

**Ecuación alométrica para estimar la biomasa  
radicular en *Pinus oocarpa* del bosque natural  
de la Microcuenca Santa Inés, Honduras**

**Aurisbel Evelyn Avila Guevara**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**  
**Honduras,**  
Noviembre, 2016

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Ecuación alométrica para estimar la biomasa radicular en *Pinus oocarpa* del bosque natural de la Microcuenca Santa Inés, Honduras**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Aurisbel Evelyn Avila Guevara**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2016

## Ecuación alométrica para estimar la biomasa radicular en *Pinus oocarpa* del bosque natural de la Microcuenca Santa Inés, Honduras

Aurisbel Evelyn Avila Guevara

**Resumen:** Los sistemas radiculares contienen más del 15% de la biomasa total de los árboles. Se estimó la proporción de raíces finas por unidad de área y según la profundidad del suelo, se ajustaron dos ecuaciones para estimar la biomasa contenida en las raíces gruesas (>5 mm) y finas (<4.9 mm) de la especie *Pinus oocarpa* y se estimó el carbono total del área de la Microcuenca Santa Inés bajo manejo de Zamorano. Se muestrearon 10 árboles con un DAP entre las clases diamétricas de 10 a 60 cm. Se pesaron las raíces gruesas extraídas manualmente y se tomaron 20 muestras de suelo alrededor de cada árbol para obtener las raíces finas según la profundidad efectiva. Se tomaron muestras frescas que fueron secadas a 70 °C para determinar su peso seco. Con las variables independientes DAP y altura, se evaluaron regresiones para ajustar ecuaciones obtenidas por revisión bibliográfica. La ecuación que logró el mejor ajuste para estimar la biomasa contenida en las raíces gruesas fue  $\ln(B)=a+b\ln(D)$  ( $R^2= 0.975$ ,  $a= -2.645$  y  $b= 2.113$ ). Para las raíces finas, el modelo que arrojó el mejor ajuste fue  $B=a+bD+c(D^2+H)$  ( $R^2= 0.660$ ,  $a= -26.879$ ,  $b= 3.646$  y  $c= -0.054$ ). La cantidad de carbono estimado para *P. oocarpa* en el área de la Microcuenca Santa Inés manejada por Zamorano (582.26 ha) fue de 41,502.01 t.

**Palabras clave:** .

**Abstract:** About 15% of the biomass contained is allocated in the root system. It was estimated the proportion of fine roots per unit of area and according to the soil depth, to set two equations for estimating the biomass allocated in the coarse (>5 mm) and fine (<4.9 mm) roots of *Pinus oocarpa* and estimate the total carbon content in the university forest of Santa Ines. Ten trees which DBH were from 10 to 60 cm were sampled. Coarse roots were manually extracted and weighed. Around each tree, 20 soil samples were taken to obtain fine roots at different depths. Samples were dried at 70 °C to determine dry weight. With the independent variables DBH and height, regressions to adjust equations obtained by literature review were evaluated. The best fit to estimate biomass in coarse roots was achieved with  $\ln(B)=a+b\ln(D)$  ( $R^2=0.975$ ,  $a= 2.645$  and  $b= 2.113$ . For fine roots, the model with the best fit was  $B=a+bD+c(D^2+H)$  ( $R^2=0.660$ ,  $a=-26.879$ ,  $b=3.646$  y  $c=-0.054$ ). The area of the pine forest (*P. oocarpa*) in the watershed which is managed by Zamorano (582.26 ha) contains approximately 41,502.01 t of carbon.

**Key words:** Carbon, coarse roots, fine roots, model.

## CONTENIDO

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| Portadilla.....                          | i         |
| Página de firmas .....                   | ii        |
| Resumen .....                            | iii       |
| Contenido .....                          | iv        |
| Índice de Cuadros, Figuras y Anexos..... | v         |
| <br>                                     |           |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>              | <b>1</b>  |
| <br>                                     |           |
| <b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>      | <b>4</b>  |
| <br>                                     |           |
| <b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>    | <b>9</b>  |
| <br>                                     |           |
| <b>4. CONCLUSIONES.....</b>              | <b>13</b> |
| <br>                                     |           |
| <b>5. RECOMENDACIONES .....</b>          | <b>14</b> |
| <br>                                     |           |
| <b>6. LITERATURA CITADA.....</b>         | <b>15</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

| Cuadros                                                                                                                                 | Página |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Modelos alométricos ajustados para estimar la biomasa radicular. ....                                                                | 8      |
| 2. Distribución de raíces finas. ....                                                                                                   | 9      |
| 3. Ajuste de las ecuaciones alométricas para determinar biomasa contenida en las raíces gruesas, según tres criterios de selección..... | 10     |
| 4. Ajuste de las ecuaciones alométricas para determinar biomasa contenida en las raíces finas, según tres criterios de selección. ....  | 10     |
| 5. Estimaciones de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> contenido en el área de la microcuenca Santa Inés manejada por Zamorano. ....     | 11     |

| Figuras                                                                      | Página |
|------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Ubicación del brote del gorgojo en Sibaja (Licona, 2016).....             | 5      |
| 2. Método de Veronoi para muestreo de raíces finas (Picard et al., 2012).... | 6      |

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XXI las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) han aumentado. En el período 2000-2010, las emisiones GEI de origen antropógeno aumentaron un 2.2% anual, llegando a las 49 gigatoneladas de carbono equivalente (GtCO<sub>2</sub>eq) durante el año 2010. El 76% de estas emisiones fueron de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014). Actualmente, la concentración de CO<sub>2</sub> ha sobrepasado los niveles históricos, superando las 400 ppm (Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica [NOAA], 2016).

La deforestación constituye la segunda fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (6-15%) (Baccini et al., 2012; Werf et al., 2009). La pérdida de bosques está relacionada directamente al crecimiento urbano, así como a la producción agrícola destinada a exportación (DeFries, Rudel, Uriarte y Hansen, 2010). En Honduras, se deforestan 59 mil ha/año en promedio, siendo las principales causas la tala ilegal, la agricultura migratoria y la ganadería extensiva (Larios, 2011). Así, la producción de emisiones de CO<sub>2</sub> *per capita* del país para el año 2011 fue de 1.1 toneladas métricas por año (Banco Mundial, 2011).

Para reducir las emisiones provenientes de la degradación de recursos forestales, surge el Programa de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de Bosques (REDD, por sus siglas en inglés). Esta iniciativa está basada en políticas e incentivos que propician la conservación y el uso sostenible de los bosques, sobre todo en países en desarrollo de África, Asia y América Latina ubicados en la región tropical (IPCC, 2007; Voluntary Carbon Standard [VCS], 2007). De esta manera se le otorga un valor financiero al carbono que es fijado en las masas forestales de las regiones mencionadas (Programa REDD, 2016).

Las iniciativas como de reducción de emisiones, como REDD, alientan a los países interesados a participar en los mercados de carbono. Dentro de estos existen los mercados de obligaciones reguladas y los mercados voluntarios (Banco Mundial y Ecofys, 2015). Los mercados de emisiones reguladas son vinculantes de manera jurídica, es decir que el cumplimiento de la reducción de emisiones es controlado mediante normativas nacionales o internacionales (Hamilton, Bayon, Turner y Higgins, 2007). Por otro lado, los mercados voluntarios no son vinculantes, es decir que no responden ante un marco legal y no imponen sanciones a los participantes que no cumplan con la reducción de emisiones acordada (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2003). Básicamente, los países en desarrollo venden unidades de reducción a países que buscan reducir sus emisiones. El valor de una unidad de reducción es de una tonelada métrica de CO<sub>2</sub> equivalente y sirve para respaldar la reducción de emisiones (Aguilar, Castillo y Guerrero, 2009).

Honduras tiene una superficie de 112,492 km<sup>2</sup> (Programa REDD, 2016). De esta superficie, el 48% está cubierta por una amplia cobertura boscosa (Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre [ICF], 2015). Sin embargo, el 87% de su área tiene vocación forestal. Esto le confiere a Honduras un potencial para participar en los mercados de carbono y recibir beneficios económicos por fijación y almacenamiento de carbono. Se ha determinado que Honduras tiene la capacidad para fijar 56 millones de toneladas de carbono (t C) en 4.7 millones de hectáreas (Camara de Industria y Comercio Ítalo-Hondureña [CICIH], 2014). Este potencial se ve limitado por la falta de información, por lo que se debe establecer una línea base.

El Cambio Climático ha creado un interés científico dirigido al mecanismo empleado por los sumideros de carbono para crear un balance entre el carbono emitido y el carbono fijado (Landberg, Linder y McMurtrie, 1995). Los sumideros de carbono son concebidos por el Protocolo de Kioto como todo mecanismo que extrae los gases en cuestión de la atmósfera y los acopia (Camps y Pinto, 2004). Parte de esta función es realizada por los bosques mediante los procesos fotosintéticos y el ciclo de carbono, lo que reduce las emisiones, al tiempo que las masas forestales aprovechan el carbono para formar biomasa en su estructura (Macauley y Richardson, 2011).

Una fracción significativa de la biomasa total de un árbol (15-45%) se encuentra contenida en el subsuelo (Santantonio, Hermann y Overton, 1977). Sin embargo, la porción de esta biomasa perteneciente al sistema radicular en especies forestales ha sido poco estudiada debido a que el método directo empleado (derribar el árbol y extraer las raíces por completo) resulta destructivo para el bosque, toma mucho tiempo e implica un alto costo (Sanford y Cuevas, 1996).

El ajuste de ecuaciones alométricas permite simplificar la estimación de la biomasa y el carbono contenidos en un bosque natural o plantación forestal. Esto se debe a que las ecuaciones permiten estimar una medida de un árbol, como la biomasa, en función de otra como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) (Gould, 1966). En este sentido, las ecuaciones alométricas permiten que los estudios puedan cubrir mayores áreas de bosque a un menor costo (Ketterings, Coe, Noordwijk, Ambagau y Palm, 2001). Por otro lado, el uso de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa contenida en las raíces finas es poco común, debido a que la extracción y cuantificación de dichas raíces resulta difícil, aún para estudios que emplean muestras pequeñas (Vaninnen y Mäkelä, 1996). Sin embargo, se han realizado estudios exitosos empleando variables sencillas de medir como el DAP y la altura de los individuos, siendo estas en conjunto las que resultan en ecuaciones más precisas. También se ha determinado que el uso del DAP como única variable independiente es confiable (Xiao y Ceulemans, 2004).

En Honduras, se han realizado algunos estudios para determinar la cantidad de biomasa y carbono aéreo contenidos en bosques naturales de *Pinus oocarpa*. Para la región central del país se reportó una acumulación de 73.06 t/ha de biomasa (Ramos y Ferreira, 2000). Por otro lado, en el cerro El Tablón, ubicado en el municipio de Cabañas (Departamento de La Paz), se estimó una acumulación de carbono de 22.50 t/ha (Albeto y Elvir, 2008). Además, para los municipios de Cabañas, Santa Ana y Opatoro, la cantidad de carbono

acumulado fue de 913,925.50 t. Para los estudios anteriores se empleó la ecuación alométrica Logarítmica Combinada  $\ln B = a + b \ln D^2 H$ , ajustada con las constantes  $a = -2.184$  y  $b = 0.851$ , con un  $R^2 = 0.85$  (Alberto y Elvir, 2008).

En el caso de la Escuela Agrícola Panamericana, una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea contenida en el bosque natural de la Microcuenca de Santa Inés fue determinada (Gudiel, 2015). Sin embargo, el componente radicular no fue considerado. Debido a esto, el presente estudio se propuso:

- Estimar la proporción de raíces finas por unidad de área y según la profundidad del suelo en la especie *Pinus oocarpa* de la Microcuenca Santa Inés, Honduras
- Ajustar dos ecuaciones para estimar la biomasa contenida tanto en las raíces gruesas como en las raíces finas de la especie *Pinus oocarpa* en el bosque natural de la Microcuenca Santa Inés, Honduras, y
- Estimar el carbono total contenido en el área de la Microcuenca Santa Inés manejada por Zamorano

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

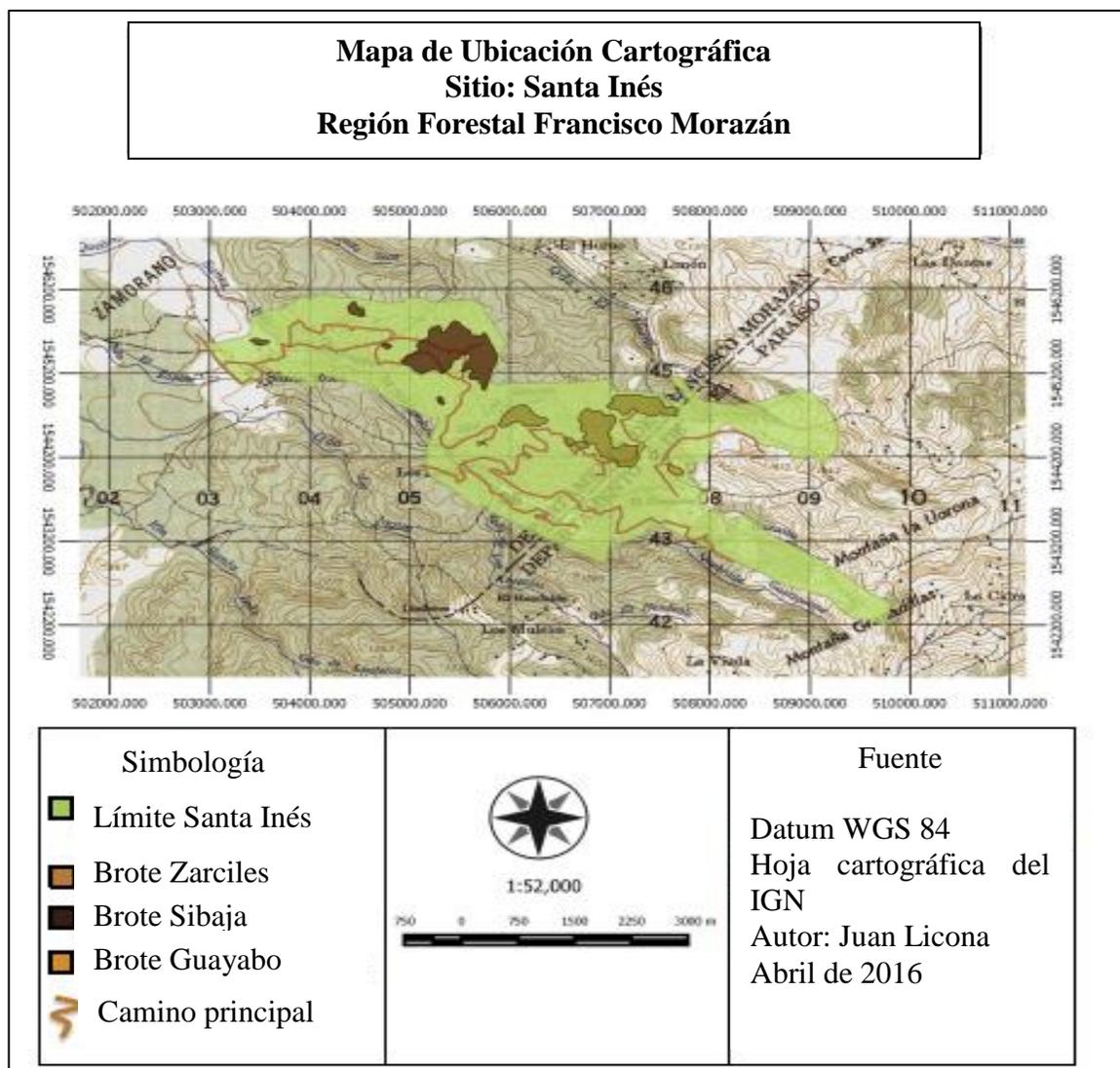
**Localización del estudio.** El estudio se realizó en el bosque natural de la Microcuenca de Santa Inés, Honduras. Dicha microcuenca tiene un área aproximada de 1,858 ha, con elevaciones que oscilan entre los 755 – 1,765 msnm (Acosta y Kucharsky, 2012). La temperatura media anual, según registros de 25 años, es de 23.2 °C (García, 1993). La Microcuenca tiene un Índice de Sitio IV (Gudiel, 2015).

**Selección de individuos.** A partir del inventario forestal se estratificaron los individuos pertenecientes a la especie *P. oocarpa* según las clases diamétricas existentes. Se seleccionó esta especie porque, según el plan de manejo forestal de la Microcuenca de Santa Inés 2011-2015 (Hernández, 2011-2015), *P. oocarpa* es la especie con mayor abundancia dentro del área de estudio (50.9%). Se obtuvo el permiso de aprovechamiento forestal en el Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) de la República de Honduras.

**Tamaño de muestra.** Se aprovecharon 10 árboles distribuidos alrededor de una de las áreas afectadas por el gorgojo del pino (*Dendroctonus frontalis*) llamada Sibaja, ubicada dentro del área de bosque que actualmente es manejada por Zamorano (Figura 1). Los rangos de clases diamétricas tuvieron un ancho de cinco centímetros, partiendo de un DAP mínimo de 10 cm, hasta un máximo de 60 cm. Se tomó un individuo por clase diamétrica existente, haciendo que la muestra fuera representativa.

**Metodología de muestreo.** La metodología se basó en los estudios de Cerruto et al. (2015) y Fonseca et al. (2013). Se aplicó el método de muestreo directo o destructivo, de manera que en campo se obtuvo el peso fresco de las raíces gruesas (diámetro  $\geq 5$  mm). Para obtener las raíces finas (diámetro  $\leq 4.9$  mm) se extrajeron muestras de suelo. Las muestras fueron llevadas al laboratorio para separar las raíces de interés con un tamiz.

**Extracción de muestras de suelo para obtener raíces finas.** Para obtener muestras de las raíces finas, se utilizó el método modificado de Veronoi. Para esto se trazaron segmentos desde el árbol de interés hasta los árboles vecinos más cercanos (Figura 2). Luego se trazaron mediatrices a cada uno de los segmentos, de manera que cada prolongación de cada mediatriz permitió la unión de las mismas, formando un polígono (Picard et al., 2012). Los segmentos ubicados en el interior del polígono fueron reordenados de manera que el polígono quedó formado por cierto número de triángulos. Conociendo las dimensiones de cada triángulo se pudo calcular su área. La suma de las áreas de los triángulos permitió determinar el área total muestreada.



**Figura 1.** Ubicación del brote del gorgojo en el área de Sibaja (Licona, 2016).

El área muestreada no debe confundirse con la Zona de Influencia Radicular (ZIR) sino que constituye una simplificación del proceso de muestreo. Se asumió que la proporción de raíces de otros árboles que invade esta área es igual a la proporción de raíces que sale del árbol muestreado hacia la ZIR de árboles vecinos (Picard et al., 2012).

En el área de Veronoi de cada árbol se tomaron 20 muestras de suelo de forma sistemática. Se dividió el área en cuatro secciones, tomando cinco muestras en cada una de ellas usando un barreno. Los diferentes rangos de profundidad de suelo establecidos para el muestreo fueron 0-30 cm, 30-50 cm y 50-80 cm. Esto debido a que teóricamente las raíces de los árboles se encuentran distribuidas en el suelo hasta los 60 cm de profundidad (Sánchez et al., 2008). Además, el 76% de los suelos de la Microcuenca de Santa Inés son profundos (Acosta y Kucharsky, 2012), lo que implica profundidades mayores a los 60 cm (Arévalo - Valderrama y Gauggel, 2014).

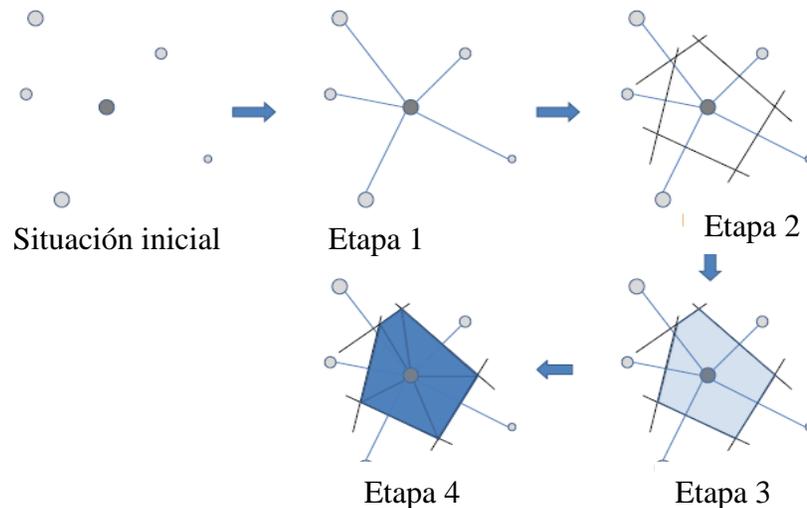


Figura 2. Método de Veronoi para muestreo de raíces finas (Picard et al., 2012).

**Extracción de raíces gruesas.** Se midió el DAP con una forcípula y la altura total de cada árbol con un hipsómetro. Luego, se cortó cada individuo a una altura de 15 cm sobre el suelo para que la Unidad Forestal realizara todos los procedimientos necesarios para el aprovechamiento comercial de la madera si el árbol tenía un DAP mayor a 30 cm.

Se retiró manualmente la masa radicular alrededor de cada árbol. Para esto se asumió que las raíces de árboles adyacentes que invaden el área de muestreo son compensadas por las raíces del árbol muestreado que salen más allá del área de muestreo (Resh et al., 2003). Una vez extraídas, se determinó la masa total de las raíces, incluyendo la corona, utilizando una balanza Pocket Spring Balance con capacidad para 25 kg. Finalmente, se seleccionaron muestras para ser secadas.

**Secado de muestras de suelo.** Las muestras de suelo de cada árbol fueron clasificadas según la profundidad a la que fueron extraídas. Se extendieron las muestras sobre papel periódico y se dejaron secar durante dos días bajo condiciones ambientales para simplificar el tamizado posterior. Al pasar los dos días se recogieron las muestras y se colocaron en bolsas plásticas de 18 × 24 pulgadas para ser pesadas en una balanza digital de la marca Ohaus® con capacidad para 15 kg.

**Separación de raíces finas.** Del peso total de cada muestra de suelo se obtuvieron tres submuestras, según los rangos de profundidad considerados. Para cada rango se extendió la muestra sobre una mesa y se le dio una forma rectangular. Luego, se dividió la muestra en cuatro partes y de cada cuarto se extrajo suelo para conformar la submuestra de tres kilogramos de peso.

Las submuestras de suelo para cada rango de profundidad fueron tamizadas. Para esto se utilizaron tamices artesanales de un pie cuadrado (1 × 1). Los tamices fueron elaborados con mallas de alambre de media pulgada de luz (para separar la grava y agregados

grandes) y láminas de alambre de un cuarto de pulgada de luz (para retener las raíces). El suelo que no pasó a través de la malla de un cuarto de pulgada fue lavado para obtener las raíces que pudieron pasarse por alto. Finalmente, las raíces obtenidas fueron pesadas.

**Secado de muestras de raíces gruesas y finas.** Las muestras de raíces fueron secadas en el Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo. Las raíces gruesas fueron colocadas sobre bandejas hechas con papel aluminio de 30 × 15 cm. Las raíces finas fueron colocadas en bandejas más pequeñas de 4 × 5 cm. Las condiciones de secado fueron a una temperatura de 70 °C (Cerruto et al., 2015) durante un período de 20 horas y luego monitoreadas cada cuatro horas hasta alcanzar un peso constante.

**Cálculo de biomasa.** Los datos obtenidos fueron procesados con el programa Excel 2010. En primer lugar, se calculó el porcentaje de humedad de las raíces. Para esto se utilizó el peso fresco y el peso seco de las muestras (Ecuación 1). Luego, se determinó la biomasa, multiplicando el peso fresco de las raíces por su porcentaje de humedad (Ecuación 2).

$$H(\%) = \frac{P_f - P_s}{P_f} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

H = Porcentaje de humedad (%)

Pf = Peso fresco (kg)

Ps = Peso seco (kg)

$$B = P_f \times 1 - \left( \frac{H}{100} \right) \quad [2]$$

Donde:

B = Biomasa (kg)

Pf = Peso fresco (kg)

**Cálculo de distribución de raíces finas según la profundidad del suelo.** Se determinó la distribución de raíces finas en cada rango de profundidad de muestreo. El área considerada fue la del cilindro que conforma el barreno utilizado para tomar las 20 muestras de suelo.

**Análisis estadístico.** La variable dependiente fue la biomasa (kg). Las variables independientes fueron el DAP (cm) y la altura (m) de los árboles. Las ecuaciones seleccionadas de la literatura (Cuadro 1) fueron evaluadas mediante regresiones con el programa IBM SPSS Statistics 19. Los indicadores de ajuste considerados fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$  ajustado), el error cuadrático medio (ECM) y el error estándar de estimación (Sxy).

Cuadro 1. Modelos alométricos ajustados para estimar la biomasa radicular.

| Modelo | Ecuación                 | Autor                     |
|--------|--------------------------|---------------------------|
| 1      | $B = a + bD + c(D^2+H)$  | Higuchi y Carvalho (1994) |
| 2      | $B = a + bD^2 + c(D^2H)$ | Higuchi y Carvalho (1994) |
| 3      | $B = a + bD + cH$        | Higuchi y Carvalho (1994) |
| 4      | $B = aD^b + H^c$         | Higuchi y Carvalho (1994) |
| 5      | $B = aD^b$               | Xiao y Ceulemans (2004)   |
| 6      | $B = aD^bH^c$            | Xiao y Ceulemans (2004)   |
| 7      | $\ln(B) = a + b\ln(D)$   | Guerra et al. (2005)      |

B= biomasa; D= diámetro a la altura del pecho (1,30 m); H= altura total (m); a, b y c= parámetros estadísticos.

**Cálculo de carbono.** Se utilizaron las ecuaciones ajustadas en este estudio, así como la ecuación para estimar la biomasa aérea ajustada por Gudiel (2015) (Ecuación 3). También se consideraron los datos del inventario forestal de Santa Inés proporcionado por la Unidad Forestal de Zamorano. Se multiplicó la cantidad de biomasa por el factor 0.5. Este factor ha sido utilizado en múltiples estudios (Valenzuela, 2001), considerándolo como la proporción de carbono contenido en organismos vegetales (Ecuación 4).

$$B = a + bD^2 + cH + dD^2H \quad [3]$$

Donde:

D = Diámetro a la altura del pecho (DAP = 1.30)

H = Altura (m)

a, b, c y d = constantes de regresión

$$C = B \times f \quad [4]$$

Donde:

C = Carbono (kg)

B = Biomasa (kg)

f = Factor de conversión (0.5)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Distribución de las raíces finas según la profundidad de suelo.** Se determinó que a mayor profundidad de suelo la proporción de raíces finas tiende a disminuir (Cuadro 2). En este caso, el 67% de las raíces finas estaban presentes en los primeros 30 cm de suelo, mientras solo un 11% fueron encontrados entre los 50 - 80 cm.

Cuadro 2. Distribución de raíces finas.

| Profundidad (cm) | Media de raíces finas (kg/m <sup>2</sup> ) | Distribución (%) |
|------------------|--------------------------------------------|------------------|
| 0-30             | 1.50                                       | 67.79            |
| 30-50            | 0.46                                       | 20.54            |
| 50-80            | 0.26                                       | 11.67            |

Esta distribución puede atribuirse al tipo de raíz que presenta el género *Pinus*, siendo esta una característica genética que influye en la distribución de raíces gruesas y finas (Donoso, 1993). Al ser un sistema radicular axomorfo, las raíces del género *Pinus* tienden a ser más abundantes a nivel superficial (Kramer, 1974). Sin embargo, la distribución de las raíces también responde a las condiciones físicas y la composición química de suelo. Por tanto, individuos de la misma especie pueden comportarse de manera diferente según las condiciones del suelo sobre el que se desarrollan (Pritchett, 1991).

**Ecuaciones alométricas.** Luego de analizar los datos se seleccionó el modelo  $\ln(B) = a + b\ln(D)$  (Cuadro 3) como el más preciso para estimar la biomasa contenida en las raíces gruesas de *P. oocarpa* en la Microcuenca Santa Inés. Con este modelo, el coeficiente de determinación fue el mayor ( $R^2 = 0.975$ ), el error cuadrático medio fue el menor (0.026) al igual que el error estándar de estimación (0.003). El Coeficiente de Determinación obtenido señala que este modelo explica el 97% del comportamiento de la biomasa en función del DAP y la altura.

El modelo seleccionado fue utilizado por Guerra et al. (2005) para evaluar la biomasa de las raíces gruesas de *Pinus radiata* en dos localidades de Chile. La muestra fue de 13 individuos para el primer sitio y 14 para el segundo. El modelo resultó con un  $R^2 = 0.974$ . Esto significa que el modelo explica el 97% del comportamiento de la variable dependiente, en este caso la biomasa. Se obtuvieron los coeficientes  $a = -3.01902$  y  $b = 2.4795$ . Aunque el presente estudio no puede compararse de forma directa con el trabajo de Guerra et al., el ajuste de ambos resulta similar.

Cuadro 3. Ajuste de las ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de las raíces gruesas, según tres criterios de selección.

| Ecuación | Modelo                    | Coeficientes |       |        | Criterios estadísticos |         |        |
|----------|---------------------------|--------------|-------|--------|------------------------|---------|--------|
|          |                           | a            | b     | c      | R <sup>2</sup>         | ECM     | Sxy    |
| 1        | $B = a + bD + c(D^2 + H)$ | -66.650      | 5.295 | 0.018  | 0.958                  | 317.103 | 35.234 |
| 2        | $B = a + bD^2 + c(D^2H)$  | -18.314      | 0.265 | -0.007 | 0.962                  | 380.324 | 42.258 |
| 3        | $B = a + bD + cH$         | -66.650      | 5.295 | 0.018  | 0.967                  | 378.489 | 42.054 |
| 4        | $B = aD^b + H^c$          | 0.343        | 1.681 | -7.442 | 0.957                  | 420.899 | 46.767 |
| 5        | $B = aD^b$                | 0.343        | 1.681 |        | 0.957                  | 491.049 | 54.561 |
| 6        | $B = aD^bH^c$             | 0.006        | 0.417 | 2.906  | 0.966                  | 335.851 | 37.317 |
| 7        | $\ln(B) = a + b\ln(D)$    | -2.645       | 2.113 |        | 0.975                  | 0.026   | 0.003  |

R<sup>2</sup>= Coeficiente de Determinación; ECM= Error Cuadrático Medio; y Sxy= Error Estándar de Estimación.

En el caso de las raíces finas, el modelo  $B = a + bD + c(D^2 + H)$  fue el más preciso para estimar la biomasa (Cuadro 4) (Higuchi y Carvalho, 1994). El coeficiente de determinación fue relativamente bajo (R<sup>2</sup>= 0.660), pero logra explicar en más de la mitad el comportamiento de la biomasa bajo condiciones tropicales. Los coeficientes obtenidos fueron a= -26.879, b= -3.646 y c= -0.054. Por otro lado, el error cuadrático medio fue de 57.244 y el error estándar de estimación fue de 6.360.

Cuadro 4. Ajuste de las ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de las raíces finas, según tres criterios de selección.

| Ecuación | Modelo                    | Coeficientes |        |        | Criterios estadísticos |         |        |
|----------|---------------------------|--------------|--------|--------|------------------------|---------|--------|
|          |                           | a            | b      | c      | R <sup>2</sup>         | ECM     | Sxy    |
| 1        | $B = a + bD + c(D^2 + H)$ | -26.879      | 3.646  | -0.054 | 0.660                  | 57.244  | 6.360  |
| 2        | $B = a + bD^2 + c(D^2H)$  | 4.871        | 0.120  | -0.005 | 0.530                  | 79.076  | 8.786  |
| 3        | $B = a + bD + cH$         | -40.174      | -2.024 | 7.389  | 0.427                  | 96.453  | 10.717 |
| 4        | $B = aD^b + H^c$          | -7.590E-7    | 4.400  | 1.216  | 0.559                  | 74.249  | 8.250  |
| 5        | $B = aD^b$                | 15.584       | 0.137  |        | 0.024                  | 143.750 | 15.972 |
| 6        | $B = aD^bH^c$             | 0.215        | -1.583 | 3.547  | 0.189                  | 136.543 | 15.171 |
| 7        | $\ln(B) = a + b\ln(D)$    | 2.349        | 0.223  |        | 0.039                  | 0.321   | 0.036  |

R<sup>2</sup>= Coeficiente de Determinación; ECM= Error Cuadrático Medio; y Sxy= Error Estándar de Estimación.

Este modelo fue sugerido por Higuchi y Carvalho (1994) y empleado para estimar la biomasa contenida en *Pinus taeda*, en un estudio de Sanquetta et al. (2001). Al correr las

regresiones, el ajuste de esta ecuación para la biomasa radicular fue bajo ( $R^2=0.499$ ). Sin embargo, el mejor ajuste para estimar la biomasa radicular en el estudio mencionado resultó de la ecuación 5 ( $R^2= 0.556$ ). No obstante, el estudio no especifica qué diámetro de raíces fue considerado.

Por su lado, Xiao y Ceulemans (2004) ajustaron ecuaciones para determinar la biomasa radicular en la especie *Pinus sylvestris* L. en un bosque templado de Finlandia. Dicho estudio sí distinguió entre raíces gruesas (> 5 mm de diámetro) y finas (< 5 mm de diámetro). Aplicando la ecuación 6 resultó un buen ajuste para las raíces finas, con un  $R^2$  de 0.992, a diferencia de los resultados obtenidos en el presente estudio.

La variabilidad de los ajustes encontrados dentro del género *Pinus* al relacionar el DAP y la altura del árbol con su producción de raíces finas es causa de incertidumbre. En este estudio no se determinó la existencia de una relación entre el DAP y la altura del árbol con la producción de raíces finas. Tampoco se indagó si el crecimiento de raíces finas guarda una relación mayor con otras variables. Sin embargo, estudios señalan que la producción de raíces finas depende de aspectos netamente biológicos, como la genética y la edad de los árboles (Guerra et al., 2005). Sin embargo, los factores del entorno como el clima, las condiciones de suelo (Massmann, 2000) y el índice de sitio (Berish, 1982) también ejercen una influencia, sobre todo en bosques tropicales (Yoda, 1978). Por ejemplo, se ha encontrado que en sitios con suelos de baja calidad y en los que la penetración de las raíces es difícil, se observa una mayor cantidad de raíces finas (Berish, 1982; Keyes y Grier, 1981).

**Carbono contenido en el área de la Microcuenca Santa Inés manejada por Zamorano.** La cantidad de biomasa estimada para la parte aérea de los árboles fue de 115.70 t/ha, para las raíces gruesas fue de 19.63 t/ha y para las raíces finas fue de 7.23 t/ha. Esto se traduce en aproximadamente 41,502.01 t de carbono para las 852.26 ha de la Microcuenca manejadas por Zamorano (Cuadro 5). Para efectos de la participación de la universidad en el Mercado de Carbono, y si se considera un precio de USD 6.36 por tonelada de CO<sub>2</sub> almacenado (Emisiones de Carbono futuras, 2016), se podría percibir un único ingreso de USD 913,044.33, sin considerar los costos de manejo forestal.

Cuadro 5. Estimaciones de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> contenido en el área de la Microcuenca Santa Inés manejada por Zamorano.

| <b>Biomasa aérea (t/ha)</b> | <b>Biomasa en raíces gruesas (t/ha)</b> | <b>Biomasa en raíces finas (t/ha)</b> | <b>Biomasa por unidad de área (t/ha)</b> | <b>Biomasa total (t)</b> | <b>Carbono total (t)</b> | <b>CO<sub>2</sub> total (t)</b> |
|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 115.70                      | 19.63                                   | 7.23                                  | 142.55                                   | 83,004.03                | 41,502.01                | 152,174.05                      |

Ramos y Ferreira (2000) estimaron una biomasa acumulada de 73.06 t/ha para dos rodales que suman un área de 51.30 ha ubicados en la región central de Honduras. Por otro lado, en el cerro El Tablón, ubicado en el municipio de Cabañas (Departamento de La Paz) se

estimó una acumulación de carbono de 22.50 t/ha (Albeto y Elvir, 2005). Además, para los municipios de Cabañas, Santa Ana y Opatoro, la cantidad de carbono acumulado fue de 913,925.50 t (Alberto y Elvir, 2008).

#### 4. CONCLUSIONES

- El rango de profundidad de suelo en el que hubo una mayor proporción de raíces finas de *P. oocarpa* fue de 0 - 30 cm. La media de raíces finas para este rango fue de 1.5 kg/m<sup>2</sup>, lo que representa un 67% del total. Los rangos de 30 - 50 cm y de 50 - 80 cm de profundidad de suelo contenían en promedio 0.4 y 0.2 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente.
- El modelo alométrico que resultó en un mejor ajuste para estimar la biomasa de las raíces gruesas de *P. oocarpa* en la Microcuenca Santa Inés fue  $\ln(B) = a + b\ln(D)$ . Los coeficientes obtenidos en el ajuste fueron  $a = -2.645$  y  $b = 2.113$ . Por su lado, el modelo con mejor ajuste para estimar la biomasa contenida en las raíces finas fue  $B = a + bD + c(D^2 + H)$ , siendo sus coeficientes  $a = -26.879$ ,  $b = 3.646$  y  $c = -0.054$ .
- La estimación del contenido de carbono para las 852.26 ha del bosque de pino de la Microcuenca Santa Inés bajo manejo de Zamorano fue de 41,502.01 t. En términos de CO<sub>2</sub>, son 152,174.05 t.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se debe determinar cuáles son los factores no biológicos que influyen en la productividad de la biomasa radicular del género *Pinus*, en las propiedades de la Escuela Agrícola Panamericana. Esto permitirá el ajuste de una ecuación cuyos resultados sean más acertados, por ejemplo, en función de las características del suelo y el índice de sitio.
- Se sugiere determinar si existe una variación en la productividad de las raíces finas del género *Pinus* según la edad de los árboles.
- Dirigir mayor investigación hacia la creación y ajuste de ecuaciones alométricas para bosques bajo condiciones tropicales. Esto permitirá contar con modelos que expliquen con mayor precisión el comportamiento de la biomasa en los bosques latinoamericanos.

## 6. LITERATURA CITADA

- Acosta, A. y Kucharsky, O. (2012). Estudio Edafológico y de cobertura para la modelación hidrológica con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica. (2016). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Recent Global CO<sub>2</sub>*. Recuperado el 18 de septiembre de 2016: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- Aguilar, J., Castillo, E. y Guerrero, G. (2009). Procesos de certificación de proyectos de captura de gases de efecto invernadero (GEI). *Revista Gestión y Ambiente*, 7-20.
- Alberto, D. y Elvir, J. (2005). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales de Cabañas, La Paz. 1-12.
- Alberto, D. y Elvir, J. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 67-78.
- Arévalo - Valderrama, G. y Gauggel, C. (2014). *Manual de Prácticas: Curso de Manejo de Suelos y Nutrición Vegetal. Tercer Año*. LITOCOM. Tegucigalpa.
- Baccini, A., Goetz, S., Walker, W., Laporte, N., Sun, M., Sulla-Menashe, D.,... Houghton, A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 182-185.
- Banco Mundial. (2011). *Emisiones de CO<sub>2</sub> (toneladas métricas per cápita)*. Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono, División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (Tennessee, Estados Unidos). Recuperado el 19 de septiembre de 2016, de: [http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?contextual=default&yend=2011&ylocations=HN&yview=baryear\\_high\\_desc=false](http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?contextual=default&yend=2011&ylocations=HN&yview=baryear_high_desc=false)
- Banco Mundial y Ecofys. (2015). *State and Trends of Carbon Pricing*. Recuperado el 30 de agosto de 2016, de <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/22630/9781464807251.pdf?sequence=5>

- Berish, C. (1982). Root biomass and surface area in tree successional tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 699-704.
- Camara de Industria y Comercio Ítalo-Hondureña. (2014). *1.4. Sector Forestal. Activos Forestales*. Tegucigalpa, Honduras. Recuperado el 19 de septiembre de 2016, de: <http://cicih.com/assets/files/proyectos/CAP%20IV%20SECTOR%20FORESTAL.pdf>
- Camps, M. y Pinto, M. (2004). Los sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. *Edafología*, 27-36.
- Cerruto, S., Boechat, C., Fehrmann, L., Gonçalves, L., y Gadow, K. (2015). Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal Eucalyptus trees in southeast Brazil. *Revista Árvore*, 353-363.
- DeFries, R., Rudel, T., Uriarte, M. y Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 178-181.
- Donoso, C. (1993). *Bosques templados de Chile y Argentina: variación, estructura y dinámica*. Texas: Universidad de Texas.
- Emisiones de Carbono futuras. (2016). *Emisiones de Carbono futuras - Dic 2016 (CFI2Z6)*. Recuperado de <http://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>
- Fonseca, W., Ruiz, L., Rojas, M. y Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales: Tropical Journal of Environmental Sciences*, 37-50.
- García, B. (1993). Potencial Hídrico de la Microcuenca de la Quebrada Santa Inés (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Gould, S. (1966). Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 587-640.
- Gudiel, D. (2015). Ecuación alométrica para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* del bosque natural de la Microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Guerra, J., Gayoso, J., Schlatter, J. y Nespolo, R. (2005). Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque*, 5-21.

- Hamilton, K., Bayon, R., Turner, G. y Higgins, D. (2007). *State of the Voluntary Carbon Market 2007*. Recuperado el 3 de septiembre de 2016, de: [http://www.greenresources.no/Portals/1/Articales/StateoftheVoluntaryCarbonMarket18July\\_Final.pdf](http://www.greenresources.no/Portals/1/Articales/StateoftheVoluntaryCarbonMarket18July_Final.pdf)
- Hernández, R. (2011-2015). *Plan de Manejo Forestal*. Francisco Morazán, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Higuchi, N. y Carvalho, J. (1994). Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da amazônia. *Seminário emissão x seqüestro de CO<sub>2</sub> - uma nova oportunidade de negócio para o Brasil, Rio de Janeiro*, 125-153.
- Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. (2015). *Anuario Estadístico Forestal 2015*. Recuperado el 18 de septiembre de 2016, de: <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2016/08/CIPF.Anuario-Estadistico-Forestal-de-Honduras-2015.pdf>
- Ketterings, Q., Coe, R., Noordwijk, M., Ambagau, Y. y Palm, C. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mix secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 199-209.
- Keyes, M. y Grier, C. (1981). Above and below-ground biomass net production in 40-year-old-Douglas-fir stand on low and high productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research*, 599-605.
- Kramer, P. (1974). Relaciones hídricas de suelo y plantas. Una síntesis moderna.
- Landberg, J., Linder, S. y McMurtrie, R. (1995). Effects of global change on managed forests. A strategic plan for research on managed forest ecosystems in a globally changing environment. *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, 1-17.
- Larios, M. (2011). *Evaluación preliminar sobre causas de deforestación y degradación de bosques en Honduras*. Programa Reducción de Emisiones de la Deforestación y Degradación de Bosques en Centroamérica y República Dominicana (REDD – CCAD/GIZ). Recuperado el 18 de septiembre de 2016, de: <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2015/08/Causas-de-la-deforestacion-y-degradacion-enHonduras.pdf>
- Macauley, M. y Richardson, N. (2011). Seeing the Forests and the Trees: Technological and Regulatory Impediments for Global Carbon Monitoring. *Berkeley Technology Law Journal*, 26(3), 1387-1405.
- Massmann, C. (2000). Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en suelos graníticos y metamórficos de las regiones VII, IX y X. *Universidad Austral de Chile*, 93.
- Organización de las Naciones Unidas. (2003). *Decisión 19/CoP.7 de las Partes sobre Modalidades y Procedimientos para las actividades de proyectos de Forestación y*

*Reforestación del Mecanismo para un Desarrollo Limpio en el primer periodo de compromiso del Protocolo de Kioto.* Milán (Italia).

- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis*. Recuperado el 24 de agosto de 2016, de: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Cambio Climático 2014. Mitigación del Cambio Climático*. Resumen para responsables de políticas. Recuperado el 18 de septiembre de 2016, de: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg3/WG3AR5\\_SPM\\_brochure\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure_es.pdf)
- Picard, N., Saint-André, L. y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 23 de agosto de 2016, de: <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>
- Pritchett, W. (1991). *Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento*.
- Programa REDD. (2016). *Programa Regional REDD/CCAD-GIZ*. Recuperado el 14 de septiembre de 2016, de: <http://www.reddccadgiz.org/elprograma.php>
- Ramos y Ferreira. (2000). Determinación de la cantidad y composición química de la biomasa aérea y subterránea del *Pinus oocarpa* (Tesis de pregrado). Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESNACIFOR), Honduras.
- Sánchez, J., Lucot, E., Bariac, T. y Trémoлиerès, M. (2008). Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). *Hydrological Processes*, 366-375.
- Sanford, R. y Cuevas, E. (1996). Root Growth and Rhizosphere Interactions in Tropical Forests. *Tropical Forest Plant Ecophysiology*, 268-300.
- Sanquetta, C., Watzlawick, L., Valdor, M. y Mello, A. (2001). Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. *Ciência Animal*, 415-427.
- Santantonio, D., Hermann, K. y Overton, W. (1977). Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiología*, 1-31.
- Valenzuela, T. (2001). Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. *Madera y Bosques*, 127.
- Vaninnen, P. y Mäkelä, A. (1996). Fine root biomass of Scots pine age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 231-238.

Voluntary Carbon Standard. (2007). *Voluntary Carbon Standard*. Recuperado el 18 de agosto de 2016, de <http://co2-sachverstaendiger.com/pdf/VCS%202007.1%20Guidance.pdf>

Werf, G., Morton, D., DeFries, R., Olivier, J., Kasibhatla, P., Jackson, R.,...Randerson, J. (2009). CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Climate Change*, 737-738.

Xiao, C.-W. y Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for below-and aboveground biomass for young Scots pines. *Forest and Ecology Management*, 177–186.

Yoda, K. (1978). Organic carbon, nitrogen and mineral nutrients stock in the soils of Pasoh Forest. *Malayan Nature Journal*, 229-251.