

Ecuaciones alométricas para la estimación de la captura de carbono almacenado en árboles

Allometric equations for estimating the carbon sequestration stored in trees

Derlyn J. Solano¹; Jairo Mora-Delgado² y Guillermo Duque³

¹. Consultora Forestal. Universidad del Valle, Cali; ² Profesor Titular, Grupo de Investigación Sistemas Agroforestales Pecuarios, Universidad del Tolima, Ibagué. ³ Profesor asociado, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

hannasoll33@hotmail.com

Resumen

Los bosques contribuyen significativamente en la absorción de CO₂ y es indispensable conocerla con el fin de conocer e incrementar las estrategias de conservación de los bosques, pero se requiere aumentar estudios de coberturas forestales urbanas, que son sumideros de carbono para el entorno que los rodea. El objetivo fue revisar modelos alométricos más utilizados para la determinación de la captura de carbono en arreglos de árboles en línea en zonas urbanas. Se denota que no hay profundización aún sobre las coberturas forestales urbanas, si bien matemáticamente es posible llegar a la precisión de los valores de biomasa y carbono, este no ha sido aplicado a escala más pequeña, como los ecosistemas urbanos, es decir se hace necesario elaborar los modelos más específicos, ecuaciones locales.

Palabras clave: belleza escénica; stock de carbono; zonas urbanas

Abstract

Forests contribute significantly to the absorption of CO₂ and it is essential to know it in order to understand and increase forest conservation strategies, but it is necessary to increase studies of urban forest covers, which are carbon sinks for the environment that surrounds them. The objective was to review allometric models most used for the determination of carbon sequestration in line tree arrangements in urban areas. It is denoted that there is no deepening yet on urban forest cover, although mathematically it is possible to arrive at the precision of the biomass and carbon values, this has not been applied on a smaller scale, such as urban ecosystems, that is, it is necessary develop the most specific models, local equations.

Keywords: scenic beauty; carbon stock; urban areas.

Introducción

A través de la historia, la sociedad en su afán de satisfacer sus necesidades individuales ha venido generando grandes impactos ambientales, no solo en su entorno sino también a una escala global. Estas acciones, que se han visto reflejadas en la tala indiscriminada de la cobertura forestal, han generado una pérdida significativa de la biodiversidad en los bosques del mundo, provocando, por tanto, transformaciones en el ambiente desde todas sus escalas y variables y contribuyendo significativamente en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que aceleran el cambio climático en el planeta. A nivel mundial existe la preocupación por el calentamiento de la atmósfera producto del aumento de la concentración de los GEI de origen antropogénico, principalmente el CO_2 que se ha venido incrementando, por lo que entran a jugar un papel preponderante en el ciclo del mismo los bosques y los sistemas agroforestales (Acosta, Quednow, Etchevers y Monreal, 2001).

“El dióxido de carbono es uno de los gases traza más comunes e importantes en el sistema atmósfera-océano-Tierra; es el más importante GEI asociado a actividades humanas y el segundo gas más importante en el calentamiento global después del vapor de agua, tiene fuentes antropogénicas y naturales” (León y Benevidez, 2007). Se estima que la actividad humana está generando casi 40.000 millones de toneladas de este contaminante al aire cada año, una cantidad impactante y dicha concentración se ha elevado hasta en un 43% desde la Revolución Industrial (Gillis, 2017).

De acuerdo con lo anterior, una de las causas de dicho incremento se centra en la desaparición de la cobertura forestal en el mundo, transformando dichas zonas a expansión agrícola o minera. En el período 2000-2010, se registró una pérdida neta de

bosques de 7 millones de ha anual en los países del trópico y un incremento neto de las zonas de expansión agrícola de 6 millones de ha anual (FAO, 2012a); dichas pérdidas se presentaron en mayor proporción en los países en desarrollo. Es preciso señalar, que los bosques son los almacenadores de carbono por excelencia, sin embargo, se han venido interviniendo a pasos agigantados, por lo que se ha incrementado la cantidad de emisiones a la atmósfera (Vargas, A. & Yáñez, 2004).

Es importante mencionar que Colombia es un país tan biodiverso, que ocupa los primeros puestos en el tema y sus bosques no han sido ajenos a la intervención, puesto que el país pierde 48.000 ha de bosque al año lo que pone al mismo en un estado crítico (Acosta, Quednow, Etchevers y Monreal, 2001). Para el 2017, Colombia perdió 219.973 Ha de bosque natural (El tiempo, 2018). Si bien, Colombia es un país en desarrollo, con proceso de industrialización y expansión urbana, aún faltan acciones efectivas para contrarrestar la deforestación. Esto se puede evidenciar en la cifra de tala de bosque que aumentó en un 44% entre el 2015 y 2016 (Zimmermann; SINCHI, 2018). Está claro que, al realizar esos cambios abruptos del uso del suelo, retirando la cobertura arbórea y estableciendo cultivos y/o ganado, se genera una transformación del mismo, aún más que en las ciudades principales bajo la demanda mencionada en líneas anteriores, no se maneja bajo una planificación y diseño ambiental adecuado (FAO, 2010).

El panorama actual en el país no es alentador, ya que para el período 2005-2010, se identificaron 1.409.868ha deforestadas es decir un promedio de 281.947ha/año (IDEAM; MINAMBIENTE, 2017). y uno de los ecosistemas más impactados, aquel que se ha llevado la peor parte corresponde al Bosque Seco Tropical, dicho bosque abarcaba más de 9 millones de hectáreas, quedando actualmente apenas un 8%, por lo cual es uno

de los ecosistemas más amenazados en el país (Instituto Alexander Von Humboldt, 2014). De acuerdo a lo anterior, se hace necesario realizar diferentes acciones con el fin de conocer cuál es el aporte de la cobertura forestal al entorno y contribuir en la conservación y preservación del recurso forestal. De esta manera, han surgido estrategias de monitoreo de los bosques, a través del conocimiento de las reservas de carbono y su biomasa.

En general existen dos métodos para medir y estimar la biomasa aérea, el método directo e indirecto. El primero se usa con el fin de construir la ecuación alométrica y encontrar los factores de expansión para el cálculo de la biomasa, cuyas actividades incluyen y consiste en cosechar la biomasa de todos los árboles de la zona objeto de estudio, secarla y pesarla (Fernández, 2017). El método indirecto por su parte, consiste en utilizar dichas ecuaciones alométricas, que fueron generadas a partir del método directo y solo es necesario medir las variables más relevantes en campo (Alvarez et al., 2011; Phillips et al., 2011). Las ecuaciones alométricas, por tanto, se vuelven un medio para llegar al conocimiento de reserva que resguardan las coberturas boscosas; tanto en volumen de madera y carbono almacenado.

Conocer las toneladas de carbono que una cobertura boscosa puede capturar y contribuir a la toma de decisiones, incluyendo las estrategias de conservación y acciones de mitigación “que permitan alcanzar los nuevos desafíos globales que se plantean en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como alcanzar las metas de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero presentadas en el Acuerdo de París” (Fernández, 2017). Por otro lado, el conocimiento sobre el potencial de captura de la vegetación urbana funciona como factor comparativo con relación al CO₂ emitido por los vehículos automotores en las ciudades; dicha relación para establecer un balance ha sido limitada y escasa, pero se hace necesario

para formular medidas de mitigación ante el cambio climático (Domínguez, 2016).

Actualmente, el desarrollo de modelos alométricos se convierte en una herramienta básica y eficiente para conocer la biomasa aérea y el contenido de carbono de los individuos forestales y los bosques en general, dando cumplimiento a la entrega de informes ante la convención marco de la Naciones Unidas y a las directrices del IPCC (Fernández, 2017). Por tanto, se han venido generando diversos análisis en la estimación de las reservas de carbono, de tal forma que contribuyan en el proceso de conservación de los bosques y por supuesto de las especies de interés en cada zona. Pese a lo anterior, muchas de estas aproximaciones usan los métodos destructivos, tratando de encontrar cuál es la cantidad de carbono que absorbe la cobertura forestal, según la especie en estudio y mostrar al mundo la importancia de su conservación y manejo. Por ejemplo, el trabajo desarrollado por Díaz-Franco et al. (2007) realizaron la determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham, a través del trozado de las partes de los individuos forestales de la especie y pesando las muestras en laboratorio, obteniendo de esta manera la estimación de las reservas de carbono. Sin embargo, si la necesidad surge con el propósito de conservar e incentivar el establecimiento de especies de gran importancia, por ejemplo, especies en vía de extinción, dicho procedimiento no resulta adecuado, ya que intervenirlos no sería una opción correcta.

Tal es el caso de “los árboles notables, los cuales han adquirido un reconocimiento de la comunidad por su porte, tamaño, volumen, longevidad, valores escénicos, importancia botánica o representan puntos de referencia e identidad para la ciudad, los cuales han sido integrados al paisaje urbano a través de la historia y revisten importancia desde el punto de vista ambiental, paisajístico, urbanístico,

estético o afectivo” baja a una escala local, las ciudades deben buscar mantener un equilibrio (POT, 2015; Concejo de Santiago de Cali, 2013).

De acuerdo con lo anterior, se menciona que en el departamento del Valle del Cauca, particularmente, el municipio de Santiago de Cali, se caracteriza por tener una de las escasas áreas que quedan del ecosistema de Bosque Seco Tropical en el país, encontrándose en convivencia con la población circundante, limitada solo en pequeños relictos de bosque fragmentados por la avanzada del desarrollo y expansión urbana (Andrade, 2011).

En dicho municipio a finales del 2016 fueron determinados bajo un proyecto piloto de la Autoridad ambiental DAGMA y la Fundación Fun&agua, doscientos noventa y seis (296) individuos forestales como árboles notables, bajo un contexto de participación ciudadana para incentivar la importancia del cuidado y conservación de los mismos. Cabe resaltar que, de acuerdo con los resultados arrojados en el informe del censo arbóreo, la ciudad presenta un déficit de cobertura forestal puesto que, según la OMS, la relación adecuada es de tres árboles por persona para generar un equilibrio en el ecosistema y generar un bienestar para la población. Sin embargo, en el municipio sólo las comunas del sur, como la 17, 19 y 22 alcanzan a aproximarse a dichas cifras. A su vez, en la comuna 17 aún se conserva uno de los pocos relictos de bosque seco tropical, que aguarda el municipio, dicha área corresponde a la sede Meléndez de la Universidad del Valle con una extensión de 100 ha, que cuenta con alrededor de cinco mil individuos forestales de diversas especies, incluyendo aquellas que hacen parte de la declaración como notables de la Autoridad Ambiental.

Por tanto, surge la necesidad de determinar estrategias que contribuyan en la conservación de estos ecosistemas, demostrando su importancia en el proceso de

captura de carbono y como se mencionó en líneas anteriores, dichos estudios se han llevado a cabo a través de los métodos destructivos en la mayoría de los casos, este procedimiento no es pertinente cuando se trata de analizar especies endémicas, especies en peligro de extinción y árboles declarados como notables, y queda sujeto a las intervenciones silviculturales de tala que realicen en el municipio a través de las resoluciones de intervenciones silviculturales que le otorgan las Entidades Ambientales a los proyectos de la misma. Por lo anterior, las ecuaciones alométricas en las que se relacionan las variables dasométricas de los árboles, sirven de medio para llegar a la obtención de dicha estimación, ya que al conocer dicho valor en las especies permitirá determinar criterios de manejo, conservación e incremento en el municipio.

Dinámica de la captura de carbono.

Uno de los mayores efectos de gases invernadero que mayor impulsa el Calentamiento Global es el CO₂ aumentando tras la tala indiscriminada de la cobertura forestal en el mundo, acercándose a los 13 millones de hectáreas que se pierden (ONU, 2017). En el momento en que la cobertura forestal absorbe el dióxido de carbono en sus componentes vivos, lo reservan en su biomasa y parte lo transfieren a la tierra vegetal y al suelo por descomposición, generando de esta manera las reservas de carbono (Vásquez & Arellano, 2012).

Los árboles, utilizan la fotosíntesis para convertir el dióxido de carbono (CO₂) en azúcar, celulosa y otros carbohidratos que contienen carbono. Los árboles son únicos en su capacidad de bloquear grandes cantidades de carbono en su madera, y seguir añadiendo carbono a medida que crecen, un bosque sano típicamente almacena el carbono a un ritmo mayor que el que libera carbón, dicho almacenamiento corresponde aproximadamente a un billón de toneladas de

CO₂ (Mota, et al., s.f.). Cabe indicar, que el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, es una preocupación mundial y se considera como uno de los seis principales gases que intervienen en el efecto invernadero (GEI), contribuyendo en el cambio climático (Concha & Alegre, 2007).

Ha sido de gran interés conocer cuál es esa cantidad de carbono que capturan los individuos forestales, debido a su funcionalidad anteriormente descrita, pues teniendo en cuenta que cada vez es mayor la pérdida de los bosques en el mundo, se hace necesario estimar esa aproximación para contribuir manera en la conservación y restauración de los bosques, evidenciando su importancia en el proceso de almacenamiento de carbono. Se registra por ejemplo para el periodo 2000-2010, pérdida neta de los bosques de 7 millones de hectáreas anuales en los países del trópico, y en contraste se observa un gran aumento en extensión agrícola de millones anuales (FAO, 2012a), perdiéndose entonces la biodiversidad en los mismos. Datos precisos sobre las dimensiones biofísicas de los árboles individuales, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura, el diámetro de la corona y la biomasa son esenciales para cuantificar el valor económico, los beneficios sociales y los servicios ecológicos del bosque urbano. En las últimas décadas, numerosos estudios han cuantificado los beneficios de los bosques urbanos (Lee, Ko, & Mcpherson, 2016).

Debido al proceso para cuantificar la cantidad de carbono a través de las plantaciones establecidas, se deben contar con herramientas propicias, tales como las ecuaciones alométricas y modelos con el fin de identificar la cantidad de biomasa, puesto que determinan de manera precisa la biomasa en cada compartimiento del individuo forestal. De igual forma, también se utiliza los muestreos y análisis de las mismas para determinarlo en cada especie. Por lo tanto, se

hace necesario trabajar sobre las estrategias para cuantificar esas reservas, sobre todo en aquellos tipos de cobertura que vienen siendo degradados a mayor escala y en individuos forestales de gran importancia ecológica, cultural, por lo que dichas estrategias se deben direccionar en proceso indirecto que no intervengan dichos árboles.

Potencial e importancia del bosque seco tropical.

En el mundo existe la clasificación de los tipos de bosques, según las zonas de vida de Holdridge, cuya diferenciación se realiza de acuerdo con los aspectos de temperatura, pluviosidad, evapotranspiración, etc (Holdrige, 2000). De acuerdo con los tipos de cobertura boscosa en el mundo, existe entre estos, el bosque seco tropical, que se encuentran ubicados en las zonas más planas de las regiones tropicales, y en Colombia, dicho bosque abarcaba más de 9 millones de hectáreas, de las cuales quedan en la actualidad apenas un 8%, por lo cual es uno de los ecosistemas más amenazados en el país. Dicha situación se enmarca en que estos existen en zonas con suelos relativamente fértiles, que han sido altamente intervenidos para la producción agrícola y ganadera, la minería, el desarrollo urbano y el turismo. Esta transformación es una amenaza para la biodiversidad asociada al bosque seco y los servicios que presta este bosque” (Acevedo, 2016; Instituto Von Humboldt, 2014).

Revisando entonces el panorama del bosque seco tropical, por ejemplo, en el Valle medio del río Cauca, existen aún algunos parches del mismo, pero no alcanza más de 1.900 ha, entre los límites de los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, debieron de existir aproximadamente 63.000 has. “Entre 1957 y 1986 el área ocupada por los bosques secos se redujo en un 66% debido principalmente a la expansión de los ingenios azucareros” (Banco de Occidente, 2006; Instituto Alexander Von Humboldt, 1998).

Es preciso indicar, que dicho panorama actual no es alentador, porque según el informe entregado por el Instituto Von Humboldt en apoyo con la Universidad Javeriana y Conservación Internacional de Colombia en el año 2017, de los 81 ecosistemas que tiene el país, el 46% están en Peligro y Peligro Crítico, es decir, en vía de su desaparición total, y la peor parte se la ha llevado el bosque seco tropical (Instituto Alexander von Humboldt, 2017). Esta crítica situación generó que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible lo declarara estratégico para la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, aún persisten los proyectos que están afectando lo poco que queda, como en el caso de la hidroeléctrica del Quimbo en el Huila o Ituango en Antioquia, en donde también se plantea la construcción del embalse Caña fisto, que podría sumarle un enorme impacto ambiental al maltratado bosque seco tropical (Instituto Alexander von Humboldt, 2017).

De acuerdo con las situaciones mencionadas en líneas anteriores, se hace prioritario trabajar sobre dicho ecosistema, señalando, la importancia que este tiene en aras de contribuir a su conservación y restauración, pues como todos los ecosistemas, este cumple valiosos servicios ecosistémicos, como, por ejemplo, la captura de carbono y aún los modelos de la biomasa de los bosques secos en Colombia son escasos. Se pone por caso los resultados obtenidos en el bosque secundario del Parque Natural Regional El Vínculo (Valle del Cauca), donde se registró una biomasa aproximadamente de 88 Ton/ha, incrementando sólo 2 Ton/ha/año (Londoño Lemos V, 2018) y acompañando dichos valores estos bosques secos se “comportan como un sumidero de unas 57,2 toneladas de carbono/Ha, aumentando anualmente debido a que están en periodo de crecimiento y madurez y la mayor parte del carbono almacenado es equivalente al crecimiento de la biomasa aérea posterior a la defoliación” (Zuluaga, 2016).

La biomasa direccionando al carbono.

La biomasa se considera en dos líneas, la primera biomasa aérea y la segunda, biomasa subterránea, aunque la “biomasa aérea total, se refiere al peso seco del material vegetal de los árboles con DAP mayor a 10 cm, incluyendo fustes, corteza, ramas y hojas y la biomasa aérea corresponde a la altura total del árbol, desde el suelo hasta el ápice de la copa” (Dauber, et al. 2000). De esta forma, se señala que la biomasa clasificada como aérea es la que mayor aporta a la biomasa total de la cobertura forestal, aunque indica que la biomasa del suelo y raíces alcanzan a representar hasta un 40 % de la biomasa total del bosque (FAO; Brown, 1997).

De acuerdo con lo anterior, la biomasa aérea se convierte en un valor de gran importancia determinar, es posible calcular ese proceso de captura de carbono en la cobertura forestal, ya que se estima que aproximadamente el 50% de la biomasa lo constituye el carbono por tanto es posible llegar a determinar la cantidad de carbono (Alvarez, 2008). Sin embargo, también es posible la determinación de su valor, a través de la medición de las variables en campo, como son la altura total del individuo forestal y el diámetro a la altura del pecho (DAP), que son fáciles de medir directamente. Cabe señalar, que en diversos “estudios se ha empleado la biomasa de los árboles para estimar su contenido de carbono, a través de la multiplicación de la cantidad disponible en una determinada superficie por un factor que va desde 0,40 hasta el 0,55, ya que varios autores han encontrado que es la proporción de carbono contenido en cualquier especie vegetal” (Díaz-Franco et al., 2007).

Por tanto, “estimar las reservas de biomasa de los bosques es un instrumento útil para conocer la cantidad de carbono que se almacena en las estructuras vivas en un momento dado, y por consiguiente es importante para evaluar su contribución al ciclo del carbono. De ahí el interés por realizar

estimaciones de biomasa en los bosques tropicales” (FAO; Brown, 1997). Es preciso señalar, que una manera de estimar la biomasa es a través de las ecuaciones alométricas que se encuentran integradas por ecuaciones de tipo regresión lineal o no lineal, en las que usan variables medidas en el campo, que son independientes, como es el caso del DAP (diámetro a la altura de pecho, es decir 1,30cm), Ht (altura del árbol), Hc (altura comercial), etc.

Método destructivo y ecuaciones alométricas.

Dada la necesidad de conocer el valor de reserva de carbono de la cobertura forestal, se realiza principalmente un proceso a través de métodos destructivos, que como su nombre lo dice consiste en seleccionar y destruir un árbol en pie y seccionarlo para obtener el peso vivo en campo y el peso seco de cada una de sus partes. Este método genera un valor preciso de la biomasa, al destruir los individuos forestales con el fin de calcular las secciones señaladas en líneas anteriores. “Adicionalmente, el método permite formular relaciones funcionales entre la biomasa y las variables del rodal de fácil medición como el diámetro a la altura del pecho, altura comercial, altura total y otras” (G. Alvarez, 2008). El inconveniente que se presenta con dicho método corresponde a los costos primero en tiempo, por el proceso dedicado para seccionar y pesar cada uno de sus componentes y segundo, el costo económico que esto implica (Gayoso, 2001).

“Los métodos directos son los más comunes ya que tradicionalmente se han usado para la determinación de la biomasa de árboles, no se adecuan al medio ambiente natural pues llevan implícita la tala de muchos árboles, mayores requerimientos de tiempo y laboriosidad para su procedimiento, en este sentido los métodos alométricos y la aplicación de su ecuación permiten obtener estimaciones confiables del contenido de

biomasa para el bosque natural de Colombia” (Fernández, 2017)

El método destructivo es de gran precisión en el momento de estimar biomasa y carbono en la cobertura forestal, también se han venido empleando como alternativa interesante, las ecuaciones alométricas. “Dicho método se ha utilizado para relacionar componentes o variables de difícil medición (biomasa y área foliar), con variables fáciles de medir (altura, diámetro, área basal y área de albura), con el objeto de estimar las primeras variables en función de las segundas; normalmente el parámetro del árbol que más se ha utilizado es el DN” (Díaz-Franco et al., 2007). Las ecuaciones alométricas, corresponde a método numérico rápido, económico y no destructivo que consiste en desarrollar ecuaciones al relacionar diferentes dimensiones de un organismo, una planta, órgano vegetal o plantación (Rodríguez et al., 2012).

Debido a la relevante necesidad de considerar la reserva de carbono, usando la biomasa aérea que se deposita en los bosques, la toma de esta información, sólo se realiza en una décima parte de las parcelas permanentes establecidas en Colombia (Vallejo, et al., 2005), por ejemplo en el departamento del Valle del Cauca, en el bosque seco tropical que queda, sólo ha sido establecida una parcela permanente de monitoreo (Adarve & Torres, 2010). Esto evidencia el déficit del conocimiento en esta zona de vida y de la dinámica de los pocos fragmentos que aún sobreviven en el Valle del Cauca. Por lo anterior, es una necesidad investigar dicha dinámica a largo plazo en el departamento (Cárdenas, 2012).

Panorama general

La sociedad en su afán de satisfacer sus necesidades individuales ha venido generando grandes impactos ambientales, no solo en su entorno sino también a una escala global; estas acciones que se han visto

reflejadas en la tala indiscriminada de la cobertura forestal. Además, se ha generado una pérdida significativa de la biodiversidad que aguardan los bosques del mundo, provocando, por tanto, transformaciones en el ambiente desde todas sus escalas y variables, contribuyendo en los gases de efecto invernadero que aceleran el cambio climático en el planeta. A nivel mundial existe la incertidumbre por el calentamiento de la tierra a causa del incremento en la concentración de los gases de tipo invernadero de origen antrópico, principalmente el CO₂ que se incrementa a pasos agigantados, por lo que juegan un papel elemental en el ciclo del mismo, los bosques (Acosta, Quednow, 2001).

Es preciso señalar, que el CO₂ es uno de los gases de efecto invernadero que contribuye en el calentamiento global, ya que se estima que las actividades humanas generan casi 40.000 millones de toneladas al aire cada año, cifra que viene aumentando hasta en un 43% desde la Revolución Industrial (Gillis, 2017).

De acuerdo con lo anterior, una de las causas de dicho incremento es la desaparición de la cobertura forestal en el mundo, transformadas a zonas agrícolas. En el período 2000-2010, hubo una pérdida neta de bosques de 7 millones de hectáreas en los países tropicales y un aumento de los terrenos agrícolas de 6 millones de hectáreas, dichas pérdidas se presentaron más en los países en desarrollo. Los bosques son los almacenadores de carbono por excelencia, sin embargo, se han intervenido a pasos agigantados, por lo que se ha incrementado la cantidad de emisiones a la atmósfera (FAO, 2012a).

La cantidad de carbono presente en la cobertura forestal, se puede estimar a través de la construcción de modelos alométricos (representación matemática). Dichos modelos se obtienen a través de dos métodos, directo e indirecto. El primero, es utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y

factores de expansión de la biomasa, se cosecha la biomasa de los árboles en interés y se seca y pesa. El método indirecto por su parte, consiste en utilizar dichas ecuaciones alométricas, que fueron generadas a partir del método directo, es decir, solo es necesario medir las variables más relevantes en campo (Phillips et al., 2011). Las ecuaciones alométricas por tanto, son un medio para llegar a la estimación de las reservas de carbono.

Conocer las toneladas de carbono que un bosque puede capturar, es indispensable para que los entes territoriales e instituciones determinen estrategias de conservación y acciones de mitigación a desarrollar en el territorio y que permitan alcanzar los desafíos que se plantean en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las metas de reducción de dichas emisiones, control vehicular, etc., (Domínguez, 2016; Fernández, 2017). Actualmente, la generación de modelos alométricos constituye hasta ahora, una herramienta básica y eficiente para estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono de los árboles, que facilitan la entrega de informes ante la convención marco de la Naciones Unidas y a las directrices del IPCC (Fernández, 2017; Salinas & Hernández, 2008; IPCC, 2014).

Existen diversos análisis en la estimación de las reservas de carbono, muchas de estas aproximaciones pioneras usan los métodos destructivos, con el fin de estimar el carbono que absorbe la cobertura forestal. Determinaron, por ejemplo, ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula Schl. et Cham*, a través del trozado de las partes de los árboles de la especie y pesando las muestras en laboratorio, obteniendo de esta manera, la estimación de las reservas de carbono (Díaz-Franco et al., 2007). Por lo anterior, dichas estimaciones se realizan por medio de modelos alométricos, como alternativa al método destructivo, lo que supone una gran

ventaja al ser eficiente, relacionando matemáticamente las variables dasométricas de la cobertura forestal.

Modelos Alométricos

Un modelo sugiere la imitación de una acción por parte de un objeto. Desde el punto científico y matemático, son representaciones aritméticas, conjunto de proposiciones matemáticas y permite inferir teoremas a partir de suposiciones o postulados. Los modelos poseen estructuras dadas por la teoría, pero creadas para condiciones específicas, que pretenden exponer las características de una situación, explicando los procesos interrelacionados, mediante la utilización de fórmulas matemáticas que simulen el estado actual de un supuesto (Carvajal, 2002).

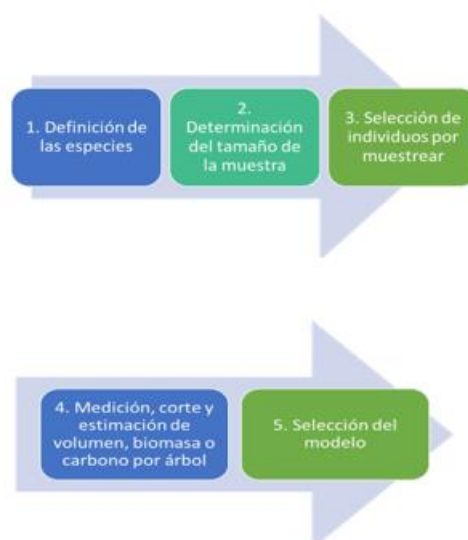
En este sentido, uniendo la alometría se define como las relaciones entre las dimensiones de los organismos y sus cambios en las dimensiones, por ejemplo de un árbol, con respecto a su tamaño total, es decir una ecuación matemática que relaciona la biomasa con variables del árbol, fácilmente medibles en pie (diámetro normal, altura de la copa, altura comercial, altura total (León y Benebidez, 2007; Vallejo-Joyas M.I., Londoño-Vega A.C. López Camacho R., Galeano G., 2005).

Aplicando lo anterior a la cobertura forestal, estos modelos son ecuaciones matemáticas que estiman e incluyen los valores de biomasa y variables como el carbono presente en los árboles y para su solución se requieren de las variables mencionadas, puesto que ayudan a estimar el almacenamiento de carbono (Álvarez, 2008; Segura & Andrade, 2008).

Importancia de los modelos alométricos en la estimación de carbono.

Los árboles almacenan el carbono y lo transforman en partículas de oxígeno liberadas al ambiente, pero al ser talados, se libera dicho CO₂ incrementándose las

concentraciones como Gases de Efecto Invernadero (GEI), alterando el funcionamiento natural del planeta. Por tanto, los bosques naturales son elementales en la mitigación del cambio climático y los modelos alométricos surgen como una herramienta para predecir sus reservas de carbono, ubicadas en la biomasa aérea (tronco, ramas y frutos), la subterránea (raíces), suelo y hojarasca. Su estimación puede ayudar a los países contaminantes para evaluar y corregir sus impactos (Monsalve, 2017).



Fuente (Segura & Andrade, 2008a)

Figura 1. Pasos para determinar el modelo alométrico de la especie en estudio

¿Cómo desarrollar los modelos alométricos?

La estimación de carbono requiere de la selección de las especies de interés, medición de sus variables dasométricas y su relación a través de una ecuación alométrica, analizándola a través de pruebas de supuestos estadísticos, estimación de parámetros de modelos genéricos y la selección depende del

ajuste de datos, comparación con las estimaciones reales, su práctica y la lógica biológica. En el modelo matemático (análisis de regresión) $y = f(x)$, “y” se llama variable dependiente (VBC) y a “x” se le llama variable independiente (dap, h). Los pasos se describen en la figura 1 (Segura & Andrade, 2008a; Verband & Forschungsanstalten, 2001).

se presentan en la Tabla 1 (Rodríguez et al., 2012; Segura & Andrade, 2008a).

En el proceso de selección, se direcciona a la mejor relación entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad; cuando se tienen más parámetros, se ajusta mejor la base de datos, pero pueden ser inestables e implicaría más trabajo de campo, en la medición de otras variables adicionales. Estos modelos pueden ser evaluados de acuerdo con los criterios que

Tabla 1. Criterios de selección para los modelos alométricos.

CRITERIOS	DESCRIPCIÓN
Coefficiente de determinación (R^2)	Proporción de la proporción de la variabilidad total explicada por el modelo (Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., 2008; Segura & Andrade, 2008a).
Coefficiente de determinación ajustado	Permite medir el porcentaje de variación de la variable dependiente, teniendo en cuenta el número de variables incluidas en el modelo (Segura & Andrade, 2008a).
Error Cuadrático Medio de Predicción	Los modelos seleccionados por su mayor capacidad de ajuste son aquellos que expresan el menor valor (Segura & Andrade, 2008a).
Criterio de Información Akaike	Penaliza un exceso de parámetros ajustados (G. Alvarez, 2008).
Criterio de Información Bayesiano	Selección de modelos entre un conjunto finito (Moret, A.; Ruíz, 1998; Segura & Andrade, 2008a).
Criterio de Lógica biológica del modelo	Balance entre la rigurosidad estadística y la practicidad en el uso de los modelos alométricos de VBC, comparando los valores estimados/modelo con los valores que el investigador esperaría (Segura & Andrade, 2008a).

Fuente (Segura & Andrade, 2008b)

Avance en ecuaciones alométricas desarrolladas

De esta manera han surgido diversas ecuaciones alométricas para la estimación de captura de carbono en las diferentes coberturas forestales del mundo, aunque se

encuentran algunos modelos generalizados (Segura & Andrade, 2008a) (Ver Tabla 2).

En África por ejemplo, se generó la ecuación alométrica $\text{Log } Y = -3.284 + 1.708\text{Log}(ct) + 0.327\text{Log}(ht) + 0.735\text{Log}(mcd)$ para captura de carbono en la especie *Jatropha curcas L.* en

la Cuenca de Senegal, usando las variables edad del árbol, altura del árbol (ht), diámetro de la copa (ct) y dap (mcd), para las hojas y fuste, calculando biomasa total, con un R2 de 0.98 y un error medio de 0,06 (Diédhiou et al., 2017).

Por su parte, en el corredor de Beira en Mozambique, usaron la intervención de 155 individuos forestales que eran representativas del tamaño de los árboles, señalando dos modelos ecuaciones alométricas tDW (árbol de kg 1)= 0,1754 * (DBH) 2,33238[2] tDW (árbol de kg 1)=0.08495 * (SDI) 2.3987[3], con el fin de calcular la biomasa, tomando las variables DAP y diámetro del muñón (SDI), y compararon los resultados obtenidos con las ecuaciones alométricas existentes. Señalaron que son más ajustadas. Dichas ecuaciones tuvieron un R2 del 86 y 96% respectivamente. Es preciso señalar, que el carbono comprende el 50% de la biomasa.

Los modelos basados en DAP (DBH) y SDI se pueden utilizar para estimar el AGB total de

los bosques de Miombo de tierras bajas con un alto grado de confiabilidad (Guedes, Siteo, & Olsson, 2018).

Mientras que, en Asia se analizaron los datos de 179 parcelas de muestreo en bosques semiperennifolios de tres provincias de Cambodia, 5.995 árboles con un pecho DAP ≥10 cm, que comprende 79 especies de 38 familias, bajo la ecuación $ABi = 42.69 - 12.800 \times DBHi + 1.424 \times DBH2i$ [4] El total de carbono resultante está altamente correlacionado con el área basal (R2= 0.993) pero no con la densidad del tallo (R2 = 0.153). Utilizaron los valores de las reservas de carbono, estimaron la emisión de carbono debida a la deforestación de los bosques semi-perennes en 8.3 TgCO2 año-1 en Camboya entre 2002 y 2010 (Chheng et al., 2016)

Tabla 2. Descripción de los modelos alométricos más empleados para estimación de VBC.

AUTOR	MODELOS ALOMÉTRICOS
Berkhout	$VBC = a + b * dap$
Kopezky	$VBC = a + b * dap^2$
Hohenadl - Krenn	$VBC = a + b * dap + c * dap^2$
Husch	$Ln VBC = a + b * Ln dap$
Spurr	$VBC = a + b * dap^2 * h$
Stoate	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap^2 * h + d * h$
Meyer	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap * h + d * dap^2 * h$
Schumacher-Hall	$Ln VBC = a + b * Ln dap + c * Ln * h$

Fuente. (Segura & Andrade, 2008a).

VBC = volumen (m3 árbol-1), Biomasa (kg árbol-1), Carbono (kg árbol-1); Dap = diámetro a la altura de pecho (cm); h = altura total o comercial (m); a, b, c, d = parámetros del modelo; Ln= logaritmo base e (Segura & Andrade, 2008a).

Por su parte en Tailandia, se desarrollaron y probaron algunas ecuaciones alométricas generales de biomasa para estimar la biomasa aérea (AGB) de las plantaciones de *Tectona grandis* y *Eucalyptus camaldulensis* (84 conjuntos de datos y 94 respectivamente), a partir de artículos publicados. Las ecuaciones alométricas se probaron usando ANCOVA. Las variables DAP y altura total (H) fueron los mejores parámetros para la estimación de biomasa, de los cuales la combinación simple DAP produjo la mejor estimación. Las ecuaciones alométricas generales que dieron el mejor ajuste ($p < 0.01$) para la estimación de *T. grandis* fueron $AGB = 0.045 (D2 H) 0.921$ y para *E. camaldulensis* fue $AGB = 0.033 (D2H) 0.959$. con un R^2 de 0,975 (Ounban, Puangchit, & Diloksumpun, 2016)

En América latina también se han adelantado avances, por ejemplo, en México cosecharon 103 árboles de cuatro especies con alto potencial para la restauración: *Guazuma ulmifolia*, *Trichospermum mexicanum*, *Inga vera* y *Ochroma pyramidale*. Los mejores predictores de la biomasa fueron el DAP y en la base (DAB) y tuvieron un R^2 mayor a 0.90. Con base en estas relaciones la acumulación promedio de biomasa en plantaciones mono-específicas de dos años de *Inga vera*, *Ochroma*, *Trichospermum* y *Guazuma ulmifolia* se calculó en 6.60, 30.80, 47.62 y 48.12 Mg ha*1 en la construcción de los modelos, por ejemplo, México presentó las ecuaciones alométricas en la Selva Lacandona en México correspondiente a $\alpha + \beta_1 \ln (DAP)$ y $\alpha + \beta_1 \ln (DAB)$ [5], (Douterlungne, et. al, 2013).

Es preciso señalar, que en dicho país también evaluaron en los bosques secos de Sinaloa, 39 individuos forestales, sus datos no eran paramétricos y emplearon la prueba de Kruskal – Wallis con un intervalo de confianza del 95%; mostrando la significancia de estas variables en la producción de biomasa aérea arbórea, tras la ecuación $M = 0,08479 (\rho w^{0,55255D2}, 2435H^{0,4773})$ [6] actualizada para la

biomasa aérea total (M) de árboles medidos en campo y de sitios inventariados en los bosques secos de Sinaloa, México, eligieron (Náva, J.; Rodríguez, F. & Domínguez, 2013).

Desde Chile, se enfocó en la estimación del carbono en tipo forestal Roble-raulí en la Reserva Nacional Malleco, teniendo como base la análisis de los estadísticos $R^2 = 0,95$ S_{yx} (error estándar de la estimación) = 0,06, teniendo en cuenta los parámetros de bias, raíz cuadrada del error promedio, promedio de las diferencias absolutas y evaluación de la distribución de residuales y su ecuación correspondió a $C = b_0 d_{ap}^{b_1} h^{b_2} + \epsilon_i$ [7] (Moreno Garcia, Herrera Machuca, Luiz, & Ferreira, 2011)

De igual forma, en Ecuador usando el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía, determinaron la biomasa aérea con una ecuación $BT = -63,44 + 4,75 \times d_{ap} + 27,73 \times \ln (H_c)$ con un R^2 de 0,99 [8] para grupos de especies, instalando 12 parcelas permanentes de 60 m x 60 m, tomando el DAP ≥ 10 cm y la altura comercial, se describe en la ecuación 6 (Cuenca, Jadán, Cueva, & Aguirre, 2014).

Por su parte en Brasil, establecieron tres métodos para conocer el carbono en un área de restauración con 21 años de edad al sur de Minas Gerais, cuyas parcelas permanentes se tienen mediciones de las variables dasométricas en 2010 y 2013. La ecuación alométrica $\ln (c) = -12,3034390630 + 2,6584231780 \times \ln (DAP) + 0,5711719721 \times \ln (H)$ [9], aplicada fue el tercer método y usaron la ecuación diseñada por Scolforo et al. (2008b) con un R^2 de 0,97 y S_{xy} de 0,36,

Por otro lado, si se hace un análisis en Colombia, se encuentran algunos avances, principalmente el estudio para las diferentes coberturas forestales existentes, publicado por el IDEAM (2011) 44 modelos de ecuaciones alométricas que se ajustan a las características de los ecosistemas boscosos colombianos (Phillips et al., 2011).

Tabla 3. Estudios que reportan modelos con utilidad potencial para estimar la biomasa de los árboles en Colombia (Fernández, 2017; Phillips et al., 2011).

Autor	Total modelos	Lugar
Carvalho <i>et al.</i> 1998)	1	Amazonia Brasileña
Chambers <i>et al.</i> (2001)	1	Amazonia Brasileña
Higuchi <i>et al.</i> (1998)	1	Amazonia Brasileña
Álvarez <i>et al.</i> (en pre.a)	6	Colombia
Overman <i>et al.</i> (1994)	9	Colombia
Saldarriaga (1991)	3	Colombia
Zapata <i>et al.</i> (2003)	2	Colombia
Brown (1997)	6	Pantropical
Brown (1989)	4	Pantropical
Brown sin publicar, GEF (2005)	1	Pantropical
Chave <i>et al.</i> (2001)	2	Pantropical
Chave <i>et al.</i> (2005)	6	Pantropical
Lescure <i>et al.</i> (2005)	1	Pantropical
Ovington & Olson (1970)	1	Pantropical
Total	44	

Fuente (Phillips et al, 2011)

Por su parte, en el municipio de Bogotá, en la Universidad Javeriana, incluyeron las variables Diámetro de copa (DC), altura (Ht) y densidad de la madera (δ) para la determinación de carbono de las especies en el campus de la Universidad Javeriana, haciendo uso de de una ecuación alométrica propuesta por Brown et al. 1989 en Terán et al. (2000) correspondiente a $BT = e^{-2,4090 + 0,9522 \ln(d^2 * h * \delta)}$ [9]. Realizó una prueba de normalidad (prueba de Shapiro – Wilks) con el programa Past versión 2.17 (PAST 2012). Una vez se conoció que los datos no eran paramétricos, emplearon la prueba de Kruskal – Wallis con un intervalo de confianza del 95%; generando alto grado de relación de estas

variables en la producción de biomasa aérea arbórea.

En Colombia, de manera exploratoria de una función logarítmica en base en las mediciones realizadas para extrapolación alométrica, al tomar los datos de diámetro a la altura del pecho (DAP), la Altura Total (Ht) y la constante de la densidad básica de la madera, aplicaron el modelo de regresión lineal, usando el modelo (Brown, S. & Lugo, 1992). Sin embargo, señalaron que la ecuación elegida, fue incorrecta, ya que los rangos diamétricos de los árboles no superaban los 150cm, por lo que la biomasa se subestimó y en el rango de extrapolación no es estadísticamente correcto (Guarín, O.; Villamizar, J.; Delgado, O.; Suanch, O.; Mantilla, N.; Gualdrón, S.; Moreno, 2014).

Es preciso señalar, que los modelos alométricos se pueden generar para los diversos tipos de coberturas y respecto a los diferentes modelos descritos en líneas anteriores, además de corresponder a transformaciones logarítmicas, se encuentran relacionados con las variables que se elijan para la estimación de la captura de carbono. Los estimativos estadísticos de coeficiente de determinación (R^2) y error estándar (S_{xy}) contribuyen a definir el mejor modelo que explica la relación de las variables dasométricas u otras que se agreguen en la búsqueda de la estimación de carbono. Aunque se hace necesario incluir criterios como el índice de Furnival que “permite comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente es transformada” (Segura & Andrade 2008). Así mismo, el índice de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC) con el fin de fortalecer la decisión de selección del modelo alométrico (Lerma & Orjuela, 2014)

De igual forma, los diversos modelos alométricos se asemejan en la utilización de la variable dasométrica correspondiente a diámetro a la altura del pecho (DAP), esto se explica porque en campo se facilita la obtención de su valor, ya que es fácil de

medirlo en las zonas de interés, por tanto, se convierte en una variable predictora que precisará el valor de lo que se está indagando. Aunque los modelos descritos en su mayoría incluyen la variable altura (H), es elemental indicar que su medición en campo cuando se trata de coberturas boscosas densas, se dificulta su obtención, aunque incluirla precisa aún más el modelo (Rutishauser et al, 2013).

En la presente búsqueda de los diversos modelos estructurados se denota que, no hay profundización aún sobre las coberturas forestales urbanas, si bien matemáticamente es posible llegar a la precisión de los valores de biomasa y carbono, este no ha sido aplicado a escala más pequeña, como los ecosistemas urbanos, es decir se hace necesario elaborar los modelos más específicos, ecuaciones locales (Phillips et al., 2011; Segura & Andrade, 2008b). Tal es el caso de las coberturas forestales escasas como los bosques secos tropicales que en Colombia por ejemplo, se encuentran en convivencia con la población y debido a su afectación queda solo el 8% (IVH, 2014) y aunque (Guarín, O.; Villamizar, J.; Delgado, O.; Suanch, O.; Mantilla, N.; Gualdrón, S.; Moreno, 2014), adelantó la aplicación de la ecuación generada por (Brown, S. & Lugo, 1992) concluyeron que no fue correcto su aplicación por la diferenciación de los rangos de los diámetros de los árboles aplicables al modelo y los hallados en la zona urbana de estudio.

Por otro lado, se indica que los métodos directos son los más utilizados, debido a que este arroja un resultado más preciso y confiable. Este método proporciona un valor exacto de la biomasa, debido a que el proceso de análisis se encuentra sumergido en la intervención y cosecha de las especies forestales, elegidas en el estudio para determinar posteriormente su peso seco o biomasa (Fernández, 2017). También es preciso señalar, que las variables dasométricas correspondientes a altura (H) y DAP son las variables más utilizadas en la

construcción de los modelos alométricos teniendo en cuenta que son más fáciles de obtener su medición en campo, especialmente el DAP, ya que se obtiene fácilmente y de forma directa y precisa en el terreno.

Implicaciones y trazabilidad de las ecuaciones alométricas

El punto de partida para la relevancia de las emisiones de dióxido de Carbono inició con el Protocolo de Kyoto, que es un tratado internacional cuyo objetivo principal, radica en la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero a un 5% menos del nivel al año 1990 (Comisión nacional de Medio Ambiente, 1995). A su vez con el incremento del cambio climático acelerado a consecuencia de las acciones del hombre se iniciaron los trabajos de estimación de las reservas de carbono de los bosques aún existentes.

Sin embargo, “uno de los principales retos para generar esa estimación en los países en desarrollo, es generar información precisa tanto de las reservas potenciales de carbono como de la tasa histórica de deforestación, puesto que estos valores en conjunto serán utilizados para determinar si la implementación de las iniciativas de deforestación evitada generan o no reducciones adicionales en las emisiones” (Phillips et al., 2011).

De esta manera surgieron las metodologías para contribuir en esas estimaciones, usando los métodos directos e indirectos. La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere la aplicación del método destructivo. Este método proporciona un valor exacto de la biomasa ya que consiste en destruir los árboles, para calcular su peso seco o biomasa (Fernández, 2017). Por lo que autores como Brown y Chave han proporcionado diferentes estimaciones de carbono a través de ecuaciones alométricas.

En paralelo, en Colombia, a través de los compromisos adquiridos con el Protocolo de Kyoto, se generó el Mecanismo de Desarrollo Limpio Ministerio de Medio Ambiente, donde se promueve el mercado global de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero con diez (10) proyectos piloto en áreas protegidas, orientadas al manejo de los bosques como sumideros de carbono (Ministerio de Medio Ambiente & Banco Mundial, 2000). Así mismo, el fondo fiduciario de Bio Carbono del Banco Mundial, “basados en proyectos dedicados a la captura o conservación de carbono en ecosistemas de bosques y agro ecosistemas se busca comprar certificados de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero” (Borrero, 2012; Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola, 2004)

En el año 2012 se construyó el Manual de Ecuaciones alométricas como guía soporte de un paso a paso para avanzar en esa valoraciones, en el que señalan que los modelos están reunidos basados en el mismo principio: estimar un valor complejo de medir en los arboles a partir de las características más simples como el DAP (Diámetro a la altura del pecho 1.30cm), su altura o su edad (Picard, Saint-André, & Henry, 2012). Así mismo, la FAO en el año 2013 por su parte diseñó la Plataforma GlobAllomeTree, junto con el centro de Investigación Francés y la Universidad italiana de Tucsia, con el fin de recopilar todas aquellas ecuaciones alométricas desarrolladas a lo largo de la historia y en diversos ecosistemas del mundo, especialmente se observan un gran número de modelos para los ecosistemas de la zona de Europa y zonas aledañas. Dicha plataforma internacional en Internet fue creada para ayudar a los diseñadores de proyectos sobre el cambio climático, investigadores, científicos y técnicos forestales a calcular la biomasa forestal y el carbono de los bosques (Henry, Bombelli, & Trotta, 2014). En relación a América del Sur, los modelos son escasos en comparación respecto al continente europeo,

por lo que se requiere reforzar esos procesos en estas zonas propias de los diferentes bosques tropicales.

De acuerdo con lo anterior, en Colombia, los esfuerzos por conocer las reservas de carbono de los bosques que aún persisten en el territorio no se han hecho esperar, por ejemplo, se realizó el estudio del carbono almacenado en los bosques del sur y noroccidente de Córdoba, que estimaron la biomasa a través de las ecuaciones propuesta por Chave et al. 2005 y mediante el método de combustión en seco en un analizador automático que permite obtener el porcentaje de carbono total presente en una muestra de peso conocido. Para cuantificar el carbono almacenado en la biomasa, multiplicaron estas fracciones de carbono obtenidas por unidad de masa seca y la biomasa estimada para cada tejido; a partir de la suma de cada tejido se obtuvo el carbono almacenado por individuo (Vásquez & Arellano, 2012).

Phillips et al. (2011) reporta la estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia; en dicho documento recapitulaban los últimos avances correspondientes a la “construcción de ecuaciones alométricas para calcular la biomasa aérea en bosques de Colombia. Adicionalmente, plantearon la necesidad de generar una metodología estandarizada que permita obtener estimaciones comparables con otros estudios, nacionales e internacionales, y que sirvan de referencia en la implementación de proyectos REDD en Colombia” (Fernández, 2017).

Por otro lado, aunque han sido pocos los estudios realizados en cobertura forestal urbana, se desarrollaron investigaciones diversas en el país. Se realizó el estudio del contenido de Carbono de la Universidad Javeriana (Sede Bogotá), encontraron sus estimaciones a través de la medición de las variables dasométricas, muestras seccionadas

del fuste y la recolección de la biomasa con el establecimiento de colectores en la zona de estudio, pesando dichas muestras (Borrero, 2012). De igual forma, se determinó el dióxido de carbono en los parques de la ciudad de Bucaramanga a través de las ecuaciones establecidas por Brown & Lugo (1992), al tomar las variables dasométricas y la constante de la densidad básica de la madera (Guarín, *et al.*, 2014).

Recientemente, se han venido efectuando trabajos de gran interés como el proceso de estimación del contenido de biomasa en un bosque primario en el departamento de Guainía, con el método no destructivo con las especies Mure, Pendare y Arenillo blanco y la biomasa aérea fue estimada a partir de los parámetros medidos en campo como altura y DAP (Quiceno-Urbina, Tangarife-Marín, & Álvarez-León, 2016) . Y de igual forma, se viene incrementando las investigaciones sobre la evaluación y/o el valor de los beneficios ecosistémicos, tal como el adelantado en la evaluación de la estructura del ecosistema bosque seco tropical en Bolívar y sus beneficios ecosistémicos (Zuluaga, 2016).

De esta manera, se señala que se debe añadir esfuerzos por continuar trabajando en los relictos de bosque que quedan en el país, sobretodo en cobertura de bosque seco tropical, ecosistema crítico en el territorio, por su escala de desaparición. Esos esfuerzos deben estar orientados hacia las ciudades que resguardan pequeños parches del mismo y sus árboles urbanos, con el fin de incentivar el establecimiento de más cobertura forestal y su manejo respectivo.

Referencias bibliográficas

Acevedo, Á. (2016). Materiales educativos sobre uso y conservación del bosque seco tropical en el Caribe colombiano. Bogotá. Retrieved from www.tropenbos.org/file.php/2143/materiales-educativos-low.pdf%0A

Acosta, Quednow, E. y M. (2001). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Valdivia, Chile. Retrieved from https://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/08_Acosta.PDF

Adarve, J.; Torres, A. (2010). Estructura y riqueza florística del parque natural regional el vínculo - buga, Colombia. Cspedesia. Voñ 32(90-91): 21-36

Alvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba , Bolivia. Tesis de Posgrado de Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques. CATIE.

Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., R. C. W. (2008). InfoStat. Manual del usuario, software estadístico. Cordoba, Argentina. Retrieved from <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id...assetKey...>

Banco de Occidente. (2006). Bosque seco Tropical en Colombia. En: Bosque Seco Tropical (Capítulo 6). Retrieved from <http://www.imeditores.com/banocc/seco/cap6.htm>

León Aristizabal, G. E. y Benavides Ballesteros, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. IDEAM, Bogotá. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>

Borrero, J. (2012). Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de pregrado. Bogotá. 63p. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8987/BorreroBenavidesJuanCamilo2012.pdf?sequence=1>

- Brown, S. & Lugo, A. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, Vol 17(1): 8-18
- Cárdenas, L. (2012). Biomasa y depósitos de carbono en bosques en regeneración del ecoparque Bataclan (Cali, Colombia). Universidad del Valle. Retrieved from <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8717/1/CB-0473128.pdf>
- Carvajal, Á. (2002). Teorías y modelos : formas de representación de la realidad. *Revista Comunicación*, 12, 1–14.
- Chheng, K., Sasaki, N., Mizoue, N., Khorn, S., Kao, D., & Lowe, A. (2016). Assessment of carbon stocks of semi-evergreen forests in Cambodia. *Global Ecology and Conservation*, 5, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.11.007>
- Comisión nacional de Medio Ambiente. (1995). Protocolo de Kyoto. Retrieved from <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/medioambiente/Documents/Normativa/Tratados Internacionales/foarticle25995.pdf>
- Concha, J; Alegre, J.; P. V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el departamento de san Martín, Peru. *Ecología Aplicada*, 6. Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v6n1-2/a09v6n1-2.pdf>
- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K., & Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *Revista CEDAMAZ*, 4(1), 21–31.
- Dauber, E.; Terán, J. & Guzmán, R. (2000). Estimaciones de biomasa y carbono en Bosques Naturales De Bolivia, 1, 1–10.
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Azures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Pinus patula Schl . et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Díaz, B. D., & Velásquez, L. F. (2015). Análisis de captura de carbono en seis especies forestales nativas (3 esciofitas-3 heliofitas) plantadas con fines de restauración en el Parque Ecológico La Poma (PEP) - sabana de Bogotá – Colombia. *Mutis*, 5(2), 46–54.
- Diédhiou, I., Diallo, D., Mbengue, A., Hernandez, R. R., Bayala, R., Dième, R., ... Sène, A. (2017). Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of *Jatropha curcas* L. in Senegal's Peanut Basin. *Global Ecology and Conservation*, 9, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.11.007>
- Domínguez, A. (2016). Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO2 vehicular en Tijuana, B.C. El Colegio de la Frontera Norte. Retrieved from <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Domínguez-Madrid-Ana-Yurendy.pdf>
- Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., & Soto-Pinto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*, 47(4), 385–397.
- FAO; Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests : A Primer Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests, (January 1997). Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e00.htm>
- FAO. (2012). Estado de los bosques del mundo, 2016. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5850s.pdf>

- Fernández, M. (2017). Revisión de métodos para la estimación de captura de carbono almacenadas en bosques naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16394?mode=full>
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola. (2004). Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola. Retrieved from <https://www.ifad.org/documents/10180/4ebfd763-bc94-460f-9033-46dfe9fd7a9a>.
- Gayoso, J. (2001). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Trabajo presentado en Taller Secuestro de Carbono. Mérida, Venezuela. 22p.
- Guarín, O.; Villamizar, J.; Delgado, O.; Suanch, O.; Mantilla, N.; Gualdrón, S.; Moreno, C. (2014). Determinación de Dióxido de Carbono en parques de la ciudad de Bucaramanga. *Teoría y Praxis Investigativa*, 9(1), 56–70.
- Guedes, B. S., Siteo, A. A., & Olsson, B. A. (2018). Allometric models for managing lowland miombo woodlands of the Beira corridor in Mozambique. *Global Ecology and Conservation*, 13, e00374. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00374>
- Henry, M., Bombelli, A., & Trotta, C. (2014). GlobAllomeTree : International platform for tree allometric equations to support volume , biomass and carbon assessment GlobAllomeTree : international platform for tree allometric equations to support volume , biomass and carbon assessment. <https://doi.org/10.3832/ifor0901-006>
- Holdrige, L. (2000). Ecología basada en zonas de vida. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>
- Instituto Alexander von Humboldt. (2017). Acabamos con el bosque seco tropical en Colombia. Retrieved from <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/en-peligro-el-bosque-seco-tropical-en-colombia/36792>
- Instituto Alexander Von Humboldt. (1998). El Bosque seco Tropical (Bs-T) en Colombia, (1971), 1–24. Retrieved from <http://media.utp.edu.co/ciebreag/archivos/bosque-seco-tropical/el-bosque-seco-tropical-en-colombia.pdf>
- Jauregui, K. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. Trabajo de Pregrado Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 33p
- Lee, J., Ko, Y., & Mcpherson, E. G. (2016). Urban Forestry & Urban Greening The feasibility of remotely sensed data to estimate urban tree dimensions and biomass. *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.010>
- Lerma, M. A. M., & Orjuela, E. L. G. (2014). Modelos Alométricos Para La Estimación De La Biomasa Aérea Total En El Páramo De Anaime, Departamento Del Tolima, Colombia, 79. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Londoño Lemos V, T. G. A. (2018). Composición florística y estructura de una parcela permanente en los bosques tropicales del Parque Natural Regional El Vinculo. Versión 7.0. Universidad del Valle. Universidad Del Valle. Retrieved from <https://doi.org/10.15472/orp8ld> a través de GBIF.org el 2018-12-09.
- Ministerio de Medio Ambiente & Banco Mundial. (2000). Estudio de Estrategia Nacional MDL 11. Retrieved from <http://media.utp.edu.co/centro-gestion->

ambiental/archivos/curso-taller-cambio-climatico/11.pdf

Monsalve, M. (2017). El 46 % de los ecosistemas de Colombia están en riesgo. Retrieved from <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/el-46-de-los-ecosistemas-de-colombia-estan-en-riesgo-articulo-708252>

Moreno Garcia, N., Herrera Machuca, M. A., Luiz, R., & Ferreira, C. (2011). Modelo para calculo estimación del carbono en Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe en la Reserva Nacional Malleco: Chile. *Revista Árvore*, 35(6), 1299-1306. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000700016>

Moret, A.; Ruíz, P. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para Mureillo (*Erisma uncinatum*) en la unidad C4 de la reserva forestal Imataca. *Revista Forestal Venezolana* Vol32 N° 42(2):187-197

Mota, C.; López, C.; Iglesias, M.; Martínez & Narvaez, M. (n.d.). Absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de murcia. *Horticultura global*, N°. 294: 58-63

Náva, J.; Rodríguez, F. & Domínguez, P. (2013). Ecuaciones alométricas para árboles tropicales: aplicación al inventario forestal de Sinaloa, México. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 347–356.

ONU. (2017). Hasta 13 millones de hectáreas de bosques desaparecen cada año por la acción del hombre. Retrieved from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/05/hasta-13-millones-de-hectareas-de-bosques-desaparecen-cada-ano-por-la-accion-del-hombre/>

Ounban, W., Puangchit, L., & Diloksumpun, S. (2016). Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn.f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. plantations in Thailand. *Agriculture and*

Natural Resources, 50(1), 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2015.08.001>

Phillips, J. F., Duque, A. J., Yopez, A. P., Cabrera, K. R., García, M. ., Navarrete, D. A., ... Cárdenas, D. (2011). Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. *Estratificación, alometría y métodos analíticos*. IDEAM, Bogotá, 70P

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.

POT. (2015). Acuerdo 0373 de 2014 del Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali. Santiago de Cali. Retrieved from <http://www.camacolcordobaysucre.com/images/Normativa/CIRCULAR-POT.pdf>

PROECEN. (1999). *Ceiba pentandra* (Vol. 2). Honduras. Retrieved from [http://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD8 92/pd 8-92-5-6 rev 2 \(F\) .pdf](http://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD8%2092/pd%208-92-5-6%20rev%202%20(F).pdf)

Quiceno-Urbina, N.-J., Tangarife-Marín, G.-M., & Álvarez-León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul*, 43(43), 171–202. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9>

Rodríguez, G. ., De Los Santos-Posadas, H. ., González, V., Aldrete, A. ., Gómez, A., & Fierros, A. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido

crecimiento en Oaxaca. *Madera y bosques*, 18(1), 25-41

Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, Hergoualch, K., & Verchot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>

Salinas, Z.; Hernández, P. (2008). Preguntas frecuentes sobre estimaciones de carbono en proyectos forestales MDL. In: Salinas, Z y Hernández, P. (Eds) *Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía*. Manual técnico No. 83 CATIE, Turrialba.

Segura, M., & Andrade, H. J. (2008a). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforesteria En Las Américas*, 46, 89–96.

Vallejo MI, Londoño AC, López R, Galeano G, Álvarez E, Devia W. 2005. *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Serie: Métodos para estudios ecológicos a largo plazo. Volumen 1.* Bogotá: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Vásquez, A., & Arellano, H. (2012). *Estructura, Biomasa Aérea Y Carbono Almacenado En Los Bosques Del Sur Y Noroccidente De Córdoba. Colombia Diversidad Biótica XII. La Región Caribe de Colombia*, (August 2015), 963–1009. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>

Verband, I., & Forschungsanstalten, F. (2001). *IUFRO World Series Vol . 13 (Vol. 13)*.

Zuluaga, L. (2016). Evaluación estructural del ecosistema bosque seco tropical en el municipio de el Carmen de Bolívar (Bolívar) y determinación de sus beneficios

ecosistémicos. Universidad de Manizales. Trabajo de grado. Retrieved from http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2576/Zuluaga-Zuluaga_Liliana_2016.pdf?sequence=1