se descomponen devuelven nutrientes al suelo y paralelamente emiten dióxido de carbono. Se puede decir entonces que "los bosques son considerados importantes reguladores en el nivel de carbono atmosférico" (Hipkins 1984, Ordoñez 1998, citado por Gonzales 2008, p.8)

2.2.6. Potencial de captura de carbono en áreas verdes

Si bien pueden existir un sinnúmero de beneficios que nos provee el arbolado urbano en áreas verdes, se ha elegido el listado desarrollado por Walsh (2012):

a) **Beneficios ambientales:** Mejora de la calidad del aire y agua, reducción de los niveles de contaminación a través de la deposición seca (acumulación de polvo u otros en las estructuras vegetales- tallo, hojas, flores o frutos) e indirectamente a través de una disminución en

el consumo energético al regular la temperatura. Además, promueve la biodiversidad en áreas urbanas.

b) **Beneficios sociales:** Si bien son difíciles de evaluar y cuantificar. Las áreas verdes proveen muchas oportunidades para la recreación, descanso y relajación para los residentes de las ciudades, adicionalmente de la conexión que sienten las personas con los ambientes naturales. Ulrich (1984; 1986) indica que la presencia del arbolado urbano en ciudades contribuye a la salud de las personas a nivel emocional y fisiológico reduciendo el estrés y la ansiedad.

c) **Beneficios económicos:** Relacionado al ahorro económico al reducirse el consumo energético en instalaciones. El arbolado urbano reduce la demanda por calefacción y aire acondicionado ya que regula el microclima local. Asimismo, disminuye los costos asociados a las emisiones producidas en la generación de energía. Adicionalmente la presencia de áreas verdes incrementa el valor de los bienes inmuebles alrededor de ellas.

De acuerdo con Nowak (1994) considerando las dimensiones y el volumen de biomasa existente, los bosques naturales tienen gran aptitud para almacenar carbono en comparación con otros tipos de vegetación. A pesar que el arbolado presente en las ciudades no alcanza los niveles de almacenamiento de carbono por parte de los bosques naturales, debido a la baja densidad de árboles por superficie, los “bosques urbanos” tienen un papel importante en la reducción/captura del dióxido de carbono, al remover este gas de la atmósfera y almacenándolo en sus estructuras.

Muchas ciudades ya han reconocido el importante papel que juega el arbolado urbano en la remoción de dióxido de carbono, en ese sentido han iniciado labores de mantenimiento y plantación de árboles para combatir el cambio climático. Es el caso de varias ciudades en Estados Unidos, donde se vienen implementando estrategias para reducir las concentraciones de los GEI por medio del incremento de las

plantaciones de árboles en las ciudades como es el caso de Nueva York Portland, Pittsburgh, Baltimore entre otras. Asimismo, el año 2013 la ciudad de Portland valorizó los servicios ambientales que brinda el arbolado urbano (Figura 2), obteniendo que por cada árbol que planta la ciudad obtiene un beneficio de 3.8\$, recuperando la inversión dedicada a la plantación (Daigneau 2013).

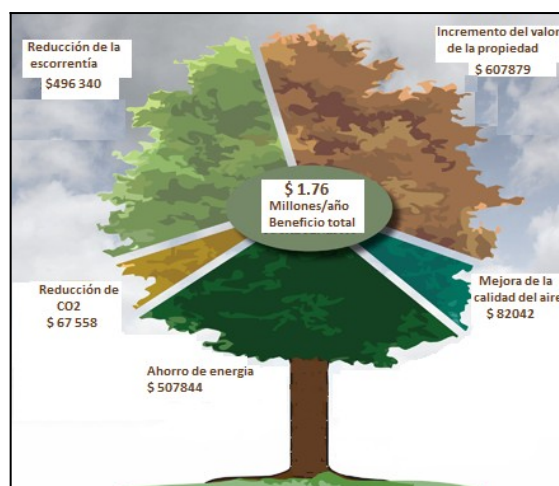


Figura 2. Beneficios económicos del arbolado urbano. Fuente. Daigneau (2013)

La cantidad de carbono capturado por el arbolado urbano varía dependiendo de muchos factores, (dimensiones, estado fitosanitario, edad entre otros), según Ferrini y Fini (2011) la cantidad capturada es de aproximadamente 18 Kg CO₂/año/por árbol, y este beneficio corresponde al provisto por 3 a 5 árboles en el bosque natural de similares dimensiones y estado fitosanitario, asimismo los arboles en zonas urbanas son capaces de capturar una mayor cantidad de material particulado que los árboles ubicados lejos de las ciudades (Beckett et al., 2000 citado por Ferrini y Fini 2011).

En vista que las áreas urbanas están generalmente incrementándose en dimensión, el almacenamiento de carbón por parte del arbolado urbano será cada vez más relevante. De otro lado la eliminación de la vegetación a expensas del crecimiento urbano determinará al final si existe una ganancia o pérdida por Ha en el almacenamiento de carbono en las ciudades.

Según Gann (2003) Muchas de las especies presentes en áreas verdes son especies introducidas, por tanto, las cantidades de carbono calculadas para estas especies usando modelos generalizados, pueden ser sobre o subestimadas. Si no se usa modelos específicos para cada especie, la cantidad de biomasa y carbono estimado con ecuaciones alométricas basadas en bosques naturales difiere de la cantidad real para áreas urbanas. Para áreas donde se tenga información completa de inventario del arbolado urbano, es posible utilizarla para el desarrollo de parámetros específicos para cada especie de tal manera que se cuente con estimadores más precisos además de corregir la sobre o subestimación de los datos para la determinación del carbono.

En relación al contenido de carbono contenido en la biomasa forestal, Slijepcevic (2001) señala que aproximadamente el contenido de carbono almacenado en las plantas corresponde al 50% de su biomasa. Del mismo modo el IPCC (1996) indica también, que los valores más citados para la cantidad de carbono en la biomasa van de 43 a 58%. Asimismo, Francis (2000) encuentra que previos estudios sugieren la variabilidad del contenido de carbono y que esta difiere según la especie y tejido del árbol. Al respecto, Cubero y Rojas (1999) encontraron que la calidad de sitio y la edad de los árboles afectaban el contenido de carbono en plantaciones forestales. Estos autores encontraron que el contenido de carbono varía, y para el caso de la especie estudiada *Gmelina arborea*, esta variación va entre 32 y 40%, para el caso de la especie *Tectona grandis* esta variación fluctuaba entre 32 a 36% y para *Bombacopsis quinata* la variación encontrada se encuentra entre 33 y 36%.

2.2.6.1. Almacenamiento y secuestro de carbono

El secuestro de carbono se refiere a la tasa a la cual el carbón es almacenado como biomasa durante un año (Mc Pherson y Simpson 1999), mientras el carbono almacenado es la cantidad total de carbono

presente en la biomasa del árbol en un punto en el tiempo (McPherson 1998; Nowak et al., 2002).

Los árboles aminoran la cantidad de carbono presente en la atmósfera mediante su secuestro y almacenamiento en sus tejidos. La cantidad de carbono anualmente secuestrado se incrementa cuanto mayor es el diámetro y el estado de salud de los árboles. Según Nowak et al. (2007), la cantidad de carbono secuestrado por el arbolado en la ciudad de Nueva York era de 42300 toneladas de carbono por año con un valor estimado en \$779000.

El cambio climático puede ser atenuado por la captura y almacenamiento de carbono, de esta forma se puede considerar que los bosques pueden influenciar de forma positiva el cambio climático. Mientras los árboles crecen almacenan carbono acumulándolos en sus tejidos. Mientras que cuando mueren y se pudren liberan a la atmósfera gran parte del carbono que habían almacenado en sus tejidos. Así el almacenamiento de carbono es un indicador de la cantidad de carbono que puede ser liberado a la atmósfera si el árbol muere y se descompone. Se estima que los árboles en la ciudad de New York almacenan 1.35 millones de toneladas de carbono (valuado en \$24.9 millones).

2.2.7. *Cuantificación de la biomasa forestal*

Schlegel et al. (2002) define a la biomasa forestal como “el peso de la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal”, conteniendo a la biomasa por encima del suelo y a la biomasa del sistema radicular, la biomasa total es usualmente calculada en toneladas de peso (húmedo o seco) por hectárea.

Las evaluaciones de biomasa ilustran la cantidad de carbono que puede ser secuestrado por los árboles de ahí que constituye un indicador importante y el primer paso en la cuantificación de carbono. Según Merino et al. (2003), en base a la cuantificación de la biomasa

se puede estimar la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas forestales y, en consecuencia, en el caso de que la vegetación sea cortada y quemada se puede estimar la cantidad de CO₂ que se emite a la atmósfera.

El IPCC (2000) señala, que las variaciones en el stock de carbono en los ecosistemas forestales pueden ser calculadas usando una serie de mediciones obtenidas directamente de los datos de censos e inventarios forestales, análisis estadísticos, técnicas de sensores remotos y muestreo de suelos, los cuales varían según la escala utilizada, el nivel de precisión deseado, la facilidad en la verificación y los costos asociados a las mediciones. Los costos de medición de la variación en los stocks de carbono y de las emisiones netas de GEI, para un área determinada, aumentan en forma proporcional a la precisión deseada y a la heterogeneidad del paisaje.

Gayoso et al. (2002) en relación a la biomasa en los componentes estructurales del árbol, indica que, el tronco del árbol representa entre 55 y 77% de la biomasa total del árbol, siendo el componente con la más importante porción de biomasa si se le compara con las ramas, cuya biomasa fluctúa entre 5 a 37% y con las hojas y la corteza que varían entre 1 y 15% y 4 a 16% respectivamente. Asimismo, señala que la edad es un elemento importante que contribuye a la variación porcentual en la cantidad total de la biomasa del rodal y que la contribución porcentual de los componentes del árbol en la biomasa total varía notablemente dependiendo de factores como la edad del árbol, la especie, el sitio, y el tratamiento silvicultural.

En la evaluación de la contribución de los bosques (naturales o artificiales) en el ciclo del carbono, una de las primeras etapas a considerar es el cálculo de la biomasa (aérea y bajo el suelo).

Rügnitz et al (2009) señalan que, para estimar la cantidad de biomasa sobre el suelo, se pueden utilizar dos métodos: el directo (destructivo)

y el indirecto. El método directo consiste en cortar uno o más árboles, pesar en verde cada componente, luego determinar su biomasa a partir de estos datos y extrapolar los resultados para el área total, y a partir de eso construir ecuaciones alométricas y factores de expansión de la biomasa. En el caso del método indirecto este consiste en determinar la cantidad de biomasa a partir de ecuaciones o factores de expansión ya existentes a partir de variables de fácil medición del árbol y obtenidas en campo, como diámetro y altura del árbol, de forma que no sea necesario cortar los árboles para cuantificar la biomasa. Estas ecuaciones son obtenidas utilizando el análisis de regresión.

I.- Método destructivo (método directo)

De acuerdo a Lu (2006) y Brown et al. (1989), la medición de la cantidad de biomasa aérea requiere la aplicación del método destructivo, el cual consiste en determinar el peso seco de los árboles para lo cual se les corta, separa y pesa cada componente del árbol, con lo cual se consigue un valor más preciso de la biomasa. Adicionalmente, Gayoso et al. (2002) señala que este procedimiento posibilita generar relaciones funcionales entre la biomasa y variables obtenidas en los inventarios forestales como el diámetro a la altura del pecho, altura comercial, altura total y otras. De otro lado, Brown, 1997 Gayoso et al., 2002, Lu, 2006 indican, sin embargo, que las limitantes del método en cuestión son los elevados costos que presentan en cuanto al tiempo de duración de los estudios, los recursos económicos empleados, y también la misma eliminación de los árboles empleados en la investigación.

Por su parte, Losi et al 2003 y Montagu et al 2005, coinciden en señalar que la medición de biomasa con el método destructivo o método directo, es considerado el método más preciso y consiste en cortar árboles en número apropiado y estimar el peso húmedo y peso seco de los mismos.

II.- Método no destructivo (método indirecto)

a) Método tradicional. - Brown (1997) indica que el método tradicional o método del factor de expansión, es un método indirecto, que es utilizado para la medición de biomasa, y consiste en emplear datos del volumen comercial de los árboles (a partir de datos comúnmente obtenidos en inventarios forestales), densidad básica de la madera y el factor de expansión de la biomasa (FEB). Este método puede utilizarse en bosques tropicales (de climas húmedos y semiáridos) densos, secundarios o maduros. El mismo autor señala que se puede utilizar la siguiente ecuación general para la determinación de la biomasa:

$$BA = VC * D * FEB$$

Donde:

BA = Biomasa aérea (t/ha)

VC = Volumen comercial (m³)

D = Densidad básica de la madera (t/m³)

FEB = Factor de expansión de la biomasa

El método es aplicado, por ejemplo, cuando no existe los datos pormenorizados de un inventario forestal que incluyan variables de cada individuo, y en su lugar solo se tienen valores totales de volúmenes comerciales. (Brown *et al* 1989).

b) Método de medición de biomasa usando sensores remotos. - El sensoramiento remoto es una fuente eficiente de información para el inventario y monitoreo de bosques, incluyendo para la estimación de parámetros. Sin embargo, existen errores derivados de la resolución espacial que conllevan un desajuste entre las clases espectrales e informacionales (Pekkarinen 2002), lo cual puede generar errores en la identificación de áreas con o sin bosque.

Las imágenes satelitales son utilizadas para hacer una representación visual de la superficie terrestre, permitiendo generar información de extensas áreas geográficas siendo capaces de detectar, reconocer e identificar diferentes problemáticas relacionadas al clima y a la naturaleza, como por ejemplo en el caso de la identificación de los diferentes materiales físicos que cubren la superficie de la tierra, y de la misma manera es posible evaluar una serie de propiedades biofísicas, brindando muchos beneficios si se les compara con métodos de medición directa, los cuales precisan de mediciones en campo que pueden ser difíciles de implementar a gran escala, debido a limitantes en el acceso al elemento a medir, el tiempo y la falta de recursos (Peña, 2007).

De acuerdo a Beaudoin et al. (1994) los datos obtenidos por las imágenes satelitales permiten generar información a escala mundial, con la cual se puede comprender mejor la situación y la dinámica de los ecosistemas forestales asimismo de su interacción con los ciclos globales del carbono y el clima. Beaudoin et al. (1994) indica también que, tanto a nivel regional como local, conocer la cantidad de biomasa puede ser de utilidad para detectar cambios en la cobertura vegetal, así como para la realización de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, los que deben ser realizados en el marco del Protocolo de Kioto por los países que lo ratificaron, como es el caso del Perú.

c) Modelos alométricos. - Los métodos indirectos pueden ser usados para predecir la biomasa a partir de variables que sean sencillos de medir como el diámetro y la altura, para ello se desarrollan ecuaciones alométricas que relacionan variables biofísicas con la biomasa del árbol (Zianis y Mencuccini, 2003).

2.2.7. *Estimación de biomasa mediante modelos alométricos*

La estimación de la cantidad de biomasa de un ecosistema se puede realizar mediante técnicas destructivas (“directas”) o mediante estimaciones indirectas de la biomasa a partir de mediciones de variables dasométricas, como el diámetro, y a partir de las cuales se puede inferir la cantidad de biomasa presente. El segundo caso es el más conveniente cuando no se tienen datos específicos o cuando no es posible usar el método destructivo (corta de árboles) (Brown et al., 1989; Acosta et al., 2002). Asimismo, Acosta et al., (2002) señala además que, se debe considerar modelos matemáticos que calculen la biomasa total del árbol considerando su tamaño y dimensiones; es decir modelos que consideren las relaciones alométricas que existen entre los componentes de los árboles. Por su parte Gayoso et al. (2002) indican que estos modelos son largamente usados en el campo forestal, porque son bastante flexibles, ya que se puede estimar la biomasa por medio de la medición de variables sencillas de medir como el diámetro a la altura del pecho (dap), altura comercial (hc), altura total (ht) y combinaciones entre ellas.

La alometría es un método indirecto o “no destructivo” que se fundamenta en el desarrollo de ecuaciones que relacionan variables como el diámetro y la altura con la biomasa. Estas ecuaciones alométricas posibilitan entre otras cosas la estimación de la cantidad de biomasa de un cultivo o de un bosque natural. La alometría se ha utilizado particularmente en el sector forestal en investigaciones para la estimación de la fijación biológica de carbono a nivel mundial (Ares *et al.* 2002).

En el caso de la variable que ofrece mayor facilidad en la medición, es el diámetro del fuste (medido como diámetro a la altura del pecho), y en la mayor parte de los estudios ejecutados en zonas tropicales y en zonas templadas, se observó que el diámetro medido a 1.20 m del suelo, era la variable explicativa que describe, apropiadamente la cantidad de biomasa de un árbol (Overman et al., 1994; Regina, 2000; Chave et al., 2001). En ese sentido el desarrollo la alometría de árboles a través de las ecuaciones de biomasa, permite mejorar la

confiabilidad en las estimaciones de la cantidad de biomasa y carbono almacenado en el bosque o ecosistema forestal (Zianis y Mencuccini, 2003).

Jenkins et al (2003) indican que las ecuaciones generales de biomasa, basadas solo en el diámetro a la altura del pecho no son precisas, pero sirven como referencia para orientar las políticas de GEI y son adecuadas en casos de evaluación de almacenamiento y secuestro de carbono a escalas regionales y nacionales. Nowak (1994) indica que las ecuaciones de biomasa derivadas de bosques naturales, sobrestiman la cantidad de biomasa presente en el arbolado urbano a razón de 1.25. Al mismo tiempo en algunos casos los árboles, presentes en áreas urbanas, y manejados de forma óptima, pueden contener más carbono que aquellos que crecen en rodales naturales. Razón por la cual es necesaria mayor investigación para el desarrollo y ensayo de ecuaciones alométricas para áreas urbanas.

Según Gayoso et al. (2002) en la literatura es bastante común emplear la función logarítmica para el cálculo de la biomasa, no obstante, como lo apunta Brown et al (1989) su uso es recomendable para corregir la varianza de “y” con respecto al parámetro alfa asociado a su coeficiente. De otro lado como lo señalan Alvarez (2008); Gujarati y Porter, (2010); Gayoso et al, (2002) la función exponencial genera estimaciones de la cantidad de biomasa, parecidas a las que se generan cuando se emplean las ecuaciones linealizadas, que aunque presenten errores de estimación, estas pueden ser corregidas al emplear una transformación de variables, logrando obtener mayor homogeneidad en la estructura de los errores sin alterar la estructura del modelo

2.2.8. *Criterios para la selección de modelos*

Con el objeto de identificar el modelo de biomasa que más se ajuste a los datos es importante considerar elementos de decisión de los análisis de regresión como la significancia de los parámetros

evaluados, el coeficiente de determinación (R^2), y el Cuadrado Medio del Error (CME). Álvarez (2008) señala que criterios de bondad de ajuste como el de Akaike (AIC) y el de Schwarz (BIC) pueden ser empleados para comparar modelos ajustados. De otro lado en el caso de que se necesite contrastar modelos con y sin transformación de variables, como es el caso de los modelos logarítmicos es posible utilizar el Índice de Furnival (IF). Otro elemento importante a considerar es la validación de modelos para lo cual se debe tener en cuenta a las pruebas de supuestos como el test de normalidad y homogeneidad de varianzas (Chatterjee y Price 1991, InfoStat 2008 citados por Gonzales 2008, p.12).

Según Andrade y Segura (2008), la información que se emplea, en los análisis de regresión, para determinación de la cantidad de biomasa deben satisfacer los supuestos del modelo de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Si no se satisfacen los supuestos, entonces se pueden transformar las variables usando logaritmos (naturales y en base 10). Para la selección de las variables explicativas o regresoras estas se deben seleccionar considerando el valor más alto en el coeficiente de correlación de Pearson (r), en el cual los valores de 1 y -1 indican una perfecta correlación lineal ya sea positiva o negativa o una perfecta relación funcional entre las dos variables.

Para la elección del modelo más adecuado para los datos, es recomendable que los datos presenten un alto coeficiente de Pearson. El Error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME) asimismo es otra medida de bondad de ajuste y se busca el menor valor posible. Sin embargo, si se desea comparar entre modelos con variables transformadas y sin transformar, o si se requiere comparar entre los valores estimados y observados en la medición de los árboles, es recomendable emplear otros indicadores, como el Índice de Furnival (IF) (Picard et al 2012; Segura y Andrade 2008; Barrena et al 1985)

El índice de Furnival (IF) es muy utilizado para comprar entre modelos que no tienen la misma variable explicada (Barrena et al 1985), en esta situación no se puede comparar entre modelos usando los criterios de información de Akaike (AIC) o el de Schwarz (BIC). Picard et al. (2012) menciona que aquél modelo con el menor valor de IF será considerado como el modelo que mejor se adecúe a los datos. El mismo autor señala que el modelo logarítmico es el más frecuentemente usado para la transformación de variables y cuya fórmula es descrita a continuación:

$$IF = e^{6.6} \times RCME$$

Donde:

Bi= Biomasa del i-esimo árbol medido

RCMR= Raíz cuadrado medio del error o desviación estándar residual

2.2.9. Descripción de las especies estudiadas

2.2.9.1 Descripción de “huaranguay”

Familia botánica: Bignoniácea

Nombre científico: *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*

Nombres comunes: Huaranhuay, huaroma, carhuaquero

a) Descripción botánica. - Reynel y Marcelo (2009) describen a los árboles de *Tecoma stans* como árboles de tamaño pequeño (4-10 m) y de copa globosa. En relación al follaje, este presenta hojas compuestas y opuestas. En cuanto a las flores, estas se agrupan en racimos cada uno de ellos con varias flores amarillas, tubulares y vistosas que miden entre 4 cm a 5 cm. Los frutos son alargados, y se abren por dos valvas en el cual se encuentran semillas aladas.

b) Distribución y hábitat. - La especie de *Tecoma stans* se encuentra distribuida en los países de Bolivia, Ecuador y Perú. Como especie domesticada, su distribución incluye la región costa y también la selva baja y de forma natural se le encuentra en la sierra. El rango de altitud en el que se le encuentra a la especie oscila entre los 100 y los 3 500 msnm, en formaciones de bosque seco (en la sierra y ceja de selva) (Reynel y Marcelo 2009).

c) Usos. - En cuanto a los usos los mismos autores señalan que el árbol de esta especie puede ser empleado en:

- Como combustible (leña) y también se emplea en trabajos de carpintería y ebanistería.
- De uso ornamental por su fácil propagación pocos requerimientos de agua y suelo y sus flores vistosas de color amarillo.



(a)

(b)

Figura 3. Tecoma stans (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans* (“*huaranguay*”). (a) Árbol de huaranguay. (b) Hojas, flores y fruto de Huaranguay. Fuente. Montesinos 2015

2.2.9.2 Descripción del “Molle”

Familia botánica: Anacardiácea

Nombre científico: *Schinus molle* L.

Nombre común: Molle andino

a) Descripción botánica. - Reynel y Marcelo (2009) describen a esta especie como un árbol de tamaño pequeño a median (alrededor de 3 a 5 m de altura). Presenta copa globosa y follaje siempre verde. El fuste suele ser muy robusto y con presencia de nudos. En cuanto a la corteza externa esta agrietada, de color marrón claro, con placas de corteza rectangulares que regularmente se desprenden solas. La corteza interna es de color rosado blanquecino. En relación al follaje, esta especie presenta hojas compuestas, alternas y pendulares (colgantes). En cuanto a sus flores estas son en racimos compuestos y cada racimo tiene numerosas flores pequeñas y de color blanco. En el caso de los frutos estos son globosos y rojizos de 4 mm a 5 mm diámetro y presentan un fuerte olor resinoso cuando son estrujados



Figura 4. Schinus molle L. (“*molle andino*”). (a) Árbol de molle (b) Hojas y fruto de molle. Fuente. www.elnougarden.com. (2015)

(a)

(b)

b) Distribución y hábitat. - Los mismos autores señalan que la especie presenta amplia distribución, siendo encontrada desde México, Venezuela, Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador y hasta Perú. El rango altitudinal para esta especie varía entre 200 y 3700 msnm y se le encuentra frecuentemente en formaciones de bosques periódicamente secos. La especie prefiere suelos profundos y arenosos y zonas cercanas a los cursos de agua.

c) Usos. - Reynel y Marcelo (2009) señalan que los usos más frecuentes para esta especie son:

- Carpintería ligera y cajonería porque su madera es liviana y blanquecina. Los frutos son alimento de muchas aves pequeñas.
- En la elaboración de embutidos, a partir de las semillas que son comercializadas y exportadas como pimienta roja.
- La especie es cultivada como cerco vivo alrededor de los predios agrícolas y de las viviendas rurales de la zona andina del centro y sur del Perú (Lima, Junín y Cusco). De esta manera, aparte de los beneficios directos, los cercos vivos ofrecen al poblador protección al cultivo ante, el viento y las heladas, además de protección de suelos.

2.2.8.3.- Descripción de “Grevilea”

Familia botánica: Proteaceae.

Nombre científico: *Grevillea robusta* A. Cunn ex R.Br.

Nombres comunes: Grevilea, roble australiano.

a) Descripción botánica

Esta especie puede alcanzar una altura de hasta 30 m de altura y es considerada la especie más grande dentro del género *Grevillea*. Se caracteriza por ser siempre verde, y de rápido crecimiento. En relación a las hojas estas son de color verde oscuro y brillante por delante y de un verde bien claro por detrás. Las flores son muy llamativas, de color anaranjado-rojizo, y producen abundante néctar ocurriendo el proceso de floración en primavera.

En cuanto a la corteza esta es de color clara hasta gris oscura, rugosa y gruesa con surcos profundos. Sus hojas son alternas, pinnadas compuestas (casi siempre bipinadas) divididas en lóbulos delgados finamente aserradas. El haz es de color verde brillante y glabro; el envés sedoso con pubescencia de color blanquecino o cenizo. En cuanto a las flores señalan que son en racimos sin ramificaciones que nacen, la mayoría, directamente del tronco y a lo largo de las ramillas por atrás y en la base de las hojas. Las flores son vistosas, amarillentas, numerosas y pareadas agrupadas en uno de los lados del eje que es rígido y delgado. Con respecto a los frutos estos son en folículos, ligeramente aplanados y negros. En cada fruto hay una o dos semillas elípticas, aplanadas y con un ala alrededor de la misma de color pardo (CATIE 1986).



(a)

(b)

Figura 5. *Grevillea robusta* A. Cunn ex R.Br. (“*grevilea*”): (a) Arbol de *grevilea*. (b) Flores (c) Hojas. Fuente. <http://www.jardinerosenaccion.es> (2015)

b) Distribución y hábitat. - Es nativa de las áreas costeras subtropicales del oriente australiano de Nueva Gales del Sur y Queensland, desde la costa hasta 160 km dentro del continente. En condiciones naturales vive entre 800 y 1000 msnm. En plantaciones, se le ha plantado en un amplio rango de altitudes, desde el nivel del mar hasta 2500 msn. La especie se adapta bien en diferentes tipos de suelos incluyendo suelos arenosos, francos de mediana fertilidad y ácidos. La especie prefiere suelos profundos ya que el sistema radicular tiende a ser profundo.

c) Usos.- La madera es medianamente densa y fácil de trabajar, aunque el aserrín puede provocar alergias en la piel. La madera se puede usar en carpintería, paneles, pisos y durmientes.

Se utiliza como árbol ornamental y como árbol de sombra en calles y carreteras. Las flores vistosas atraen a las abejas, las que producen miel de buena calidad, tiene posibilidades como cerco vivo.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

La presente investigación se realizó en el campo experimental II del Vivero Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en el distrito de La Molina, en el Departamento de Lima. Geográficamente se ubica a $12^{\circ} 05' 06''$ de Latitud sur y $76^{\circ} 75' 00''$ de Longitud oeste, y a una altitud de 238 m.s.n.m.(Chirinos 2005)



Figura 6. Localización del área de estudio. Fuente. Begazo 2015

3.2. Características del área de estudio

El clima del distrito de La Molina es por lo general templado, con temperaturas mínimas mensuales promedio de 16.2°C y máximas de 22.5°C , una humedad relativa promedio anual de 81% y una precipitación total anual de 10 mm (UNALM 2015).

El área de estudio se caracteriza por tener suelos profundos, de buen drenaje, permeabilidad moderada y textura media a ligeramente gruesa. El suelo se encuentra dentro de los fluvisol eutricto; de origen aluvial, presentando una textura franco arenosa con un pH neutro y baja cantidad de materia orgánica (1% a 45% kg N mineral) y una C.I.C de 6.4. En cuanto a la disponibilidad de nutrientes el suelo presentó un nivel medio de fósforo ($92.74\text{ kg/ha P}_2\text{O}_5$) y potasio ($87.21\text{ Kg/ha K}_2\text{O}$) (Chirinos 2005).

3.3. Materiales y equipos utilizados

- Motosierra.
- Balanza electrónica de plataforma (capacidad 300 kg- con precisión 0.05 kg).
- Balanza electrónica (capacidad 6.2 kg con precisión 0.1 g).
- Balanza analítica (capacidad 200g con precisión 0.0001 g).
- Cinta métrica.
- Tijeras de podar
- Sierra y machetes
- Bolsas de papel
- Sacos de polipropileno.
- Pintura.
- Horno de secado para muestras.

3.4. Criterios de Selección de especies y área de estudio.

El primer criterio que se consideró, fue el de seleccionar aquellas especies que presenten condiciones para ser consideradas en proyectos de reforestación en áreas urbanas como Lima (Brescia 2010, Solari et al 2008). Algunas de las características que debían poseer las especies fueron: tolerancia a condiciones de aridez y sequía, rápido crecimiento, que renueven hojas permanentemente para contribuir a la captación de material particulado, y que además tuvieran características ornamentales. Como segundo criterio se estableció que sean algunas de las especies con mayor abundancia en áreas verdes de la ciudad de Lima.

De lo anterior, las especies seleccionadas fueron “huanhuay”, “molle andino”, y “grevilea”, que son especies que en la actualidad, ya son considerados en los planes de reforestación del SERPAR Lima¹, por su bajo consumo de agua, rápido crecimiento y de gran resistencia

¹ Desde el año 2003 la Municipalidad de Lima selecciona especies xerófilas para los proyectos de reforestación. Información extraída de la página web del SERPAR LIMA, año 2015.

en suelos pobres. En cuanto a la selección del área de estudio, se eligió el Campo experimental II del Vivero Forestal- FCF de la UNALM, por presentar disponibilidad de áreas plantadas con estas especies, y por ser el único lugar en un área urbana, como Lima que brindaría las facilidades para realizar un ensayo destructivo con estas especies.

3.5. Características de la plantación

El campo experimental II, posee una extensión de 6 Ha, en la cual se encuentra una plantación forestal instalada desde el año 1998, y en la cual predominan las especies: molle andino, huaranhuay, grevilea, eucalipto, ficus y casuarina. El distanciamiento entre plantas es de 2 x 2 m, con amplios corredores (4m) entre hileras que permite el paso de luz. El manejo silvicultural (podas y raleos) es cada 3 años. El riego se realiza por inundación cada 15 días. Dado que el destino de los árboles de la plantación es la venta al público, cada cierto tiempo se replanta con individuos de las mismas especies, razón por la cual en la misma superficie, es posible encontrar individuos de diferentes edades, diámetros y alturas, requisito indispensable para la selección de los árboles para la generación de ecuaciones alométricas.

3.6. Selección de los árboles

Para la selección de los individuos a cortar, se realizó un inventario de los individuos de las especies en estudio, presentes en los campos I y II del Vivero Forestal –FCF. En base a los resultados obtenidos, los individuos fueron clasificados según su categoría diamétrica, con una amplitud de 5cm. Con el objetivo de que la muestra sea representativa de la variabilidad de la biomasa (Segura y Andrade 2008), se incluyeron individuos de las diferentes clases diamétricas encontradas para cada especie.

En este estudio se utilizó en total 43 árboles (15 para huaranhuay, 15 para grevillea y 13 individuos para molle andino). La cantidad de árboles por especie y clase diamétrica se muestra en el Cuadro 1. Los árboles fueron seleccionados al azar dentro de cada categoría diamétrica.

Cuadro 1. Cantidad de árboles extraídos por especie y rango diamétrico

Clase diamétrica	Rango diamétrico (cm)	Especies		
		<i>Tecoma stans</i>	<i>Grevillea robusta</i>	<i>Schinus molle</i>
1	0.1 - 5	3	3	3
2	5.1 – 10	4	3	4
3	10.1 – 15	4	4	3
4	15.1 - 20	4	3	3
5	20.1 - 25	-	2	1

Fuente. Begazo (2015)

3.7. Trabajo de campo

En cada árbol seleccionado para los ensayos destructivos, se midió el diámetro a la altura del pecho (dap a 1.2 m) del árbol en pie. Para árboles pequeños (diámetro menor a 5 cm) se midió el diámetro a 30 cm del suelo. Posteriormente, se realizó la tala el árbol y el registro de su altura comercial (distancia desde la base hasta la primera ramificación) y la altura total (Figura 8). Asimismo, se identificó el eje principal del tronco, para poder diferenciar el fuste de las ramas, según lo recomendado por (Picard et al (2012), principalmente para árboles con troncos muy sinuosos o ramosos -como el caso del huaranhuay y el molle andino-. Posteriormente, se realizó el desramado y deshojado.



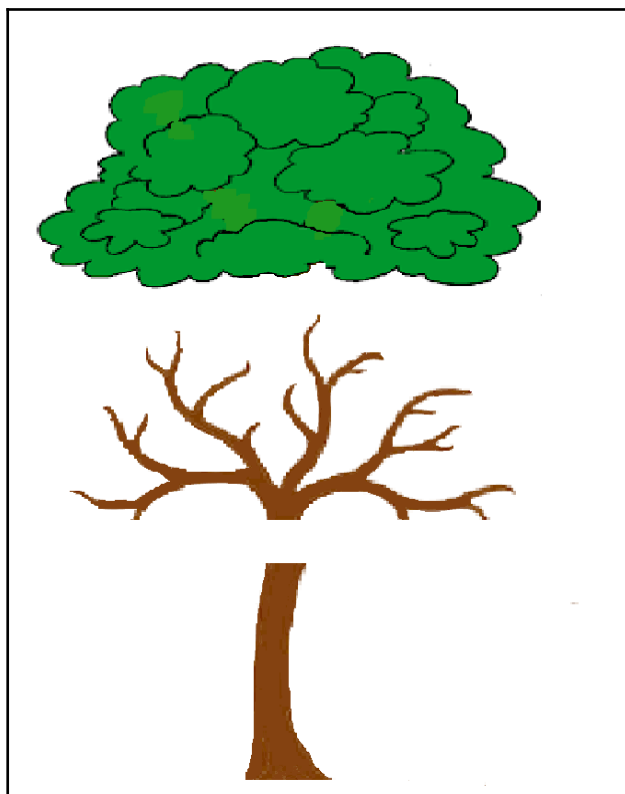
Figura 7. Corte del árbol. Fuente. Begazo 2015



Figura 8. Medición de la altura total. Fuente. Begazo 2015

El árbol fue dividido en secciones (tronco, hojas y ramas) para registrar el peso de cada componente (Figura 9). El tronco a su vez fue subdividido en secciones de aproximadamente 1 m cada una, y se procedió a registrar el peso húmedo total de cada sección del fuste, con ayuda de una balanza con precisión 0.05kg (Figura 10).

Posteriormente, se extrajo una muestra de cada sección (aproximadamente 5 cm de espesor) para la posterior determinación del contenido de humedad y fracción de carbono (Piccard et al 2012).



Hojas: Pesado total y toma de una muestra para contenido de humedad.

Ramas: Clasificación y pesado total. Toma de tres muestras para contenido de humedad y fracción de carbono.

Tronco: Pesado de trozas y toma de tres muestras para contenido de humedad y fracción de carbono.

Figura 9. Secciones de los árboles para la medición de biomasa aérea. Fuente. Begazo 2015

Las ramas fueron separadas divididas según diámetro: $> a 7$ cm, entre 2 y 7 y $< a 2$ cm, y posteriormente pesadas. Ulteriormente, se extrajo 1 muestra de cada grupo para el cálculo del contenido de humedad y fracción de carbono.



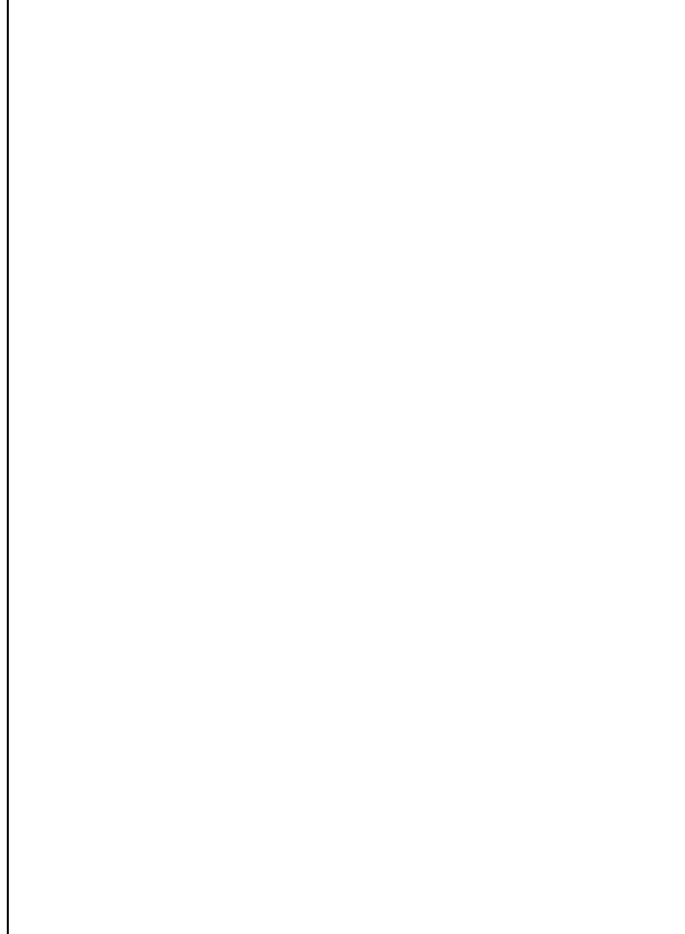


Figura 10. Pesado de componentes del árbol: (a) pesado de rama pequeña. (b) pesado de ramas grandes. (c) pesado de sección del fuste. Fuente. Begazo (2015).

En el caso de las hojas, estas fueron separadas de las ramas, colocadas en sacos y pesadas en la balanza digital (Figura 11). Luego se extrajo una muestra de 25 g, para los análisis de contenido de humedad.





divididas en secciones para tomar el secado de las mismas, y posteriormente determinar el contenido de humedad. En el caso de las rodajas mayores a 10 cm de ancho, estas fueron divididas en cuatro secciones, mientras que en el caso de las rodajas menores a 10 cm de ancho se dividió solo en dos secciones. Las rodajas fueron codificadas colocando la inicial de la especie en cada código, por ejemplo, en el caso de la Figura 12, la letra M denota al “molle”.

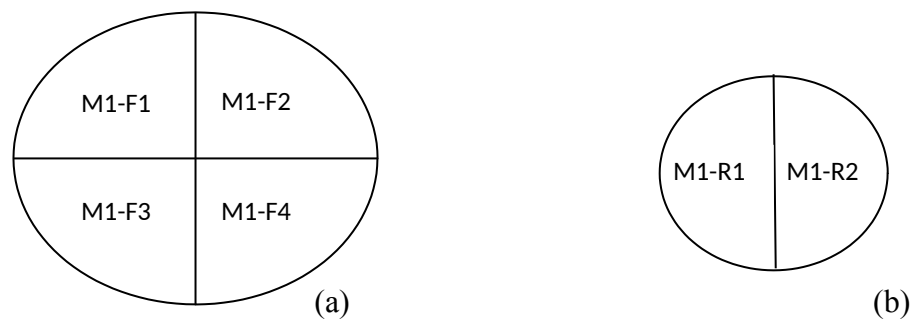


Figura 12. **División y codificación de secciones del árbol.** (a) Codificación para muestras de fuste y ramas mayores a 10 cm de diámetro (b) Codificación de muestras de fuste y ramas menores a 10 cm. *Fuente.* Begazo (2015)

3.8.1. *Determinación del contenido de humedad*

Las secciones del tronco, muestras de ramas y hojas fueron secadas en el horno a una temperatura de 102°C y hasta alcanzar un peso constante. Una vez que las muestras alcanzan este peso, se procedió a registrar el peso seco de cada muestra con una balanza analítica de precisión 0.0001 g (Figura 13 y 14). Para el cálculo del contenido de humedad se empleó la siguiente formula:

$$CH = \left[\frac{Phm - Psm}{Psm} \right] * 100$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

Phm = Peso húmedo de la muestra (g)

Psm = Peso seco de la muestra (g)



(a)



(b)

Figura 13. Secado de las muestras. (a) Secado en estufa (b) Enfriamiento de la muestra en desecador con sílica-gel. *Fuente.* Begazo (2015)

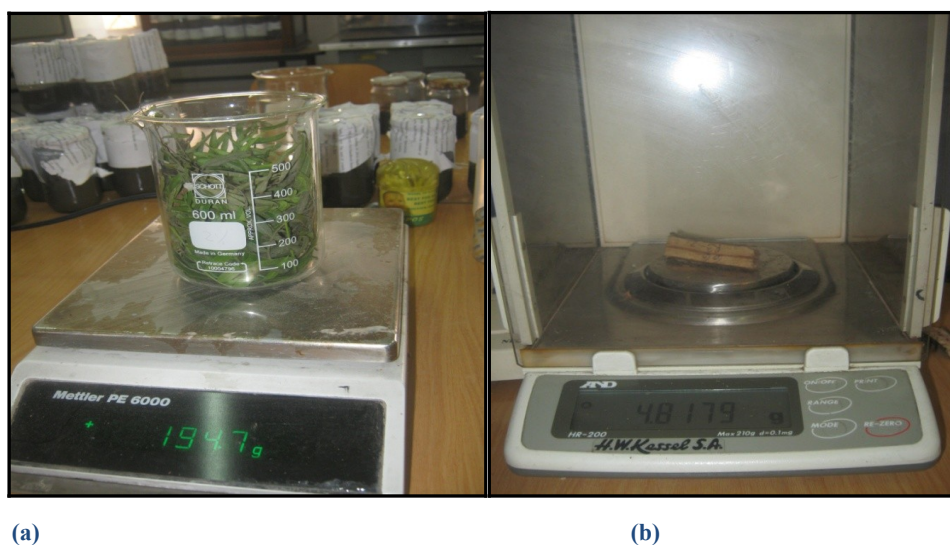


Figura 14. Registro del peso seco de las muestras. (a) Hojas (b) Rama. Fuente. Begazo (2015)

3.8.2. Determinación de la fracción de carbono

a) Evaluación del Valor Calorífico o Poder Calorífico Inferior (PCI).- Para su determinación, muestra de madera y ramas de cada especie fueron secadas, molidas y enviadas al Instituto de Investigación Nutricional (INN), para el ensayo del PCI, para lo cual se utilizó la norma ASTM Method D-2015-66 (1972).

b) Determinación del Poder calorífico Superior (PCS).- A partir del PCI, se determinó el Poder Calorífico Superior, para lo cual se aplicó la siguiente fórmula (FAO 2004)

Por tanto el PCS sería:

$$PCS = \frac{PCI + 6 \times CH}{1 - CH}$$

Donde:

CH =contenido de humedad de las muestras molidas a temperatura ambiente (%)

PCS =Poder calorífico superior (cal/g)

PCI =Poder calorífico inferior (cal/g)

c) Cálculo de la cantidad de carbono contenido en las muestras. -

Para la determinación del contenido de carbono en las muestras se usó los datos de PCS de cada una de las muestras que fueron analizadas en el laboratorio del Instituto de Investigación Nutricional y para hallar la cantidad de carbono (g) contenida en un gramo de muestra se les aplicó la siguiente fórmula citada por Segura (1999):

$$GC = \left[\frac{PCS \times \left(\frac{4.1868 J}{cal \cdot g^{-1}} \right)}{4.8 \times 10^5 j} \right] \times Pmol$$

Donde:

GC= Gramos de carbono (g)

PCS= Poder calorífico superior (cal/g)

P.Mol =Peso molecular del Carbono (12)

d) Cálculo de la Fracción de carbono

La fracción de carbono es la proporción de gramos de carbono entre gramos de la muestra, para su determinación se empleó la fórmula utilizada por Segura (1999):

$$FC = \frac{GC}{PM}$$

Donde:

FC=Fracción de carbono

GC=Gramos de carbono (g)

PM=Peso de la muestra (g) que es 1 g

3.9. Cálculo de la biomasa aérea

La biomasa total aérea (sobre el suelo) se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$BT = BF + BR + BH$$

Donde:

BT = Biomasa total (Kg).

BF = Biomasa del fuste (Kg).

BR = Biomasa de ramas (Kg).

BH = Biomasa de hojas (Kg).

Para el caso de la determinación de la biomasa de cada componente (fuste, ramas, hojas) se utilizó la siguiente fórmula:

$$B = \frac{PHT}{\left[1 + \frac{CH\%}{100}\right]}$$

Donde:

B = Biomasa seca (Kg) por componente

PHT = Peso húmedo total del componente (Kg)

CH % = Contenido de humedad de la muestra

3.10. Cálculo de la cantidad de carbono

Para el cálculo de la cantidad de carbono para cada componente del árbol (hojas, ramas, fuste), se utilizó la siguiente fórmula:

$$CC = B_{seca} \times Fc$$

Donde:

CC = Cantidad de carbono (Kg)

B. seca = Biomasa seca

Fc = Fracción de carbono

3.11. Análisis de los datos

Con el objeto de analizar la existencia de diferencias significativas, en relación a la cantidad de biomasa y carbono entre las especies, y entre componentes dentro de la especie, los datos obtenidos de los análisis fueron sometidos a pruebas estadísticas para lo cual se empleó la prueba de ANOVA y el test de Tukey-Kramer, con un nivel de significancia de 0.05. Se utilizó el programa Excel y E-Views 7.

3.12. Selección de modelos de biomasa aérea

En la estimación y posterior elección de las ecuaciones de biomasa para cada especie, se revisó los modelos más utilizados en la literatura considerando aquellos modelos con una sola variable regresora como el diámetro a la altura del pecho (dap) y con dos variables regresoras (dap-altura comercial y dap-altura total) (Cuadro 2). Luego se graficó la variable biomasa (variable dependiente, explicativa o regresora) contra todas las variables independientes (dap, hc y ht) para ver la tendencia de los datos.

Asimismo, se probaron modelos lineales y no-lineales para determinar la biomasa total teniendo en cuenta como variables explicativas al diámetro a la altura del pecho (dap), la altura total (ht), y la altura comercial (hc), de los cuales se descartaron aquellos que no cumplieran con los supuestos estadísticos de homocedasticidad, no multicolinealidad y autocorrelación y aquellos que presentaban un valor R^2 menor a 0.8. Para la detección de heterocedasticidad se utilizó el test de Breusch-

Pagan-Godfrey y de White con términos cruzados y sin términos cruzados. En el caso de la detección de autocorrelación se utilizó el Test de Breusch Godfrey, y para la detección de multicolinealidad se usó el Factor de Inflación de la varianza (FIV).

Considerando que algunos modelos utilizados fueron lineales simples, y otros modelos fueron no lineales (por lo tanto, sus bases teóricas son diferentes) para hacer la evaluación conjunta se realizó la comparación entre los valores reales y los estimados con los modelos seleccionados, según lo recomendado por Segura y Andrade 2008.

Los diferentes modelos alométricos fueron procesados con el software E-views 7.

Cuadro 2. Modelos alométricos ensayados para la estimación de la biomasa sobre el suelo

Nº	Modelos alométricos	Fuente
1	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap$	Suárez et al (2004)
2	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2$	Avendaño(2008)
3	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap + \beta_2 \times dap^2$	Segura(1999)
4	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 + \beta_2 \times ht$	Montero (2005)
5	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 \times ht$	Monroy (2004)
6	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap)$	Chavé (2001)
7	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap) + \beta_2 \times \ln(ht)$	Picard (2012)
8	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 + \beta_2 \times hc$	Solano et al
9	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap) + \beta_2 \times \ln(hc)$	Solano et al
10	$\ln(BA) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap)$	Montero (2005)
11	$\ln(BA) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap \times Ht)$	Spurr
12	$\ln(BA) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$	Spurr
13	$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht) + \beta_2 \times \ln(hc)$	Picard (2012)
14	$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times hc) + \beta_2 \times \ln(hc)$	Picard (2012)
15	$\ln(BA) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap \times ht) + \beta_2 \times \ln(hc)$	Picard (2012)
16	$BA = \beta_0 + \beta_1 \times dap + \beta_2 \times ht + \beta_3 \times (dap^2) + \beta_4 \times (dap^2$	Meyer

Fuente. Información recopilada de Álvarez (2008)

En la elección del modelo que más se adecue a los datos y de acuerdo con Segura y Andrade (2008) y Barrena et al (1985) los factores que se consideraron fueron: la simplicidad en la obtención de las variables, significancia de los parámetros, alto

valor del coeficiente de determinación (R^2), el Error Estándar de la Regresión o raíz del cuadrado medio del error (RCME), el Criterio de Información Akaike (AIC por sus siglas en ingles) y el Índice de Furnival (IF). Para la evaluación de la significancia estadística del modelo se consideró un valor p de 0.05.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados

4.1.1. Rango de validez de las variables.

En el cuadro 3 se presenta el rango de validez de los datos, es decir los valores mínimos y máximos de las variables diámetro, altura total, altura comercial y biomasa a determinar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea total para las tres especies utilizadas.

Cuadro 3. Rango de validez de las variables utilizadas

Variables	<i>Tecoma stans</i>			<i>Grevillea robusta</i>			<i>Schinus molle</i>		
	Min	Max	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max	Media
DAP (cm)	3.82	19.10	10.50	2.39	21.01	12.41	1.27	22.92	10.69
A. total (m)	4.4	11.8	7.82	3.70	21.44	14.46	2.68	10.85	6.98
A. comercial (m)	1.65	4.44	2.76	1.57	12.06	7.40	0.67	3.55	2.43
B. total (kg)	1.55	133.30	43.18	1.02	180.05	68.49	0.20	121.78	32.94

B. fuste (kg)	1.15	61.56	19.54	0.5	136.86	54.03	0.13	40.47	15.31
B. ramas (kg)	0.20	65.70	22.03	0.06	35.04	11.9	0.03	81.23	16.19
B. hojas (kg)	0.05	6.05	1.60	0.44	8.44	2.57	0.04	3.64	1.44
n	15			15			14		

Fuente. Begazo (2015)

4.1.2 Contenido de carbono orgánico presente en las especies en estudio

De acuerdo a los resultados obtenidos se encontró que el porcentaje de carbono orgánico promedio contenido en la biomasa aérea de las especies estudiadas fue 50.82%, 46.57% y 51.17% para *Tecoma stans*, *Schinus molle* y *Grevillea robusta*, respectivamente (Cuadro 4). Estos resultados se encuentran dentro del rango (44-49%) encontrado para especies forestales de áreas tropicales reportado por el IPCC (2006) y con el reportado por otros autores. Navarro (2011), determinó para 4 especies tropicales del Corredor biológico OSA en Costa Rica un rango entre 40 y 50% de fracción de carbono. Por su parte Álvarez (2008), reporta para dos especies de bosque nativo de Bolivia un rango entre 51 y 52%, mientras que Martin y Thomas (2011), encontró para 59 especies tropicales de los bosques de Panamá un rango entre 41.9 y 51.7%. En un estudio realizado por Gayoso y Guerra (2005) al estudiar 16 especies forestales de bosques nativos de Chile determinó un rango entre 34.86 y 48.31%. De otro lado Segura (1999) encontró para 9 especies de bosque nativo en Costa Rica un rango que va de 42.8% a 47.37%.

Cuadro 4. Fracción de carbono total y por componente del árbol según especie.

Especie	n	Fuste (%)	Ramas (%)	Promedio (%)
<i>Tecoma stans</i>	4	50.24	51.4	50.82
<i>Grevillea robusta</i>	4	51.01	51.34	51.01
<i>Schinus molle</i>	4	45.89	47.25	46.57

Fuente. Begazo (2015)

Para la determinación y análisis de laboratorio de la fracción de carbono se tomaron en base a 4 muestras por especie (dos por componente del árbol), razón por la cual no se realizaron los análisis de varianza respectivos.

En los estudios de cuantificación de carbono almacenado en biomasa forestal se asume generalmente un valor de 50% sin diferenciar especies (Brown y Lugo 1982, IPCC 1996). Sin embargo, diferentes investigaciones denotan la variabilidad del contenido de carbono según especie y tejido del árbol (Gayoso y Guerra 2005, Martin y Thomas 2011, Chave et al 2005). Estos mismos autores coinciden en señalar la importancia de contar con la cuantificación de carbono con base en información diferenciada por especie y componentes del árbol, con el fin de mejorar la información existente sobre el carbono almacenado en ecosistemas terrestres a nivel local y global. Por esta razón en la presente investigación se trabajó con los datos de fracción de carbono obtenidos para las tres especies en estudio.

4.1.3. Biomasa y carbono almacenado

Con los datos obtenidos de peso húmedo total de cada componente del árbol y el contenido de humedad de las muestras (Anexo 1) se determinó, para cada especie, la biomasa aérea total y para los tres componentes del árbol estudiados: tronco, ramas y hojas. Los resultados son mostrados en el Cuadro 5.

Asimismo, se realizaron las estadísticas descriptivas para las variables estudiadas: Dap, HT, Hc, biomasa y carbono total y por componente para cada una de las especies, obteniéndose que las mismas presentan distribución normal y una asimetría positiva. Los resultados se muestran en el anexo 2.

Cuadro 5. Biomasa aérea total y por componente según especie

Especie	Fuste		Ramas		Hojas		B. Total prom. (kg)
	Media	(%)	Media	(%)	Media	(%)	
<i>Tecoma stans</i>	19.54	45.26	22.03	51.03	1.60	3.71	43.18
<i>Grevillea robusta</i>	54.03	78.88	11.9	17.37	2.57	3.75	68.49
<i>Schinus molle</i>	15.31	46.48	16.19	49.15	1.44	4.37	32.94

Fuente. Begazo (2015)

En el cuadro 6, se muestra la cantidad de carbono almacenada en la biomasa aérea total y por componentes para cada especie evaluada, la cual fue determinada considerando los resultados obtenidos de biomasa (Cuadro 5) y la fracción de carbono (Cuadro 4).

Cuadro 6. Contenido de carbono total y por componentes según especie.

Especie	Fuste		Ramas		Hojas		C.C (Prom) (kg)
	Media	(%)	Media	(%)	Media	(%)	
<i>Tecoma stans</i>	9.82	44.72	11.33	51.59	0.81	3.69	21.96
<i>Grevillea robusta</i>	27.56	78.79	6.11	17.47	1.31	3.74	34.98
<i>Schinus molle</i>	6.49	44.67	7.25	49.9	0.78	5.37	14.52

Fuente. Begazo (2015)

Las estadísticas descriptivas (Anexo 3) para el contenido de carbono total y por componente indican una distribución normal y tendencia platicúrtica, excepto para el caso del contenido de carbono en hojas de *Tecoma stans* y el contenido de carbono en ramas de *S. molle* los cuales presentan tendencia leptocúrtica.

4.1.3.1. Diferencias entre la biomasa y carbono total almacenado entre especies

Los resultados obtenidos en el Análisis de varianza (Cuadro 7), muestran que no existe diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de biomasa total entre especies ($p=0.1457$).

Cuadro 7. Análisis de varianza para la biomasa total entre especies.

Origen de la variación	S. C	G. L	C.M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	9811.93	2	4905.97	2.019	0.146	3.23
Dentro de los grupos	99594.35	41	2428.13			
Total	109406.28	43				

Fuente. Begazo (2015)

Luego de realizado el análisis de varianza (Cuadro 8) y dado que el contenido de carbono depende de la cantidad de biomasa en cada individuo, tampoco se observaron diferencias importantes entre los promedios del contenido de carbono total entre las tres especies estudiadas ($p=0.1054$).

Cuadro 8. Análisis de varianza para carbono total entre especies

Origen de la variación	S. C	G. L	C. M	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	2940.58	2	1470.2881	2.3784	0.1054	3.226
Dentro de los grupos	25345.08	41	618.1730			
Total	28285.65	43				

Fuente. Begazo (2015)

4.1.3.2. Biomasa y carbono almacenado por componentes entre especies

Se comparó la biomasa de las tres especies en estudio según componente del árbol. Del ANVA (Cuadro 9) se encontró que el único componente que presenta diferencias significativas entre las tres especies es el fuste ($p=0.0048$). No se encontraron diferencias significativas para los componentes ramas ($p=0.337$) y hojas ($p=0.2133$) cuando se comparó entre especies.

Cuadro 9. Análisis de varianza de la biomasa del fuste entre especies.

Origen de la variación	S. C	G. L	C.M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	13320.68	2	6660.34	6.098	0.0048	3.226
Dentro de los grupos	44779.89	41	1092.19			
Total	58100.57	43				

Fuente. Begazo (2015)

Asimismo, se realizó el Test de Tukey Kramer, para identificar cual especie difiere significativamente de la otra en cuanto al contenido de biomasa en el fuste, siendo la *Grevillea robusta*, la especie que difiere significativamente de las demás (Cuadro 10).

Cuadro 10. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer de las diferencias entre promedios de biomasa del fuste entre especies.

Especies	Valor DSH	Diferencias entre promedios de biomasa(kg)
		Fuste
G – T	29.01	34.49
G – S	29.53	38.71
T – S	29.53	4.23

G= *Grevillea robusta*, S= *Schinus molle*, T= *Tecoma stans*

Fuente. Begazo (2015)

En el caso del carbono almacenado por componentes entre especies, se encontró la misma tendencia en los resultados de aquellos encontrados para biomasa. El Análisis de Varianza –ANVA- (Cuadro 11) reveló que existen diferencias significativas ($p=0.0034$), para el caso del carbono almacenado en el fuste. Del test de Tukey-Kramer (Cuadro 14), realizado para las tres especies, se encontró que la “*grevilea*” almacena más cantidad de carbono (78.79%), no encontrándose diferencias en el carbono almacenado en el fuste en las especies “*huaranguay*” (44.72%) y “*molle andino*” (44.67%). Para el resto de

componentes no se encontraron diferencias entre especies: ramas ($p=0.29$) y hojas ($p=0.16$), (ver Cuadro 12 y 13)

Cuadro 11. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en el fuste.

Origen de la variación	S.C	G. L	C.M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	3659.114	2	1829.557	6.534	0.0034	3.2257
Dentro de los grupos	11479.723	41	279.993			
Total	15138.838	43				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 12. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en las ramas

Origen de la variación	S.C	G. L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	214.945	2	107.472	1.256	0.295	3.226
Dentro de los grupos	3507.352	41	85.545			
Total	3722.296	43				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 13. Análisis de varianza entre especies para el carbono almacenado en las hojas

Origen de la variación	S. C	G. L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	3.309	2	1.655	1.903	0.1620	3.226
Dentro de los grupos	35.649	41	0.869			
Total	38.959	43				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 14. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer de las diferencias entre promedios de carbono del fuste entre especies.

Especies	Valor DSH	Diferencias entre promedios de carbono (kg)
		Fuste
G – T	14.68	17.74

G – S	14.95	20.53
T – S	14.95	2.79

Fuente. Begazo (2015)

Las diferencias encontradas en la biomasa y carbono almacenado en el fuste, se deben a que la *Grevillea robusta* es una especie heliófita (Fritzsons et al 2014), y tiende a acumular mayor cantidad de carbono en el fuste para poder acceder a una mayor cantidad de luz en el dosel, esto es porque posee un fuste de crecimiento monopodial (con predominio del crecimiento del fuste en comparación al resto de componentes), mientras que en caso de las especies *Tecoma stans* y el *Schinus molle*, son de porte pequeño a mediano (Reynel y Marcelo 2009) y se caracterizan por presentar un desarrollo simpodial, donde las ramas laterales se desarrollan en forma similar o incluso superan al eje principal, interrumpiendo por completo su crecimiento (Guarnaschelli y Guarau 2009)

4.1.3.3. Biomasa y carbono almacenados por componente dentro de la misma especie

Por medio del análisis de varianza, se encontró que existe diferencias estadísticamente significativas, entre la biomasa por componentes dentro de cada una de las especies (ver cuadro 15, 16 y 17).

Cuadro 15. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie *Tecoma stans*

Origen de la variación	S.C	G. L	C.M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	3727.928	2	1863.964	6.704	0.0029	3.219
Dentro de los grupos	11678.089	42	278.049			
Total	15406.017	44				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 16. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie *Grevillea robusta*

Origen de la variación	S.C	G.L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	22550.035	2	11275.018	12.208	0.00006	3.2199
Dentro de los grupos	38789.524	42	923.560			
Total	61339.559	44				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 17. Análisis de varianza para la biomasa de los componentes dentro de la especie *S. molle*

Origen de la variación	S.C	G. L	C.M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	1917.703	2	958.852	4.308	0.0204	3.238
Dentro de los grupos	8678.509	39	222.526			
Total	10596.213	41				

Fuente. Begazo (2015)

Asimismo, se utilizó el test de Tukey-Kramer (Diferencias Honestamente significativas-DSH) para determinar si los componentes difieren entre ellos, encontrándose que para el caso de *Tecoma stans*, no existen diferencias significativas entre la biomasa del fuste y ramas, pero sí se encontraron diferencias entre la biomasa del fuste y las hojas, y entre la biomasa de las ramas y las hojas. El mismo resultado se encontró para *Schinus molle*. Diferentes resultados se encontraron para la especie *Grevillea robusta*, en la cual la biomasa del fuste (78.88%) difiere significativamente del encontrado para ramas y hojas. (17.37% y 3.75%). Para esta especie no se encontraron diferencias estadísticas entre la biomasa de las ramas y hojas. (Cuadro 18).

Cuadro 18. Valores encontrados en el test de Tukey-Kramer para diferencias significativas entre promedios de biomasa por componentes dentro de la especie

Especie	Valor DSH	Diferencias entre promedios de biomasa(kg)		
		Fuste – Ramas	Fuste - Hojas	Ramas - Hojas
<i>Tecoma stans</i>	14.64	2.49	17.94	20.43
<i>Schinus molle</i>	13.71	0.88	13.88	14.75
<i>Grevillea robusta</i>	26.68	42.13	51.46	9.33

Fuente. Begazo (2015).

Para el caso del carbono almacenado por componentes dentro de la especie se encontraron similares resultados que, en el caso de la biomasa, es decir existen diferencias significativas entre los componentes del árbol dentro de la especie (ver Cuadro 19, 20 y 21).

Cuadro 19. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes dentro de la especie *Tecoma stans*

Origen de la variación	S. C	G. L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	969.304	2	484.652	6.749	0.0028	3.219
Dentro de los grupos	3015.937	42	71.808			
Total	3985.241	44				

Fuente. Biomasa (2015)

Cuadro 20. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes dentro de la especie *Schinus molle*

Origen de la variación	S.C	G. L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	417.860	2	208.930	4.277	0.0209	3.238
Dentro de los grupos	1905.239	39	48.852			
Total	2323.100	41				

Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 21. Análisis de varianza para el carbono almacenado en los componentes de la especie *Grevillea robusta*

Origen de la variación	S. C	G.L	C. M	F	Probabilidad	Valor F
Entre grupos	5848.307	2	2924.153	12.139	0.00006	3.219
Dentro de los grupos	10117.651	42	240.896			
Total	15965.957	44				

Fuente. Begazo (2015)

Asimismo, se utilizó el Test de Tukey- Kramer para determinar cuál de los de los componentes difiere significativamente de los otros. En el caso de “*huaranguay*” y el “*molle andino*” se encontró que no existen diferencias entre el carbono almacenado en el fuste y el almacenado en las ramas. Empero, se encontraron diferencias entre el carbono almacenado en el fuste y el almacenado en las hojas y entre el contenido de carbono almacenado en las ramas y el almacenado en las hojas. Estos resultados difieren de los encontrados, para la especie *Grevillea robusta*, donde el carbono almacenado en el fuste (78.79%) varía significativamente del encontrado para ramas y hojas. (17.47% y 3.74%). Para esta especie no se encontraron diferencias significativas entre el contenido de carbono almacenado en las ramas y el contenido de carbono almacenado en las hojas (Cuadro 22).

Cuadro 22. Valores encontrados en el Test de Tukey-Kramer para diferencias significativas entre promedios de carbono por componente dentro de la especie.

Especie	Valor DSH	Diferencias entre promedios de carbono (kg)		
		Fuste – Ramas	Fuste - Hojas	Ramas - Hojas
<i>Tecoma stans</i>	7.44	1.51	9.00	10.51
<i>Schinus. molle</i>	6.43	0.62	6.36	6.98
<i>Grevillea. robusta</i>	13.63	21.37	26.25	4.88

Fuente. Begazo (2015)

Los resultados encontrados para la cantidad de biomasa y carbono entre las tres estructuras del árbol analizadas, para la especie *Grevillea robusta* coincide con lo reportado en otras investigaciones, la cuales señalan que la mayor cantidad de biomasa y carbono se encuentra en el fuste, para el caso de especies latifoliadas. Fonseca et al (2011) reportaron para especies de bosques secundarios en Costa Rica, un contenido de biomasa y carbono en fuste (58.4%) mayor que para ramas (18.4%) y hojas (5.3%). Por su parte Monroy y Navar (2004), reportan mayor contenido de biomasa en fuste (73.9%) que en ramas y hojas (27%) para la especie *Hebea brasiliensis* cultivada en plantaciones, y Soriano-Luna (2015) en bosques naturales de México, encuentra la misma distribución para 11 árboles de latifoliadas en las cuales se obtuvo también mayor proporción para el fuste (49.1%), seguido por las ramas (38%) y hojas (4.1%). De igual manera Gayoso (2005) encontró entre 61.9 a 88.1 % de carbono en el fuste, 6.1 a 22.2 % en ramas, y 0.6 a 5.0 % en el follaje de especies forestales oriundas de Chile.

En relación al contenido de carbono encontrado para *Tecoma stans* y *Schinus molle*, no se encontró diferencias significativas entre la biomasa y el contenido de carbono del fuste y las ramas, lo cual difiere de lo reportado por los autores, quienes indican una mayor porción de biomasa y carbono en el tronco del árbol seguido por las ramas y el follaje. Esto se puede explicar por la estructura fenotípica de las especies, las cuales exhiben un crecimiento simpodial, donde las ramas presentan un desarrollo igual o superior que el eje principal en comparación con aquellas del tipo monopodial (*Grevillea robusta*). Asimismo, las prácticas silviculturales (raleos, podas) y las características biofísicas del sitio afectan el crecimiento y la distribución de biomasa por componentes dentro de las especies (Troxel et al 2013). Del mismo modo, las especies que tienden a crecer en espacios abiertos, desarrollan una mayor copa y con mayor cantidad de ramas (Nowak 1994 cit. por Johnson y Gerhold 2001), como es el caso de las especies en estudio, dado que no tienen

competencia por luz, como aquellas que se desarrollan en un bosque natural o en plantaciones, de donde además proviene la mayor parte de las investigaciones. Sin embargo, poca información ha sido publicada en relación a la distribución de biomasa y carbono para especies ubicadas en áreas urbanas, pero existe evidencia como la determinada por (Xiao 1998; Brack 2002 cit. por Aguaron y McPherson 2012) que indican un mayor contenido de carbono en las ramas y hojas en comparación al fuste.

4.1.4. Selección de modelos de biomasa aérea

Con el fin de estimar la biomasa total se evaluaron numerosos modelos lineales y no-lineales (los cuales fueron transformados a logaritmo natural para mejorar el ajuste de los modelos alométricos) que incluían como variables independientes al diámetro a la altura del pecho (dap), la altura total (ht), y la altura comercial (hc), de los cuales se descartaron aquellos que no cumplían con los supuestos estadísticos de homocedasticidad, no multicolinealidad y autocorrelación y aquellos que presentaban un valor R^2 menor a 0.8.

Las ecuaciones que mostraron mejor ajuste de los datos fueron aquellos en los que solo se incluyó al dap, como variable independiente, y que es la variable de más fácil de medición en todos los estudios donde se colecta información para el manejo de plantaciones, bosques naturales y arbolado urbano, lo cual constituye una ventaja ya que permite realizar estimaciones como el volumen o biomasa a partir de una sola variable (diámetro).

Todas las ecuaciones de regresión analizadas presentaron valores R^2 y R^2 -ajustados superiores a 0.9. Tanto los parámetros como la ecuación seleccionada fueron significativos ($p < 0.05$). De otro lado, y de acuerdo con Segura y Andrade (2008) y Barrena et al (1985) para la validación de los modelos se consideró el Error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME) y los criterios

estadísticos de información de Akaike (AIC) y criterio bayesiano de información (BIC). Considerando que se utilizaron modelos lineales y no lineales, se utilizó el Índice de Furnival (IF) para comparar entre los modelos con variables transformadas y sin transformar. De acuerdo a este criterio, un modelo es mejor que otro cuando presenta el IF más bajo.

El costo que representa la medición de distintas variables y la facilidad en su medición, es un elemento importante a considerar para la decisión del método más viable a utilizar cuando se desea cuantificar la cantidad de biomasa y carbono. Modelos con más de una variable puede ofrecer un mayor ajuste de los datos, pero muchas veces este método no es técnica ni económicamente viable con lo cual no se justifica su elección, aunque se consiga una mejora en el ajuste del modelo. Los trabajos sobre cuantificación de biomasa, usando modelos alométricos empleados por Nelson et ál. (1999) y Araujo et ál. (1999) (citados por Gonzales Z, 2008) utilizaron ecuaciones con más de una variable (dap y la altura total), pero también utilizaron modelos con una sola variable y en ese caso la variable utilizada fue el diámetro.

4.1.4.1. Selección de modelos de biomasa aérea para *Tecoma stans* (“huaranguay”)

De acuerdo con los resultados, la variable regresora que más se relaciona con la biomasa aérea total ($r=0.93$) fue el diámetro (Figura 15), mientras que la variable altura total (hc) no fue considerada dentro de los modelos por presentar un índice de correlación bastante bajo ($r=0.47$). Los modelos que mejor representaron a la biomasa aérea total son tres modelos lineales y tres transformados, con dos variables independientes (dap y ht) (Cuadro 23).

Los modelos para *Tecoma stans* superan los valores de $0.86 R^2$. De igual manera, los parámetros como el modelo seleccionado fueron significativos ($p<0.01$). El modelo seleccionado, para la especie es un

modelo linealizado de la forma $\ln(BT) = -2.9409 + 2.6925 \times \ln(dap)$ que presenta un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.93$, y el Índice de Furnival más bajo (IF=9.00). Onyekwelu (2004) realiza un estudio para la especie *Gmelina arborea* en Nigeria a partir de 120 árboles de edades entre los 5 y los 21 años, y logró un R^2 de 0.989 para el mismo modelo: $\ln(Bt) = a + b \ln(dap)$. Según los resultados, y dado el valor de $R^2 = 0.92$ y un valor IF de 9.07, también es posible seleccionar el modelo $\ln(BT) = -4.0109 + 1.0923 \times \ln(dap^2 \times ht)$.

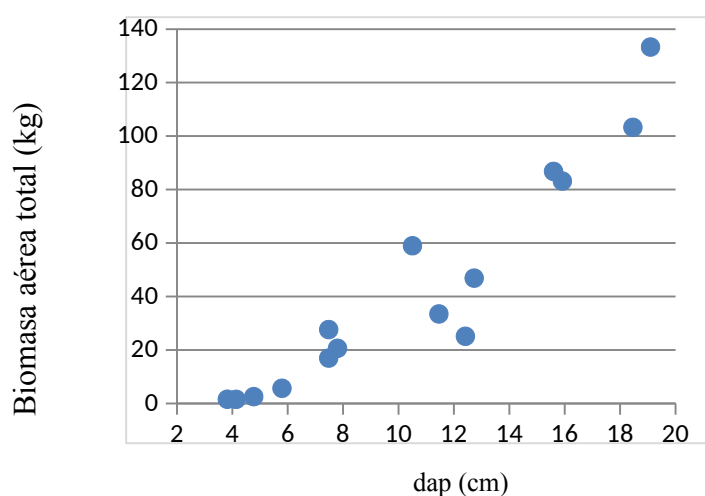


Figura 15. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de *Tecoma stans*. Fuente. Begazo (2015)

Cuadro 23. Modelos alométricos seleccionados y estadígrafos obtenidos para la Biomasa aérea total de *Tecoma stans*

Modelo	Parámetros		R2	RCME	IF
	β_0	β_1			
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap$	-36.6205	7.6011	0.89	14.21	14.21
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2$	-2.5918	0.3397	0.93	11.54	11.54
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 \times ht$	3.5949	0.0326	0.86	15.81	15.81
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap)$	-2.9409	2.6935	0.93	0.42	9.00
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap \times ht)$	-4.5823	1.8002	0.91	0.48	10.18
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$	-4.0109	1.0923	0.92	0.43	9.07

Fuente. Elaboración propia

Una vez que fueron seleccionados los modelos de mejor ajuste, se graficó lo resultados para los valores de biomasa de las observaciones reales contra las estimaciones de los mejores modelos, y se verificó que estas se alineen a lo largo de la recta $Y=X$ (Segura y Andrade 2008). De la figura 16 se puede observar que el modelo $\ln(BT)=\beta_0+\beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$ es el que presenta mejor ajuste ya que los puntos se encuentran cercanos a la línea de tendencia.

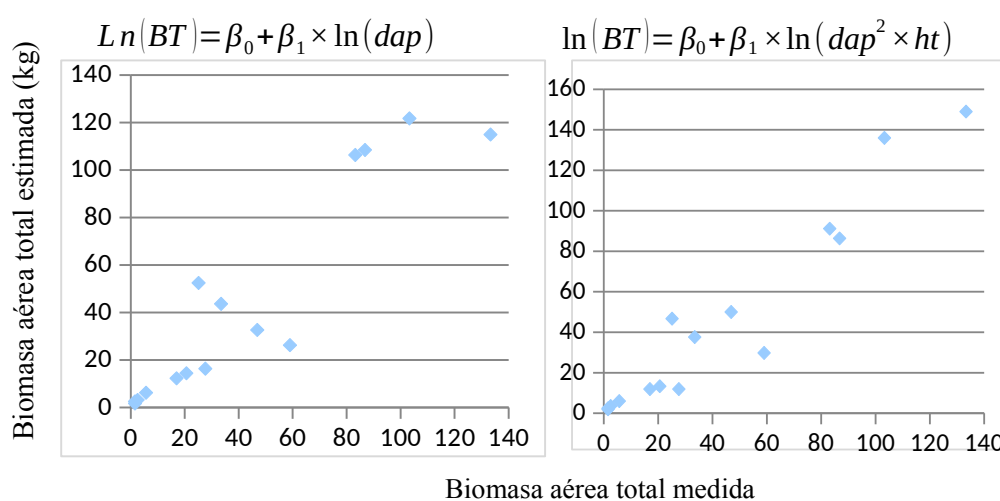


Figura 16. Comparación de la precisión entre los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para *Tecoma stans*. Begazo (2015)

4.1.4.2. Selección de modelos de biomasa aérea para *Grevillea robusta*

De acuerdo a los resultados el dap fue la variable regresora que mejor se correlacionó con la biomasa aérea total ($r=0.94$), (Figura 17). El cuadro 24 muestra los modelos más representativos de la biomasa aérea total (dos modelos lineales y cuatro linealizados), con tres variables independientes (dap, ht y hc).

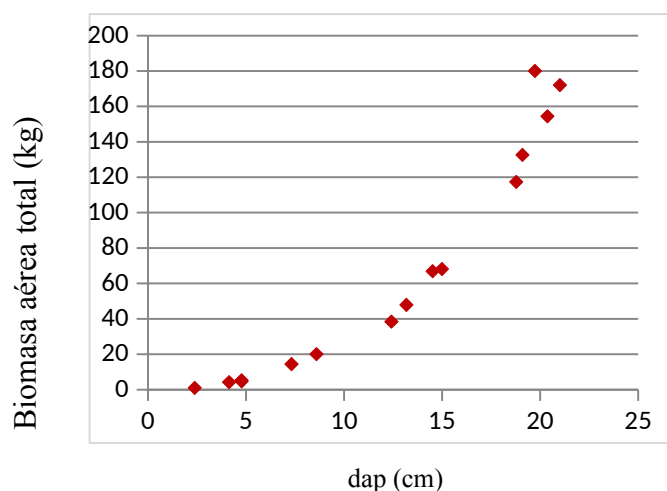


Figura 17. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de *Grevillea robusta*. Begazo (2015)

Los modelos para *Grevillea robusta* superan los valores de 0.97 R^2 . Asimismo, los parámetros como el modelo fueron significativos ($p < 0.01$). El modelo seleccionado, para la especie es un modelo linealizado de la forma $\ln(BT) = -2.0082 + 2.3293 \times \ln(dap)$ que presenta un $R^2 = 0.99$, y el Índice de Furnival más bajo ($IF = 3.53$). Sin embargo, también se podría utilizar el modelo $\ln(BT) = -2.6915 + 0.9351 \times \ln(dap^2 \times ht) - 0.3439 \times \ln(hc)$, el cual también presenta un alto valor de $R^2 = 0.99$ y un $IF = 4.91$. La elección de uno u otro modelo dependerá de la existencia de información de las variables altura total y altura comercial.

Cuadro 24. Modelos alométricos y estadísticos obtenidos para la biomasa aérea total de *Grevillea robusta*.

Modelo	Parámetros			R^2	RCME	IF
	β_0	β_1	β_2			
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2$	-9.3239	0.3994		0.97	12.75	12.75
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 \times ht$	-0.4542	0.0189	--	0.98	9.44	9.44
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap)$	-2.0082	2.3293	--	0.99	0.12	3.53
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap \times ht)$	-2.8190	1.2792	--	0.98	0.25	7.75
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$	-2.5533	0.8287	--	0.98	0.19	5.79
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht) + \beta_2 \times \ln(hc)$	-2.6915	0.9351	-0.3439	0.99	0.16	4.91

Fuente. Begazo (2015)

En el cuadro 24 se observa que los resultados presentan una muy buena correlación entre la biomasa y el diámetro. Esto se puede explicar, ya que el incremento en volumen de los árboles se refleja en su crecimiento en altura y en diámetro, lo que incide en el aumento de biomasa, lo cual coincide con lo mencionado por Arreaga (2002) quien menciona que a mayor diámetro mayor cantidad de biomasa y que esta relación es directa, con una tendencia ascendente en el crecimiento.

Luego de seleccionar los modelos de mejor ajuste se graficó lo valores de biomasa de las observaciones reales contra las estimadas de los mejores modelos, aquellos que presentaban el IF más bajo, y se verificó que estas se alineen a lo largo de la recta $Y=X$ (Segura y Andrade 2008). De los gráficos (Figura 18) se puede observar que ambos modelos presentan buen ajuste puesto que los puntos se encuentran próximos a la línea de tendencia. Sin embargo, el modelo basado solo en el diámetro presenta un r^2 de mayor ajuste.

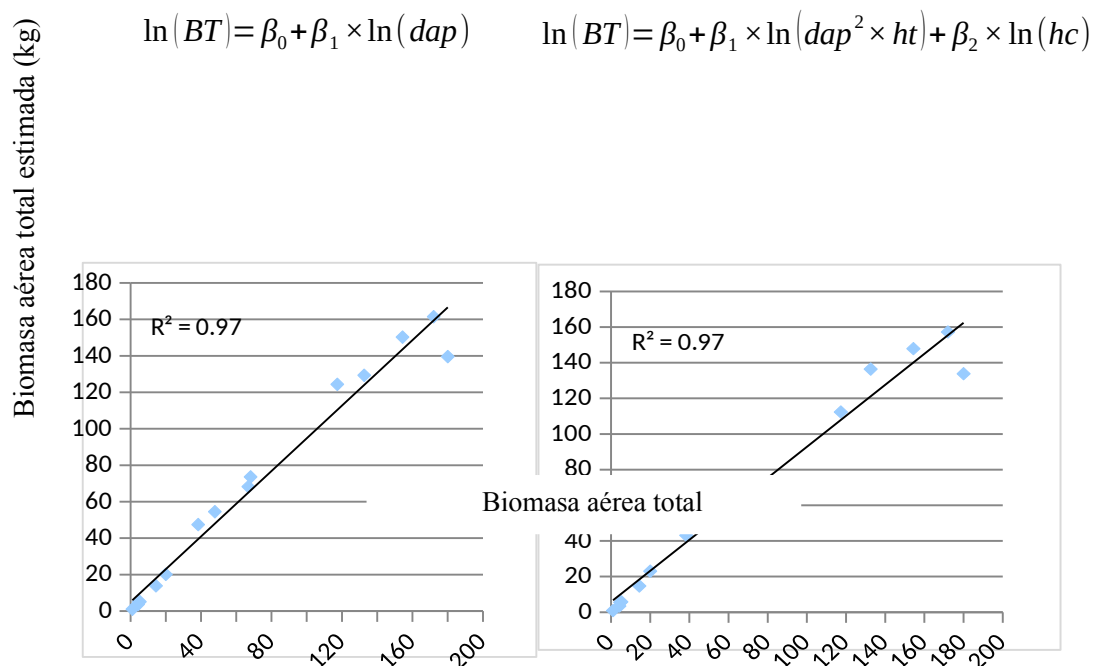


Figura 18. Comparación de la precisión entre los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para *Grevillea robusta*. Begazo (2015)

4.1.4.3. Selección de modelos de biomasa aérea para *Schinus molle*

En la figura 19 se puede observar la distribución del diámetro en función a la biomasa aérea total y presentando una buena correlación ($r=0.94$). Los modelos que mejor representaron la biomasa aérea total son dos modelos lineales y cuatro linealizados, con tres variables independientes (dap , ht y hc) (Cuadro 25).

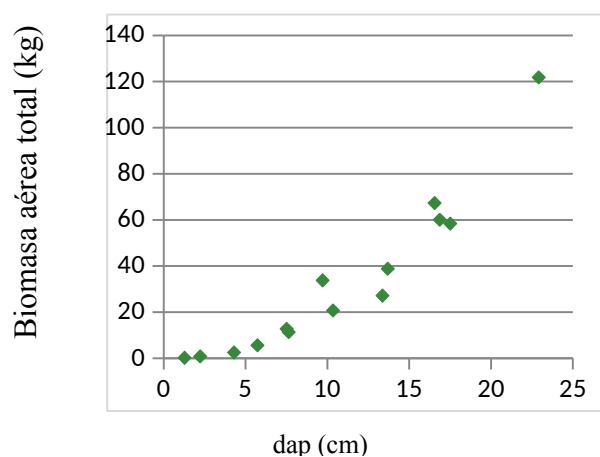


Figura 19. Distribución de biomasa aérea total en relación al dap de *S. molle*.
Begazo (2015)

Los modelos para *S. molle* superan los valores de 0.97 R^2 , y tanto los parámetros como el modelo presentan significancia estadística ($p < 0.01$). El modelo seleccionado, para la especie es un modelo linealizado de la forma $\ln(BT) = -3.3201 + 1.4834 \times \ln(dap \times ht)$ que presenta un $R^2 = 0.99$ y el Índice de Furnival más bajo (IF=2.22). Sin embargo, también se podría utilizar los modelos: $\ln(Bt) = -2.4065 + 2.1906 \times \ln(dap)$, que presenta un $r^2 = 0.99$ y un IF=3.02; y $\ln(BT) = -2.8186 + 0.8866 \times \ln(dap^2 \times ht)$, el cual también presenta un alto valor de $R^2 = 0.99$ y un IF = 2.25. La elección de uno u otro modelo dependerá de la existencia de información de la variable altura total.

Cuadro 25. Modelos alométricos y estadísticos obtenidos para la Biomasa aérea total de *S.molle*.

Modelo	Parámetros			R_2	RCME	IF
	β_0	β_1	β_2			
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2$	-1.0413	0.2233	--	0.97	6.51	6.51
$BT = \beta_0 + \beta_1 \times dap^2 \times ht$	4.5783	0.0208	--	0.97	6.68	6.58
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap)$	-2.0465	2.1906	--	0.99	0.22	3.02
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap \times ht)$	-3.3201	1.4834	--	0.99	0.16	2.22
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$	-2.8186	0.8866		0.99	0.17	2.25
$\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times hc) + \beta_2 \times$	-2.1025	1.0794	-0.9256	0.99	0.22	2.99

Fuente. Begazo (2015)

Se seleccionaron las ecuaciones de mejor ajuste y se graficaron los valores de biomasa de las observaciones reales contra las estimaciones de los mejores modelos, aquellos que presentan el IF más bajo, y se verificó que estas se alineen a lo largo de la recta $Y=X$ (Segura y Andrade 2008). De los gráficos (Figura 20) se puede observar que los modelos presentan buen ajuste ya que los puntos se encuentran próximos a la línea de tendencia, sin embargo el modelo $\ln(BT) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(dap^2 \times ht)$, sería el recomendado por presentar la mayor cantidad de puntos sobre la recta, esto guarda relación con lo

encontrado a través de los estadígrafos, que presentan a estos cuatro modelos como los de mayor ajuste a los datos.

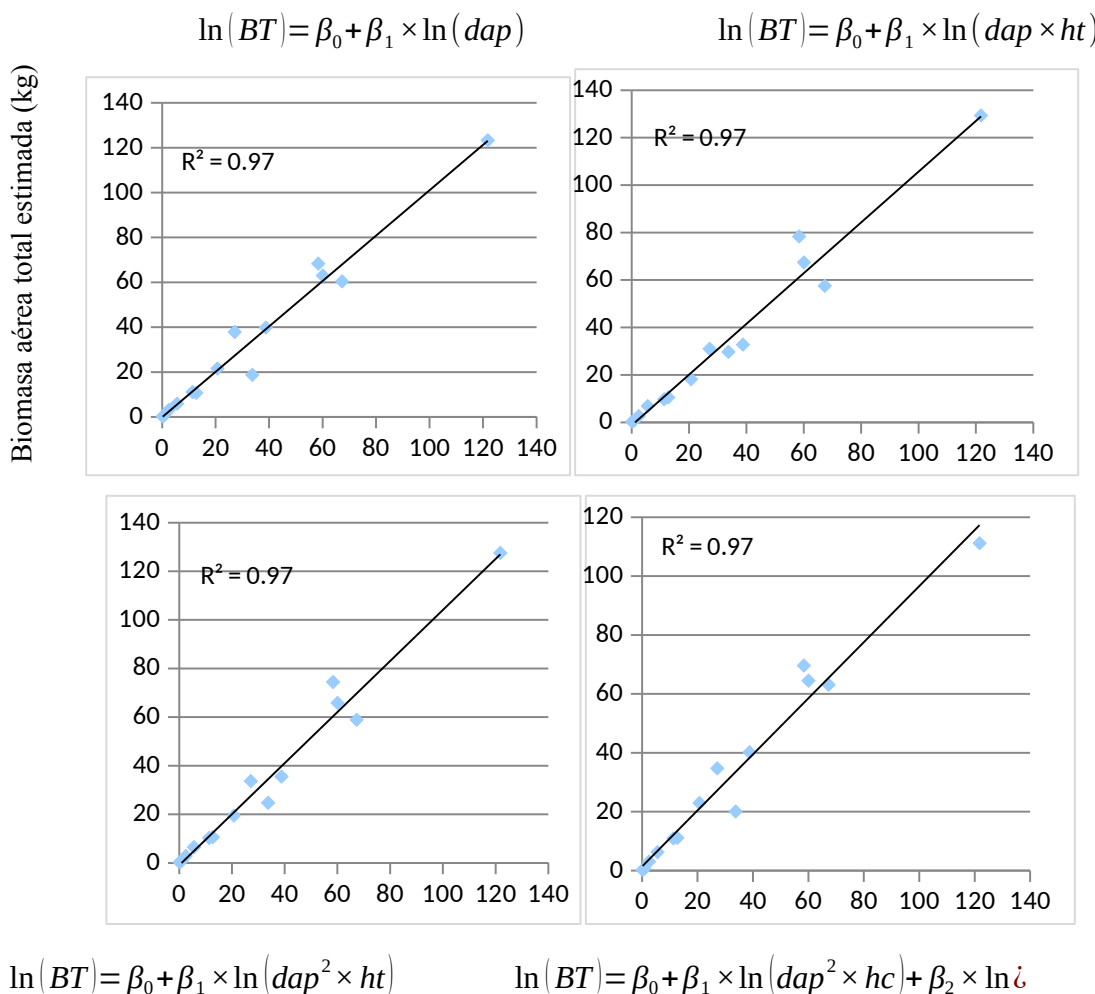


Figura 20. Comparación de la precisión de los modelos de mejor ajuste de biomasa aérea total para *Grevillea robusta*. Begazo (2015)

En todos los modelos analizados en la presente investigación se observa que la variable que presenta mayor correlación con la variable dependiente “biomasa aérea” fue el diámetro (dap). En la mayor parte de las investigaciones revisadas para la presente investigación, se indica que la variable de mejor estimación de la biomasa de un árbol, es el diámetro medido a 1.20 m del suelo. Álvarez (2008) señala que muchos autores utilizan el diámetro, dado que es una variable común

en la realización de inventarios forestales por lo tanto fácil de medir y conseguir en campo.

4.2. Pruebas de hipótesis

I.- Cantidad de biomasa almacenada en las especies forestales

H_0 = No existen diferencias significativas entre la biomasa de las especies estudiadas.

H_a = Si existen diferencias significativas entre la biomasa de las especies estudiadas.

Del análisis de varianza realizado al promedio de biomasa entre las tres especies forestales se encontró que la probabilidad era de 0.1457 (ver Cuadro 7), con lo cual se acepta la hipótesis nula, es decir no existen diferencias estadísticamente significativas entre la biomasa de las especies analizadas.

II.- Cantidad de carbono almacenado en las especies forestales

H_0 = No existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en las especies estudiadas.

H_a = Si existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en las especies estudiadas.

Del análisis de varianza realizado al promedio de carbono almacenado entre las tres especies forestales se encontró la misma tendencia en el resultado que en el caso anterior, ya que el carbono depende directamente de la biomasa, es así que la probabilidad encontrada fue de 0.1054 (ver Cuadro 8), con lo cual se acepta la hipótesis nula, es decir no existen diferencias estadísticamente significativas en el carbono almacenado entre las especies analizadas.

III.- Carbono almacenado en los componentes el árbol entre especies

Para el carbono almacenado en el Fuste

Ho= No existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en el fuste del árbol entre especies.

Ha = Si existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en el fuste del árbol entre especies.

Del análisis de varianza realizado, se encontró que sí existen diferencias significativas para el fuste (ver Cuadro 11) cuando se compararon las tres especies ($p= 0.0034$), rechazándose la hipótesis nula.

Para el carbono almacenado en las ramas y hojas

Ho= No existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en los componentes del árbol entre especies.

Ha = Si existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado en en los componentes del árbol entre especies

Tanto para el caso de ramas como de hojas, se encontró que no existe diferencias significativas entre las especies ($p. \text{ ramas} = 0.29$, $p. \text{ hojas} = 0.16$) (ver Cuadros 11, 12 y 13), con lo cual se acepta la hipótesis nula.

IV.- Carbono almacenado en los componentes del árbol dentro la misma especie

Ho= No existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado por componentes dentro de la especie.

Ha = Si existen diferencias significativas entre la cantidad de carbono almacenado por componentes dentro de la especie.

De los resultados obtenidos en el ANVA, para cada especie se obtuvo que si existen diferencias significativas (ver Cuadros 19, 20 y 21) entre los componentes del árbol (fuste, rama y hojas) para cada especie (p. *Tecoma stans* = 0.0028, p. *Grevillea robusta* = 0.00006, p. *Schinus molle*= 0.0209), con lo que se rechaza la hipótesis nula.

CONCLUSIONES

La cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea promedio de las tres especies forestales estudiadas fue de 21.96 kg para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, 34.94 kg para *Grevillea robusta* A.Cunn ex R.Br. y de 14.52 para

Schinus molle L. Las tres especies no presentaron diferencias estadísticamente significativas, rechazando la hipótesis de estudio.

La biomasa aérea promedio encontrada fue de 43.17 kg para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, 68.49 Kg para *Grevillea robusta* A. Cunn ex R.Br, y de 32.94 para *Schinus molle* L. Al comparar las tres especies no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la biomasa aérea promedio. Sin embargo, al comparar la biomasa por componentes entre especies, sí se encontraron diferencias, siendo el fuste el único componente que presenta diferencias significativas entre las tres especies. No se hallaron diferencias estadísticas importantes para los componentes ramas y hojas cuando se comparó entre especies.

Al comparar la biomasa para cada estructura del árbol y dentro de la misma especie, se obtuvo que para los árboles de “*grevilea*”, el fuste es el componente que contiene la mayor cantidad de biomasa, en comparación con hojas y ramas, no existiendo diferencias estadísticas entre estos dos componentes. Sin embargo, para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans* y *Schinus molle* L. la biomasa del fuste no difiere de la biomasa de ramas, ambos componentes contienen la mayor cantidad de biomasa, en contraste con el follaje.

En el caso del carbono almacenado según componentes entre las especies y dentro de la especie, se encontró que presentaba la misma tendencia que los resultados encontrados para el caso de biomasa aérea, ya que el carbono es una proporción de la biomasa y depende directamente de ella.

Para el presente estudio los modelos que más se ajustaron a la biomasa de las especies estudiadas fueron los modelos lineales con transformación de las variables dependientes e independientes.

Los modelos alométricos seleccionados para medir la biomasa aérea total fueron $\ln(BT) = -2.9409 + 2.6925 \times \ln(dap)$ para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, $\ln(BT) = -2.0082 + 2.3293 \times \ln(dap)$ para *Grevillea robusta* y $\ln(BT) = -3.3201 + 1.4834 \times \ln(dapxht)$ para *Schinus molle*. Estos modelos mostraron altos coeficientes de determinación mayores a 0.92 para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans* y de 0.99 para *Grevillea robusta* A. Cunn ex R.Br., y *Schinus*

molle L. y los valores más bajos en el índice de Furnival, menores a 9 para *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans*, menores a 4 para *Grevillea robusta* A.Cunn ex R.Br. y menores a 3 para *Schinus molle* L.

La variable independiente que mejor explicó la biomasa aérea fue el diámetro a la altura del pecho (dap) para el caso de *Tecoma stans* (L.) Jussieu ex H.B.K var. *stans* y *Grevillea robusta* A.Cunn ex R.Br., y la combinación dap y altura total (ht) para *Schinus molle* L. . Estas variables son de fácil medición en campo y muestran una alta correlación con la biomasa.

La información obtenida en el presente trabajo provee de información base para investigadores e instituciones interesadas en la cuantificación de biomasa y carbono sobre el suelo con fines de mejora y planificación de las áreas urbanas, así como aquellas interesadas en la valoración y pago por servicios ecosistémicos de almacenamiento y captura de carbono en áreas urbanas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda aumentar el tamaño de la muestra para incrementar la precisión de los resultados.

Se recomienda generar modelos de biomasa por cada especie en áreas verdes ya que son más precisos en comparación con los modelos generales existentes que son

principalmente para bosques tropicales, los cuales difieren ampliamente a las condiciones en las que se desarrollan las especies forestales en áreas urbanas.

Si bien en este estudio no se incluyó el análisis de las raíces, se recomienda para futuras investigaciones incluir la cuantificación del carbono almacenado en el sistema radicular.

Se recomienda el uso de modelos con una sola variable regresora (dap), dado que es la variable de más fácil medición y la más precisa para la determinación de la biomasa.

Es recomendable que para la utilización de los modelos alométricos que se han desarrollado en esta investigación, se tenga en consideración la forma en la que se han generado los datos y las condiciones de sitio del presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, M.; Vargas, J.; Velasquez, A.; Etchevers, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36 (6): 725 – 736.

Aguaron, E; McPherson E. (2012). Chapter 3: Comparison of Methods for Estimating CarbonDioxide Storage by Sacramento's Urban Forest. R. Lal and B.

Augustin (editors) Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Ed. Springer Science+Business Media.

Álvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis para optar el grado de *Magister Scientiae* en Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad Turrialba, Costa Rica, 2008. CATIE

Andrade, H; Segura, M (2008) ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas*. (46): 86-96.

Ares. A; Boniche, J; Quesada, J; Yost, R; Molina, E. (2002). Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrientes y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. 120 p.

ASTM. (1972). American Society of Testing Material. Standards for bomb calorimetry and combustion methods. Standard method of test for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter (D2015–66 reapproved 1972). In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa, USA

Avendaño J. (2008). Modelos Genéricos de Biomasa Aérea para Especies Forestales en Función de la Arquitectura y la Ocupación del Rodal. Tesis para optar el grado de MG SC Catie.

Barrena, V; Dancé, J; Sáenz, D.1985. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*. v.13(2):1-10.

Brack, C. (2012). Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution* 116 (2002) S195–S200.

Beaudoin, A; et al. (1994). Retrieval of forest biomass from SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 15.No 14. pp. 2777-2796.

Beckett, K.P., P. Freer-Smith, and G. Taylor. (2000). Effective tree species for local air-quality management. *J. Arboric.* 26:12–19.

Brescia de Fort, Rosa. (2010). “*Paisajes Verdes con poco agua: Jardines para Lima y ciudades de regiones secas*”. Club de Jardines del Perú, Floralties. Lima- Perú, 238 p.

Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest: A Primer. Serie de Documentos FAO. Forestry Paper N° 134. Roma. 55p

Brown, S. ; Lugo, A. (1980). Los bosques tropicales: Fuentes o sumideros de carbono. Serie de Documentos FAO. *Unasylva*. XXXII (129).

Brown S, Lugo AE (1982) The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14:161–187.

Brown, S; Gillespe, A; Lugo, A. (1989). Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4): 881 – 902.

Castillo, L; Ferro, S. (2015) . La problemática del diseño con árboles en vías urbanas: verde con respaldos negros. Arquitectura y Urbanismo. Vol. 36 N°1. LaHabana 2015.

CATIE (1986). Silvicultura de especies promisorias para producción de leña en América Central. Serie técnica informe técnico n 86. Costa Rica.

Cero Co2, (2008). Aplicación práctica a la cooperación: Mercado Voluntario de carbono. Disponible en: http://www.unescoetxea.org/dokumentuak/CClimatico_coop_jun2010_Cecilia1.pdf

Chavan, B ; Rasal ,G. (2010). Sequestered standing carbon stock in selective tree species grown in University campus at Aurangabad, Maharashtra, India. International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(7), 2010, 3003-3007.

Chave, J et al. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* (2005) 145: 87–99.

Chave, J; Riera, B; Dubois, M. (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*. 17: 79 – 96.

Chirinos I, A. (2005). Evaluación de diferentes sistemas de fertilización orgánica-mineral en el cultivo de algodón Tanguis var UNA-Centenario. Tesis para optar el título de Ingeniero agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú.

Ciudad de Fort Collins. (1999). *Fort Collins Local Action Plan to Reduce Greenhouse Gases*. Section 8: Vegetation Measures. Disponible en <http://fcgov.com/airquality/pdf/ch8-vegetation.pdf>.

Comisión Nacional Forestal de México (CONAFOR). (2007). Bosques como Sumideros de carbono. Consultado 21 Junio 2008. Disponible en: www.conafor.gob.mx

Comunidad Andina de Naciones (CAN) (2007). Documentos Informativos. Protocolo de Kyoto. Colombia. Consultado Junio 2008. Disponible en: www.comunidadandina.org.

Cubero, J; Rojas, S. (1999). Fijación de carbono en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Heredia (Costa Rica). Tesis. Lic. Cs. Forestales Universidad Nacional. 93 p.

Daigneau, E. (2013). iTree calculates the economic worth of urban canopies down to the dollar. *Governing*. The states and localities. 2013. Revista. <http://www.governing.com/topics/urban/gov-itree-calculates-trees-economic-worth.html>.

Dawidson, E y Nilsson, C., (2000). Soil Organic Carbon in Upper East Region, Ghana – Measurements and Modelling. Department of Physical Geography Lund University Sölvegatan. Lund Sweden.

Eguren, L. (2004). El Mercado de Carbono en América Latina y el Caribe: Balance y perspectivas. Serie N° 83. Publicación de las Naciones Unidas. Santiago de Chile. Chile 82 p.

EPA (2016). (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América). Global Greenhouse Gas Emissions Data. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>

EPA (2020) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América). Descripción general de los gases de efecto invernadero. Disponible en <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>

FAO. Food and Agricultural Organization (2004). Unified Bioenergy Terminology (UBET) 2004. 58 pp.

FAO. (2016). Beneficios del arbolado urbano. Disponible en: <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/411598/>

FAO 2020. Mercados de carbono: Que tipos existen y cómo funcionan. Disponible en <http://www.fao.org/3/i1632s/i1632s02.pdf>

Ferrini, F; Fini, A. (2011) Sustainable management techniques for trees in the urban areas. Journal of Biodiversity and Ecological Sciences. Vol. 1. N° 1. p 1-20

Finanzas Carbono (2012). Plataforma Finanzas Carbono. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en <http://finanzascarbono.org/mercado-voluntario/>

Fondo Nacional del Ambiente (FONAM). (2014). Mecanismos de Desarrollo Limpio. Consultado 20 Junio 2014. Disponible en : www.fonam.gob.pe.

Fondo Nacional del Ambiente (FONAM). (2016). Secuestro de carbono. Disponible en: <http://fonamperu.org/web/>

Fonseca, W et al (2011) Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. Forest ecology and management 262 (2011) 1400-1408.

Francis, J. (2000). Estimating Biomass and Carbon Content of Saplings in Puerto Rican Secondary Forests. Caribbean Journal of Science. 36 (3-4): 346-350.

Fritzens et al (2014). Crescimento da *Grevillea robusta* em diferentes sítios edafoclimáticos no Estado do Paraná. Scientia Forestalis. v. 42, n. 103, p. 383-392.

G Sandhya Kiran et al. (2011) Carbon sequestration by urban trees on roadsides of Dadodara city . International Journal of Engineering Science and Technology. Vol. 3 No. 4 Apr 2011. P 3066-3070.

Gann, S.B (2003). A Methodology for Inventorying Stored Carbon in an Urban Forest. Tesis para optar el grado de *Master of Forestry* en el Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia. Virginia, Estados Unidos de Norteamérica.

Gayoso, J; Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Bosque, Vol. 26 N° 2, agosto 2005, pp. 33-38.

Gayoso, J; Guerra, J; Alarcon, D. (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia, Chile. s.e. 157 p.

Gonzalez Z, M (2008). Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis MgSc en Manejo y conservación de bosques naturales y biodiversidad. CATIE. Costa Rica.

Guigon, P. (2010), “Voluntary Carbon Markets: How Can They Serve Climate Change Policies”, OECD Environmental Working Paper No. 19, 2010, OECD publishing, © OECD. doi: 10.1787/5km975th0z6h-en

Gujarati, D y Porter, D. (2010). Econometría. Ed. McGraw-Hill. 5° Edición. Mexico D.F

Intergovernmental Panel of Climate Change. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report on the Intergovernmental Panel on Climatic Change. Estados Unidos. Cambridge University Press. 572 p.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (2000). Manual para el sector del uso de la tierra cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). Disponible en: https://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_natcom/training_material/methodological_documents/application/pdf/11-bis-handbook-on-lulucf-sector.pdf.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (2001). Resumen Técnico del Grupo de Trabajo I del IPCC. Noruega. Consultado 15 de Junio 2007. Disponible en: www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/pdf.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Consultado el 05 Setiembre del 2010. Disponible en: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/Glossary_Acronyms_BasicInfo/Glossary.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. London, UK: Cambridge University Press. Disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Consultado el 05 de noviembre 2015. Disponible en: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Johnson, A; Gerhold, H. (2001). Carbon storage by utility compatible trees. *Journal of Arboriculture* 27(2): March 2001

Jenkins, J; C., Chojnacky, D., Heath, L; Richard B, (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49,12-35.

Krisdianto et al (2012). Standing carbon in an urban green space and its contribution to the reduction of the thermal discomfort index: A case study in the city of Bamjarbaru, Indonesia. *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 2, Issue 4, April 2012. Disponible en: http://www.ijsrp.org/research_paper_apr2012/ijsrp-apr-2012-61.pdf

Losi, C.J. Siccama, T.G. Condit, R. Morales, J,E (2003). Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest ecology and management*. 184 (1-3) 355-368.

Lu,D.S (2006) The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. 27 (7): 1297-1328.

Martin, A; Thomas, S. 2011. Reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS One* v.6(8).

McHale, M.R et al. 2009. Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosystems* (2009) 12:95–113.

McPherson, E.G; Simpson, J.R. (1999). Carbon dioxide reduction through urban forestry: Guidelines for professional and volunteer tree planters. (General Technical Report PSW-GTR-171). Disponible en Servicio Forestal de los Estados Unidos: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/6779>

McPherson, E.G. (1998). Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 24(4), 215-223.

Merino, A; Rey, C; Branas, J; Rodriguez, R. (2003). Biomasa arborea y acumulacion de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigacion agraria: Sistemas y recursos forestales*. 12 (2): 85 – 98.

Ministerio de Medio Ambiente de España (2007). Sumideros de carbono. Consultado el 25 Junio del 2007. Disponible en www.mma.es.

Ministerio de Ambiente de Perú (2012). Inventario Nacional de gases de efecto invernadero 2012. Disponible en: <http://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2012/>

Ministerio de Ambiente de Perú (2016). Resolución Ministerial RM-187-2016 MINAM. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%C2%B0-187-2016-MINAM-y-anexo.pdf>

Ministerio del Ambiente, Ministerio de Relaciones Exteriores, Ministerio de Economía y Finanzas y CEPLAN. (2009). Planificación ante el cambio climático – PlanCC. Disponible en: http://www.planccperu.org/IMG/pdf/actualizacion_del_inventario_30-09-2013.pdf.

Montagu, K.D. Duttmer, K. Barton, C.V. Cowir, A.L (2005). Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration: An example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. *Forest ecology and Management*. 204 (1) 115-129.

Moura-Costa. (2001). Convención sobre el Clima y el Mercado de Contrapartidas de las emisiones de carbono basadas en actividades forestales. *Revista Unasylya* 206 LII (3) 12-14

Nova, J. (2012). Global Carbon Market Hits \$176 Billion in 2011. Disponible en: <https://wattsupwiththat.com/2012/06/06/global-carbon-market-expected-to-crash-already-loses-half-of-its-value-since-2011-from-18-to-less-than-10-in-2012/>

Navarro, M. (2011). Determinación de la fracción de carbono y peso específico básico de cuatro especies forestales en diferentes estadios sucesionales del Corredor Bilógico Osa, Costa Rica.

Nowak, D.J. (1994) *Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Chicago's Urban Forest*. In: *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech. Rep. NE-186. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 83-94. 1994.

Nowak, D; Crane, D. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116 (2002) 381–389.

Nowak, D et al. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution* 178 (2013) 229-236.

Nowak, D; Stevens, J; C., Sisinni, S.M., y Luley, C.J. (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*, 28(3), 113-122.

Nowak, D; Gregory, E; Rowntree, R. (1994). Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. General technical report NE 186. Forest Service. Estados Unidos.

Nowak et al (2007). Assessing urban forest effects and values. USDA y Servicio Forestal de los Estados Unidos (UFORE). EEUU.

ONU (2014). ¿Que es la COP?. Disponible en <http://onu.org.pe/cop-20/que-es-la-cop-20/>

Onyekwelu, J. (2004). Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy* 26: 39-46.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2014). Boletín Annual OMM N° 10. Boletín sobre los gases de efecto invernadero - N°10 - Edición para el Cumbre sobre el Clima: Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2013.

Overman, J; Witte, H; Saldarriaga, J. (1994). Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*. 10: 218 – 297.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2007). Resumen Técnico. *In* Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Pekkarinen, A. (2002). A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes. *International Journal of Remote Sensing* 14, 2817-2836.

Peña, M.A. (2007). Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisen. *Bosque*. 28 (2): 162 – 172.

Pérez, G (2010). Financiamiento de proyectos urbano-ecológicos mediante intercambio de bonos de carbono. *Urbano*, núm. 22, octubre, 2010, pp. 7-21

Picard N., Saint-André L., Henry M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223 págs.

Regina, S. (2000). Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata, Salamanca, Spain. *Forest Ecology Management*. 132: 127 – 141.

Reynel, C y J, Marcelo (2009). Árboles de los ecosistemas forestales andinos: Manual de Identificación de especies. Serie Investigación y Sistematización N° 9. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION. Lima.

Rojo Martínez, G. E.; Jasso Mata, J.; Velásquez Martínez, A. (2003). Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global *Revista Chapingo*. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol 9(1), Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México.

Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 79 p.

Seeberg-Elverfeldt, C. (2010). Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Documento de trabajo. Medio ambiente y gestión de los recursos naturales. N° 34. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Schlegel, B; Gayoso, J; Guerra, J. (2002). Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. s.e. 17p.

Segura, M. (1999). Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica Tes. Lic. Cs. Forestales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica 127 p

Segura, M. 1999 (a). Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación de Cordillera Volcánica Central Costa Rica. Tesis para optar grado de Mg. Sc. CATIE. Costa Rica.

Segura et al. (2000). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* n°30. p.23-28.

Segura, N; Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa y carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas* n°46. P 89-96.

SERPAR. (Servicio de Parques de Lima) (2015). Arborización. Disponible en <http://www.serpar.gob.pe/arborizacion/>.

Slijepcevic, A. (2001). Loss of carbon during controlled regeneration burns in *Eucalyptus oblique*. *Tasforests* 13: 281-290.

Solari, S; Román F, Lerner T. (2008). “Árboles de Lima: Guía práctica de arboricultura urbana”. Lima: ptyx editores, 98 p.

Soriano- Luna et al. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* vol 49 n°4. Mexico.

Troxel, B., et al. (2013). Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. *Urban Forestry & Urban Greening*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2013.02.006>.

Universidad Nacional Agraria La Molina (2015). Jardín Botánico-Clima del distrito La Molina. Disponible en: http://www.lamolina.edu.pe/facultad/ciencias/cbiologia/jardin_botanico/Ubicacion.html

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2007). *Uniting on climate change*. Consultado el 13 de marzo 2015. Disponible en: http://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_eng.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change (2013). *Afforestation and Reforestation Projects under the Clean Development Mechanism: A Reference Manual*. Disponible en: http://unfccc.int/resource/docs/publications/cdm_afforestation_bro_web.pdf

UNEP (2014). *Global Environmental Outlook*. Disponible en: <http://www.unep.org/GEO/geo3/spanish/050.htm>

Ulrich, R.S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224, 420-421.

Ulrich, R. (1986). Human responses to vegetation and landscape. *Landscape and Urban Planning*, 13, 29-44.

Walsh, A. (2012). Potential Urban Forest Carbon Sequestration and Storage Capacities in Burnside Industrial Park, Nova Scotia. Tesis Maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad Dalhousie Canadá.

Waran, A; Patwardhan , A. (2001) Urban carbon burden of Pune City : A case study from India. Masters thesis submitted to Univ. of Pune. (Unpubl.). Disponible en <http://www.ankurpatwardhan.com/carbonsequestration.pdf>.

Yin, W; Yin, M; Zhao, L; Yang, L. (2012). Research on the Measurement of Carbon Storage in Plantation Tree Trunks Based on the Carbon Storage Dynamic Analysis Method. International Journal of Forestry Research Volume 2012, Article ID 626149.

Zianis, D; Mencuccini, M. (2003). One simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest ecology and Management*. 187: 311-332.

ANEXOS

Resultados del peso húmedo total (Pht), contenido de humedad (CH) y biomasa seca,
para la especie *T. stans*

Fuste			Ramas			Hojas		
Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (KG)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (KG)	CH (B.seca)	Biomasa (kg)
119.07	93.421	61.56	143.28	118.098	65.70	14.78	144.4	6.05
19.058	119.376	8.69	13.99	117.095	6.44	5.76	212	1.85
22.54	111.35	10.66	33.39	132.91	14.34	8.22	212	2.63
9.88	104.76	4.83	30.78	115.92	14.26	4.82	212	1.54
78.81	91.985	41.05	82.96	110	39.50	8.19	212.5	2.62
2.76	111.56	1.30	0.63	212.86	0.20	0.16	250	0.05
3.89	111.18	1.84	1.3	114.99	0.60	0.502	340.18	0.11
8.51	104.35	4.16	2.68	115.00	1.25	0.96	250.00	0.27
85.74	92.58	44.52	85.93	112.71	40.39	4.80	155.28	1.88
46.87	86.94	25.07	70.29	123.84	31.40	6.08	142.50	2.51
17.51	83.76	9.53	30.19	101.67	14.97	2.34	270.80	0.63
18.94	78.96	10.58	76.96	119.27	35.10	4.16	247.66	1.20
27.71	90.92	14.52	39.34	120.59	17.83	3.52	212.00	1.13
98.34	83.335	53.64	98.75	104.93	48.19	4.50	212	1.44
2.57	122.89	1.15	0.834	151.00	0.33	0.38	298.82	0.10

Resultados del peso húmedo total (Pht), contenido de humedad (CH) y biomasa seca,
para la especie *G. robusta*

Fuste			Ramas			Hojas		
Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)
263.57	92.59	136.86	58.6456	89.273	30.98	8.46	101.23	4.20
231.99	94.85	119.07	54.139	89.31	28.60	13.64	102.24	6.74
263.36	92.84	136.57	67.446	92.48	35.04	16.64	97.24	8.44
189.242	95.30	96.90	60.536	91.48	31.61	7.95	94.92	4.08
116.21	88.27	61.72	9.69	90.44	5.09	2.50	88.31	1.33
189.027	96.41	96.24	31.294	94	16.13	9.24	85.45	4.98
55.1945	80.27	30.62	10.848	72.02	6.31	2.9	97.97	1.46
104.83	85.16	56.62	16.53	79.02	9.23	2.00	97.00	1.02
76.82	93.42	39.71	10.99	56.22	7.03	2.20	97.00	1.12
20.90	79.16	11.66	2.78	61.15	1.73	2.06	97.00	1.05
27.02	83.55	14.72	6.75	94.29	3.48	4.42	141.98	1.83
7.94	79.07	4.43	0.76	86.63	0.41	0.96	110.00	0.46
6.08	91.72	3.17	2.03	87.77	1.08	1.02	130.02	0.44
1.15	128.34	0.50	0.113	87	0.06	0.95	110	0.45
3.15	94.84	1.62	3.876	124.54	1.73	2.44	171.54	0.90

ANEXO 1 (continuación)

Resultados del peso húmedo total (Pht), contenido de humedad (CH) y biomasa seca, para la especie *S. molle*

Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)	Pht (kg)	CH (%)	Biomasa (kg)
95.543	156.54	37.24	218.667	169.200	81.23	10.54	218.8	3.31
58.70	168.03	21.90	42.735	179.33	15.30	4.94	209.9	1.59
51.36	167.20	19.22	33.663	158.54	13.02	4.72	215	1.50
113.557	180.59	40.47	39.898	179.74	14.26	12.18	234.4	3.64
77.27	190.85	26.57	113.76	191.62	39.01	5.83	236.96	1.73
88.15	189.00	30.50	78	188.2	27.06	8.33	233.2	2.50
33.291	182.25	11.79	36.709	185.26	12.87	7.88	216.67	2.49
28.815	174.40	10.50	26.09	197.44	8.77	4.82	235.11	1.44
13.14	148.16	5.29	14.83	160.99	5.68	1.23	235.00	0.37
2.64	162.20	1.01	2.92	166.32	1.10	1.36	238.18	0.40
0.91	204.20	0.30	1.28	208.71	0.42	0.35	243.75	0.10
15.87	153.91	6.25	16.41	178.20	5.90	2.36	290.00	0.61
9.32	191.82	3.20	5.77	187.28	2.01	1.24	210.13	0.40
0.39	199.17	0.13	0.09	187.00	0.03	0.16	277.03	0.04

ANEXO 2

Estadísticas descriptivas para la biomasa aérea de *Tecoma stans*

Variable	B. Total	B. fuste	B. ramas	B. hojas
Media	43.18	19.54	22.03	1.60
Mediana	27.64	10.58	14.97	1.44
L. máximo	133.30	61.56	6.05	65.70
L. mínimo	1.55	1.15	0.05	0.20
Desv. Estandar	41.30	20.50	20.28	1.53
Skewness	0.84	0.95	0.63	1.58
Curtosis	2.55	2.40	2.38	5.75
Jarque-Bera	1.87	2.50	1.23	11.01
Probability	0.39	0.29	0.54	0.00
Variables	B. total	B. fuste	B. ramas	B. hojas
Observaciones	15	15	15	15
Media	68.49	54.03	11.90	2.57
Median	47.87	39.71	6.31	1.33
L. máximo	180.05	136.86	35.04	8.44
L. mínimo	1.02	0.50	0.06	0.44
Std. Dev.	65.68	50.95	12.99	2.52
Skewness	0.55	0.48	0.81	1.15

Estadísticas descriptivas para la Biomasa aérea de *Grevillea robusta*

Curtosis	1.78	1.73	1.96	3.08
Jarque-Bera	1.70	1.58	2.31	3.33
Probability	0.43	0.45	0.32	0.19
Observations	15.00	15.00	15.00	15.00

Estadísticas descriptivas para la Biomasa aérea de *Schinus molle*

Variables	B. total	B. fuste	B. ramas	B. hojas
Media	31.17	14.14	15.35	1.68
Median	20.71	10.50	8.77	1.44
L. máximo	121.78	40.47	81.23	4.72
L. mínimo	0.20	0.13	0.03	0.04
Std. Dev.	34.79	13.87	22.32	1.47
Skewness	1.44	0.74	2.22	0.75
Curtosis	4.49	2.25	7.04	2.45
Jarque-Bera	5.70	1.50	19.53	1.39
Probability	0.06	0.47	0.00	0.50
Observations	13.00	13.00	13.00	13.00

ANEXO 3

Estadísticas descriptivas para el carbono almacenado en las especies en estudio

Tecoma stans

	C. C Total	C. C fuste	C.C ramas	C.C Hojas
Media	21.95689	9.817479	11.32596	0.813449
Mediana	14.06607	5.317018	7.695527	0.733006
Maximum	67.77081	30.92856	33.76882	3.073428
Minimum	0.782186	0.580202	0.103508	0.023233
Std. Dev.	20.98594	10.30064	10.42664	0.778517
CV	95.5779257	104.921437	92.0596576	95.7056927
Skewness	0.834196	0.952955	0.629862	1.583957
Kurtosis	2.549257	2.398266	2.378293	5.752047
Jarque-Bera	1.866687	2.49661	1.23339	11.0059
Probability	0.393237	0.286991	0.539725	0.004075
Observations	15	15	15	15

G. robusta

	C. C total	C. C fuste	C.C ramas	C.C hojas
Mean	35.05747	27.55998	6.188393	1.309097
Median	24.48616	20.25865	3.279247	0.677224
Maximum	92.19055	69.81215	18.22107	4.303524
Minimum	0.519327	0.257139	0.031422	0.226204
Std. Dev.	33.62892	25.98917	6.752574	1.286468

CV	95.9251195	94.300395	109.116761	98.2714039
Skewness	0.554109	0.479081	0.808958	1.153315
Kurtosis	1.778016	1.730831	1.9632	3.076488
Jarque-Bera	1.70087	1.580541	2.30788	3.328996
Probability	0.427229	0.453722	0.315392	0.189286
Observations	15	15	15	15

S. molle

	C. C total	C. C fuste	C.C ramas	C.C hojas
Mean	15.34618	7.027009	7.649987	0.669186
Median	11.1431	5.11592	5.1128	0.683851
Maximum	57.01374	18.57246	38.38284	1.696312
Minimum	0.094007	0.059425	0.014818	0.019764
Std. Dev.	16.04484	6.434041	10.23976	0.554334
CV	104.552664	91.5615876	133.853299	82.8370588
Skewness	1.280025	0.52865	2.126814	0.498875
Kurtosis	4.144048	1.904336	6.922613	2.039862
Jarque-Bera	4.586574	1.352378	19.53014	1.118466
Probability	0.100934	0.508551	0.000057	0.571647
Observations	14	14	14	14