

**CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA EN PLANTACIONES DE PALMA ACEITERA
(*Elaeis guineensis* Jacq.) EN SHAMBILLO-AGUAYTIA**Melissa Manrique De Lara¹, Ronald Puerta²

Recepción: 28 de mayo de 2015

Aceptado: 01 de diciembre de 2015

Resumen

El objetivo principal fue estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de palma aceitera y así generar información técnica científica para la elaboración de proyectos de comercialización de créditos de carbono, en el marco del Protocolo de Kyoto; donde se evaluaron 5 plantaciones de edades diferentes en el ámbito del Valle de Shambillo en la región Ucayali, en plantaciones de palma aceitera con años de establecimiento 6, 9, 11, 12 y 13. Asimismo se determinó la ecuación alométrica (modelo de biomasa): $Biomasa = 0.0428 \text{ Edad}^{0.6749} \text{ Altura total}^{0.5891}$, con el fin de estimar la biomasa específica para la especie de palma aceitera en función a la información levantada mediante inventarios en el Valle de Shambillo, dicha ecuación fue elaborada en base a 15 palmeras de diferentes zonas con similares condiciones ambientales. De los resultados, se puede concluir que la plantación de 13 años de edad, presentó una mayor acumulación de carbono almacenado en la biomasa aérea. Los flujos de carbono para cada uno de las plantaciones fluctuaron desde 1.07 a 5.42 tC/ha/año. Este sistema resultó el más rentable para esta actividad con un ingreso anual aproximado de US\$ 43.03 dólares americanos, por tCO₂/ha/ año.

Palabras claves: Carbono, *Elaeis guineensis* Jacq., Biomasa aérea, Modelo matemático.**Abstract**

The main objective was to estimate the carbon stored in aboveground biomass of oil palm plantations and generate scientific and technical information for the drafting of marketing carbon credits under the Kyoto Protocol; with 5 plantations of different ages were evaluated in the field Shambillo Valley in the Ucayali region, oil palm plantations with years of establishment 6, 9, 11, 12 and 13. Allometric equation (model biomass) were also determined : $Biomass = 0.0428 \text{ Age}^{0.6749} \text{ Height}^{0.5891}$, to estimate the specific biomass for species of palm oil according to the information gathered through inventories in the Valley of Shambillo, this equation was developed based on 15 palm trees of different areas with similar environmental conditions. From the results, it can be concluded that planting 13 years old, had a higher accumulation of carbon stored in aboveground biomass. Carbon flows for each of the plantations ranged from 1.07 to 5.42 tC/ha /year. This system proved the most lucrative for this activity with an approximate annual income of US \$ 43.03 US dollars, per tCO₂ / ha / year.

Keywords: Carbon, *Elaeis guineensis* Jacq., ground biomass, Mathematical model.

¹ Ingeniera Ambiental, Universidad Nacional Agraria de La Selva, Tingo María – lara-mel17@hotmail.com² Docente del Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Introducción

El Dióxido de Carbono (CO₂), es uno de los gases de efecto invernadero más importantes producido por las actividades humanas, una de estas actividades es la deforestación. Actualmente, cerca de un 20% de las emisiones de CO₂ resultan de la eliminación y degradación de los ecosistemas forestales. La detención de la deforestación y la reversión a través de la reforestación y manejo sustentable, implica recapturar el CO₂, disminuir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y reducir el calentamiento global (1).

Las plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) ocupan más de 12 millones de hectáreas en tres continentes (África, Asia y América) y en el Perú son aproximadamente 73 076 ha. En nuestro país recientemente se está considerando como una fuente alternativa de ingresos en zonas rurales y una forma de promover el desarrollo sostenible especialmente en la selva peruana.

En los últimos 20 años se viene estableciendo palma aceitera en la amazonia peruana, encontrándose en las regiones de: San Martín (28 657 ha), Ucayali (26 723 ha), Huánuco (3 319 ha), Loreto (14 246 ha), este incremento se debe principalmente a la apuesta que realizaron por dicho cultivo los pequeños agricultores organizados (ex coccaleros) y las empresas privadas como Grupo Palmas y Grupo Malayo (2).

Dentro de este contexto, la estimación adecuada de la biomasa aérea de plantaciones de palma aceitera, constituye un elemento de gran importancia debido a que permite determinar las cantidades de carbono existentes en cada uno de estos individuos, y así poder determinar la cantidad potencial de carbono que puede ser fijado en una determinada superficie.

Por consiguiente, las plantaciones de palma aceitera parecieran ser candidatas de elección para la fijación de carbono en nuestra Amazonía peruana; aunque existe mucha información sobre el manejo agronómico de este cultivo, no se tiene la suficiente información sobre el potencial de fijación de carbono en este agroecosistema.

En tal sentido, en el presente trabajo nos hacemos las siguientes interrogantes ¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado existente en las plantaciones de palma aceitera en el Valle de Shambillo? ¿Cuál es la valorización de los flujos de carbono presente en estas plantaciones?; por lo que en el presente trabajo se pretende contribuir con la generación de información técnica de base para la elaboración de proyectos de comercialización de créditos de carbono, en el marco de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), propuesto por el Protocolo de Kyoto (PK).

Hipótesis

El modelo alométrico determina el carbono de la biomasa aérea en las plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el Valle de Shambillo, provincia de Padre Abad, Región Ucayali.

Objetivo general

Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.).

Objetivos específicos

- Desarrollar una ecuación alométrica para la especie de palma aceitera, (*Elaeis guineensis* Jacq.) aplicable a distintas zonas.
- Determinar el carbono almacenado en la biomasa aérea en plantaciones de palma aceitera en edades diferentes mediante el método alométrico.
- Valorizar los flujos de Dióxido de Carbono (CO₂) anuales que reduciría este sistema.

Materiales y métodos

Campo experimental

Ubicación

La investigación se realizó en plantaciones de beneficiarios que conforman la empresa Asociación de Palmicultores del Valle de Shambillo (ASPASH) que se muestran asociados con la empresa OLPASA (Oleaginosa Padre Abad S.A); políticamente se encuentran en el distrito y provincia de Padre Abad, región Ucayali.

El Valle de Shambillo está conformada por la cuenca del río Aguaytía, tributario del río Ucayali y cubre una superficie de 1 762 086 ha con una población de 360 000 habitantes. La cuenca del Aguaytía se extiende por el sudoeste hacia la ciudad de Pucallpa. Presenta un paisaje montañoso del lado occidental mientras que hacia el este es predominante plano e inundable, de fácil acceso terrestre, el valle se ubica en el lado más occidental de la Amazonía peruana y pertenece a la región Ucayali (3).

Materiales y equipos

Materiales

Balanza manual tipo aguja de 100 kg, balanza reloj Cavory de 50 kg, balanza manual tipo aguja de 5 kg, costales de polietileno de 50 kg, bolsas de polietileno 50 cm x 70 cm, bolsas de polietileno de 10 cm x 8 cm, bolsas de papel número 20, cera en barras, wincha de 50 m, wincha de bolsillo Stanley 5m/16', hoz malayo, clinómetro SUUNTO, vernier Mitutoyo 530-118, marco de madera de 1 m x 1 m, marco de madera de 0.5 m x 0.5 m, libreta de campo.

Equipos

Sierra eléctrica, motosierra STIHL 070, estufa eléctrica, cámara fotográfica Samsung S760, balanza analítica Citizen C T 3000 H, GPS Garmin MAP 60 CSx.

Metodología

El trabajo se ejecutó en las plantaciones de palma aceitera establecidas en un sistema de tres bolillos las cuales están separadas a una distancia de 9 metros por decisión de la empresa y por ser adecuada para este tipo de plantación; y cada hectárea posee 140 individuos de palma aceitera.

Selección y delimitación del área

Se seleccionó plantaciones de palma de 5 diferentes edades: 6, 9, 11, 12, 13 años y se delimitó un área de 100 m x 100 m (1 ha). Se trazó 5 líneas verticales principales en cada parcela y se formó 5 transectos (A, B, C, D y E), cuyas dimensiones de cada transecto fueron de 20 m x 100 m, para las evaluaciones de biomasa arbustiva-herbácea y hojarasca sobre la superficie del suelo. (Diseño a criterio)

Evaluación del carbono de la biomasa vegetal por el método alométrico

Se empleó una metodología para la evaluación de biomasa arbórea (4) y otra para la evaluación de biomasa herbácea, de hojarasca (5).

Luego para calcular la biomasa por hectárea, tanto en arbórea (todos los árboles medidos y registrados en la parcela), se usó la fórmula (6).

$B \text{ (t/ha)} = (B \text{ (kg)}/1000) \times 10000 / \text{área de la parcela}$
 $B \text{ (t/ha)} = \text{Biomasa (arbórea, herbáceas, árboles caídos hojarasca)} \text{ en toneladas por hectárea.}$
 $B \text{ (kg)} = \text{Biomasa (arbórea, herbáceas, árboles caídos hojarasca)} \text{ en kilogramos por parcela.}$
 Factor 1000 = Conversión de las unidades de la muestra de kg a t.
 Factor 10000 = Conversión del área (m²) de hectárea.

En cuanto a la determinación del valor de carbono almacenado total, varían en muchos estudios consultados, principalmente debido a la utilización de diferentes factores para la estimación de carbono en la biomasa seca.

Algunos autores utilizan el factor de 0.45, otros (7,8) utilizarán un factor de manera experimental (0.465). Mientras que algunos estudios (9) utilizan el factor de 0.50.

Cálculos de la biomasa vegetal

Biomasa arbórea viva (kg palmera⁻¹)

Para evaluar la biomasa arbórea viva (estípote y hojas) se utilizó la fórmula (4).

Peso seco del estípote:

Se ha demostrado que el peso de la materia seca por unidad de volumen del estípote (S) o PMS depende de la edad de la palma en años (a).

$$S = 0.0076 \text{ año} + 0.083$$

Cálculo del volumen u (dm³)

$$u = (\pi d^2 \times h)/4$$

Cálculo del peso seco, T (kg)

$$T = u \times S$$

Donde:

S = Densidad del tronco (kg dm⁻³)

h = Altura del estípote (h)

u = Volumen (dm³)

d = Diámetro Promedio

T = Peso seco (kg)

Observe que, si d y h están expresadas en dm, u está entonces en dm³ y T en kg.

Peso seco de las hojas:

Cálculo la sección transversal del peciolo (STP):

$$P = \text{ancho} \times \text{alto}$$

Cálculo el peso seco medio de la hoja.

$$W = 0.102 P + 0.206$$

Cálculo el peso seco total de las hojas.

$$\text{Peso seco total} = g \times W \text{ (kg)}$$

Donde:

P = sección transversal del peciolo

W = Peso seco medio de la hoja (kg):

g = número de hojas en la palma

Materia seca vegetativa total, V (kg palma⁻¹año⁻¹)

$$V = T + g \times W$$

El valor obtenido V (kg) también llamado Biomasa arbórea viva (BAV) (kg) de la palmera evaluada se multiplicará por las palmeras existentes por subparcela.

Donde:

BAV = Biomasa de árboles vivos en kg

BA = Biomasa de árboles

Para las plantaciones

$$BAV \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = ((BAV \text{ (kg)} / 1000\text{kg}) \times 10000\text{m}^2) / 900\text{m}^2$$

Biomasa arbustiva/herbácea (t ha⁻¹)

$$BAH \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = [(PSM / PFM) \times PFT] \times 0.01$$

Donde:

BAH = Biomasa arbustiva / herbácea, material seca

PSM = Peso seco de la muestra colectada (g)

PFM = Peso fresco de la muestra colectada (g)

PFT = Peso total por metro cuadrado (g)

0.01 = Factor de conversión

Biomasa de la hojarasca (t ha⁻¹)

$$Bh \text{ (kg)} = [(PSM / PFM) \times PFT] \times 0.04$$

Donde:

Bh = Biomasa de la hojarasca, material seca
 PSM = Peso seco de la muestra colectada (g)
 PFM = Peso fresco de la muestra colectada (g)
 PFT = Peso total por metro cuadrado (g)
 0.04 = Factor de conversión

Biomasa vegetal total (t ha⁻¹)

$$BVT (t ha^{-1}) = [(BAV + BAH + Bh)]$$

Donde:

BVT = Biomasa vegetal total
 BAV = Biomasa de árboles vivos
 BAH = Biomasa arbustiva y herbácea
 Bh = Biomasa de la hojarasca

Cálculo del carbono en la biomasa vegetal total (t ha⁻¹)

$$CBV (t/ha) = BVT \times 0.50$$

Donde:

CBV = Carbono en la biomasa vegetal
 BVT = Biomasa vegetal total
 0.50 = Constante (proporción de carbono, asumido por convención)

Determinación de la ecuación alométrica

Descripción de las palmeras sacrificadas y ubicación

Se utilizaron para la evaluación 15 palmeras provenientes de diferentes sectores en todo el Valle de Shambillo principalmente en los caseríos de Shambillo A, Shambillo B, Boquerón, Paujil, Selva Turística, Mediación y Río Blanco. Las palmeras fueron de diferentes edades y características dasométricas.

Cálculo la ecuación alométrica de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Se emplearon 15 palmeras con un rango de edades, diámetros y tamaños que permitieron elaborar las pruebas estadísticas como regresiones, correlaciones, prueba de T y Z. El procedimiento fue lo siguiente:

- Selección de árboles

Para el cálculo de la ecuación se utilizó el procedimiento propuesto por el Centro Internacional de Investigación Agroforesta (6). Se procedió a seleccionar 15 individuos de *Elaeis guineensis* Jacq., (palma aceitera), en sus diferentes caseríos del valle de Shambillo distrito de Padre Abad, se eligió aleatoriamente palmeras típicas; es decir, individuos que presenten la forma, sanidad del estípote y de las hojas. Cada individuo fue georreferenciado en coordenadas UTM y proyectado en el Datum WGS 1984.

- Medición de variables dasométricas

A cada individuo seleccionado se tomaron medidas con la mayor precisión posible como el diámetro

(inferior, centro y superior), altura del estípote (he), altura total (ht) y número de hojas (nh) correspondiente antes de ser derribado.

Los diámetros se midieron con cinta métrica, mientras que las alturas se estimaron con un clinómetro.

- Podado de hojas

A cada individuo seleccionado se procedió a podarlos por completo; hasta que la palmera quede sin hojas. Luego se pesaron todas las hojas para conocer su peso fresco total, asimismo se extrajo una muestra para ser llevado al laboratorio para el secado respectivo.

- Tumbado y medición de palmeras

Luego del podado de las hojas la palmera seleccionada se cortó a los 50 cm desde el nivel del suelo, luego se midió la longitud del estípote y la longitud total de la palmera para contrastar con las mediciones realizadas en pie; del mismo modo se midió el diámetro a ambos extremos y al centro del estípote.

Una vez tumbado la palmera se procedió a extraer una muestra del estípote que fue llevada al laboratorio donde se elaboró 20 probetas con dimensiones de 3 cm x 3 cm de sección transversal y 10 cm de longitud para poder encontrar la densidad básica de cada individuo.

- Cálculo de biomasa de hojas de palmera

Se colectaron muestras y se registró su peso fresco, luego se colocaron en bolsas papeles correctamente identificados y fueron secadas en la estufa a 75°C hasta lograr un peso constante y finalmente se registró su peso seco.

$$PST = [(PST \times PSM) / PFM]$$

Donde:

PFM = Peso fresco de la muestra
 PSM = Peso seco de la muestra
 PFT = Peso fresco total

Cálculo de la biomasa del estípote

- Cálculo de la densidad básica

La determinación de la densidad de *Elaeis guineensis* Jacq. "palma aceitera" se realizó de acuerdo con la Norma ITINTEC-PP-251 - 008. En el laboratorio se procedió a secar las probetas en una estufa a 75°C, de la cual se logró obtener el peso seco (gr). Para el cálculo de la densidad básica se utilizó la fórmula siguiente:

$$DB = WS (g) / Vol f (cm^3)$$

Donde:

DB = Densidad básica (g/ cm³)
 Ws = Peso seco (g)
 Volf = Volumen fresco (cm³)

- Cálculo del volumen del estípite

En el cálculo del volumen se utilizó la fórmula de Newton debido que el estípite de la palma aceitera no presenta una forma cilíndrica, sino forma cónica. Se puede decir que ésta fórmula nos da un resultado muy aproximado al volumen real del estípite además se requieren pocas mediciones y es fácil calcular, así se obtuvo el volumen total del estípite multiplicado por la densidad básica.

Se calculó el volumen con la formula siguiente:

$$V = [(Ai + 4 Ac + As)/6] \times L$$

Donde:

V = Volumen (m³)

Ai = Área inferior (m²)

Ac = Área central (m²)

As = Área superior (m²)

L = Largo (m)

- Cálculo de la Biomasa de cada palmera

Para la obtener la biomasa de cada palmera se procedió al siguiente cálculo:

$$Bp = Be + Bh$$

Donde:

Bp = Biomasa total de la palmera (kg)

Be = Peso del estípite = DB x V; de la palmera (kg)

Bh = Peso de hojas de la palmera (kg)

- Desarrollo de la ecuación alométrica

Para la elaboración de la ecuación alométrica para palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), se utilizaron como variables predictoras la densidad (g/cc), edad (e), altura del estípite (Ae), altura total (At), número de hojas (nh), diámetro inferior (Di), diámetro central (Dc), diámetro superior (Ds).

BTP = f (densidad, edad, altura (e, t), N° de hojas, diámetro (s, c, i))

Se realizaron pruebas estadísticas como la T de student entre BTP versus densidad (g/cc), edad (e), altura del estípite (Ae), altura total (At), numero de hojas (nh), diámetro inferior (Di), diámetro central (Dc), diámetro superior (Ds), a un nivel de confianza al 5% para decidir que variables entraran en el modelo matemático.

Igualmente, se realizaron ejercicios de regresión lineal, y la ecuación que presentó el mayor valor de coeficiente de determinación (R²) fue la que se utilizó para predecir la producción de biomasa de la palmera. Todas estas pruebas se realizaron con el programa estadístico SPSS 20.0.

Una vez que se seleccionó las variables predictoras se escogió una función potencial debido que demuestra más precisión, y luego se derivó para luego obtener una ecuación lineal múltiple, las constantes de la ecuación se determinaron con el software Microsoft Excel, finalmente se determinó la ecuación alométrica para estimar la biomasa.

$$Y = AX^{\alpha}Z^{\beta}\epsilon_0$$

$$\ln Y = \ln A + \alpha \ln X + \beta \ln Z + \ln \epsilon_0$$

Resultados y discusión

Ecuación alométrica de la palma aceitera

Para desarrollar la ecuación alométrica se trabajó con los datos de 15 palmeras evaluadas la cual es un procedimiento propuesto (6).

El modelo de regresión que mejor se ajusto fue del tipo lineal, utilizando como variables de predicción la densidad (g/cc), edad (e), altura del estípite (Ae), altura total (At), número de hojas (nh), diámetro inferior (Di), diámetro central (Dc) y el diámetro superior (Ds). La ecuación alométrica con las variables independientes edad y altura total para la palma aceitera fue de tipo potencial, con R² bastante aceptable.

Previo a esto se realizaron correlaciones y prueba de T correspondientes entre las variables disponibles: densidad (g/cc), edad (e), altura del estípite (Ae), altura total (At), número de hojas (nh), diámetro inferior (Di), diámetro central (Dc), diámetro superior (Ds) en relación a la Biomasa (t).

En el Cuadro 1 se muestra que aplicando la prueba de T estadístico, las variables densidad (g/cc), Altura del tronco (m) y Edad (años) y son las que presentan mayor varibilidad pero sólo muestran el

grado de normalización con 1.647, 1.965 y 0.729 ; la cual nos da una probabilidad de 0.151, 0.097, y 0.493 consecutivamente, así nos dice que hay probabilidad de conseguir diferencias estadística.

Cuadro 1. Pruebas de análisis descriptivo. Prueba de T estadístico.

| Fuente | Valor | Desviación típica | t | Pr > t | Límite inferior (95%) | Límite superior (95%) |
|------------------------|--------|-------------------|--------|---------|-----------------------|-----------------------|
| Densidad (g/cc) | 0.380 | 0.231 | 1.647 | 0.151 | -0.185 | 0.946 |
| Edad (años) | 0.011 | 0.016 | 0.729 | 0.493 | -0.027 | 0.049 |
| Altura tronco (m) | 0.100 | 0.051 | 1.965 | 0.097 | -0.025 | 0.224 |
| Altura Total (m) | -0.003 | 0.037 | -0.068 | 0.948 | -0.094 | 0.089 |
| Número de hojas | 0.011 | 0.013 | 0.843 | 0.432 | -0.021 | 0.042 |
| Diámetro inferior (m) | 0.192 | 0.458 | 0.420 | 0.689 | -0.928 | 1.312 |
| Diámetro del medio (m) | 0.834 | 0.514 | 1.622 | 0.156 | -0.424 | 2.092 |
| Diámetro superior (m) | -0.252 | 0.682 | -0.370 | 0.724 | -1.922 | 1.417 |

En el Cuadro 2 en las pruebas estadísticas, la desviación estándar muestra que las variables tanto como Número de hojas, Edad (años), Altura de tronco (m), Altura total (m), muestran mayor resultado con 3.478, 2.455, 2.090, 2.995, 2.995, respectivamente.

Cuadro 2. Pruebas de análisis descriptivo. Desviación estándar

| Variable | Obs. | Obs. con datos perdidos | Obs. sin datos perdidos | Mín. | Máx. | Media | Desv. típica |
|------------------------|------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|-------|--------------|
| Biomasa tn | 15 | 0 | 15 | 0.093 | 1.075 | 0.352 | 0.263 |
| Densidad (g/cc) | 15 | 0 | 15 | 0.152 | 0.808 | 0.304 | 0.160 |
| Edad (años) | 15 | 0 | 15 | 6.000 | 13.000 | 10.80 | 2.455 |
| Altura tronco (m) | 15 | 0 | 15 | 0.400 | 7.600 | 2.281 | 2.090 |
| Altura Total (m) | 15 | 0 | 15 | 4.400 | 15.600 | 7.627 | 2.995 |
| Número de hojas | 15 | 0 | 15 | 26.000 | 36.000 | 32.33 | 3.478 |
| Diámetro inferior (m) | 15 | 0 | 15 | 0.580 | 0.923 | 0.769 | 0.096 |
| Diámetro del medio (m) | 15 | 0 | 15 | 0.470 | 0.910 | 0.688 | 0.121 |
| Diámetro superior (m) | 15 | 0 | 15 | 0.400 | 0.700 | 0.596 | 0.086 |

En el Cuadro 3 se muestra que al realizar el análisis estadístico de correlación de Pearson se observó que entre las variables que poseían mejor correlación y grado de asociación, eran la edad y la altura total con R² de 0.668 y 0.887 respectivamente; y con mayores valores próximos a 1 que indica una fuerte asociación, de las cuales éstas fueron seleccionadas para predecir la ecuación alométrica.

Cuadro 3. Matriz de Correlación

| Variables | Densidad (g/cc) | Edad (años) | Altura tronco (m) | Altura Total (m) | Número de hojas | Diámetro inferior (m) | Diámetro del medio (m) | Diámetro superior (m) | Biomasa t |
|------------------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Densidad (g/cc) | 1.000 | 0.068 | -0.313 | - | -0.097 | -0.497 | -0.298 | -0.607 | -0.117 |
| Edad (años) | 0.068 | 1.000 | 0.580 | 0.493 | 0.008 | 0.160 | 0.235 | 0.030 | 0.668 |
| Altura del tronco (m) | -0.313 | 0.580 | 1.000 | 0.920 | 0.294 | 0.303 | 0.230 | 0.232 | 0.889 |
| Altura total (m) | -0.240 | 0.493 | 0.920 | 1.000 | 0.402 | 0.358 | 0.314 | 0.176 | 0.887 |
| Número de hojas | -0.097 | 0.008 | 0.294 | 0.402 | 1.000 | 0.157 | -0.305 | 0.017 | 0.235 |
| Diámetro inferior (m) | -0.497 | 0.160 | 0.303 | 0.358 | 0.157 | 1.000 | 0.613 | 0.716 | 0.401 |
| Diámetro del medio (m) | -0.298 | 0.235 | 0.230 | 0.314 | -0.305 | 0.613 | 1.000 | 0.652 | 0.459 |
| Diámetro superior (m) | -0.607 | 0.030 | 0.232 | 0.176 | 0.017 | 0.716 | 0.652 | 1.000 | 0.263 |
| Biomasa (t) | -0.117 | 0.668 | 0.889 | 0.887 | 0.235 | 0.401 | 0.459 | 0.263 | 1.000 |

En el Cuadro 4 se muestra el procedimiento para determinar la ecuación alométrica de la palma aceitera con las variables seleccionadas antes con las diferentes pruebas estadísticas aplicadas, que

son la edad y la altura total con la cual, se ajustó a una ecuación potencial donde se aplicó logaritmo para obtener una ecuación lineal y determinar las constantes de la ecuación alométrica de la palma aceitera.

Cuadro 4. Procedimiento para la determinación de la ecuación alométrica.

| | | |
|---|-----------------------|-------------------------------------|
| $Y = A X^\alpha Z^\beta \epsilon_0$ | | |
| Y= Biomasa | $\alpha =$ Constante | $\epsilon_0 =$ Error de la ecuación |
| A = Constante | Z = Altura total | |
| X = Edad | $\beta =$ Constante | |
| $\ln Y = \ln A + \alpha \ln X + \beta \ln Z + \ln \epsilon_0$ | | $\Delta \epsilon \rightarrow 0$ |
| $Y^* = K + \alpha X^* + \beta H^*$ | | |
| $Y^* = \ln(\text{Biomasa})$ | | $H^* = \ln(\text{Altura total})$ |
| $X^* = \ln(\text{Edad})$ | | $K = \ln A$ |
| $K = \ln A$ | $\rightarrow A = e^K$ | $\rightarrow A = e^{-3.1521}$ |
| $Y = 0.0428 X^{0.6749} Z^{0.5891}$ | | |
| Biomasa = 0.0428 Edad^{0.6749} Altura Total^{0.5891} | | |

En el Cuadro 5 se muestra que la ecuación alométrica de la palma aceitera encontrada es confiable debido que presenta un coeficiente de determinación (R²) de 0.846 y en Cuadro 19 se muestran las constantes encontradas de las variables seleccionadas ajustadas a una ecuación potencial de la ecuación encontrada.

Cuadro 5. Cuadro del análisis de regresión múltiple

| Estadísticas de la regresión | |
|--|------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0.92001252 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0.84642304 |
| R ² ajustado | 0.82082688 |
| Error típico | 0.29719198 |
| Observaciones | 15 |

Estimación de la biomasa aérea total en las plantaciones de edades diferentes por el método alométrico

Al comparar el almacenamiento promedio en la biomasa aérea en las plantaciones se puede apreciar que el mayor aporte de biomasa retenida se encuentra en la biomasa arbórea de 13 años de edad con 65.04 t/ha y la de menor aporte fue la plantación de 6 años con 12.80 t/ha (Figura 1).

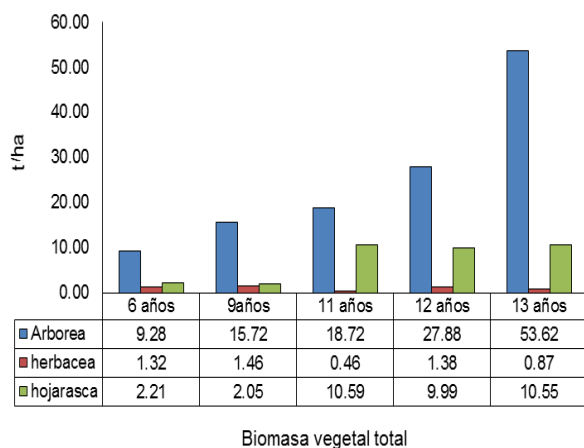


Figura 1. Biomasa aérea total en las plantaciones de edades diferentes

Asimismo, se observa que los coeficientes de variación muestran valores altos con un rango de 20% -70%. Esto se debe que los sistemas conforme van incrementando su edad a través del tiempo, son más vigorosos y por lo tanto se produce mayor acumulación de biomasa; es decir, los sistemas con mayor crecimiento e incremento de la biomasa presentan los valores más altos de acumulación de carbono (10 y 11).

Por componente entendemos: palmeras vivas, herbáceas y hojarasca, y la agrupación de dichos componentes como la biomasa vegetal total. En base a la información de la Figura 1; la biomasa de la palmera es la que posee mayor cantidad de materia seca acumulada en las diferentes edades y la de menor cantidad acumulada ocurre en la biomasa de hojarasca.

En la Figura 1 se comparan las edades de plantaciones respecto a la biomasa encontrada en cada componente y la variabilidad que presenta en cada parcela.

Evaluación del carbono almacenado en la biomasa aérea de la palma aceitera por el método alométrico.

El almacenamiento de carbono aéreo en la edad de 13 años es mayor que las demás edades con 32.52 tC/ha; seguido con la edad de 12 años con 19.63 tC/ha; y la de menor almacenamiento es la edad de 6 años con 6.4 tC/ha, debido que los sistemas con mayor crecimiento e incremento de la biomasa presentan los valores más altos de acumulación de carbono (10).

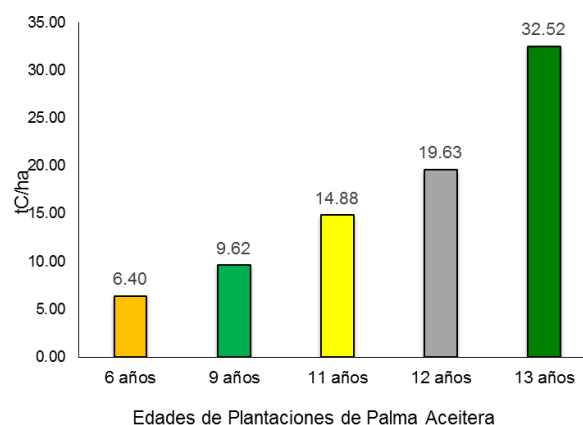


Figura 2. Carbono almacenado en las diferentes edades de plantación.

En la Figura 2 se puede observar que, al tener plantaciones de diferentes edades, se puede apreciar diferencias en el carbono almacenado; en gran medida se debe a las coberturas vegetales, a labores culturales (limpieza) que se realizan en su mantenimiento, a condiciones biofísicas, etc.

Del mismo modo se puede apreciar de manera general que las plantaciones de mayor edad almacenan mayor cantidad de carbono aéreo.

Evaluación del flujo de carbono

Estos flujos anuales se han calculado dividiendo la biomasa acumulada entre la edad del sistema, de esta forma se expresa la dinámica de la acumulación de carbono. Es preciso destacar que la comunidad internacional considera los flujos reales de carbono almacenado cada año (expresados en CO₂/ha/año), para el otorgamiento de créditos por este servicio ecosistémico.

Los flujos de carbono para cada uno de los sistemas fluctuaron desde 1.47 a 5.42 tC/ha/año y

estuvieron en función de la biomasa acumulada en el tiempo de crecimiento y es muy variable y dinámico por el manejo y todas las pérdidas que pudo haber ocurrido por la cosecha de frutos, enfermedades, pérdidas biofísicas como erosión por escorrentía, humedad etc.

La plantación de 13 años fue la que presentó mayor flujo con 5.42 tC/ha/año seguido por la plantación de 12 años con 3.27 tC/ha/año y el menor flujo fue la plantación de 6 años. Probablemente los flujos de fijación de carbono varían según las edades fisiológicas, de las dinámicas de cada ecosistema particular, esto influido por su localización.

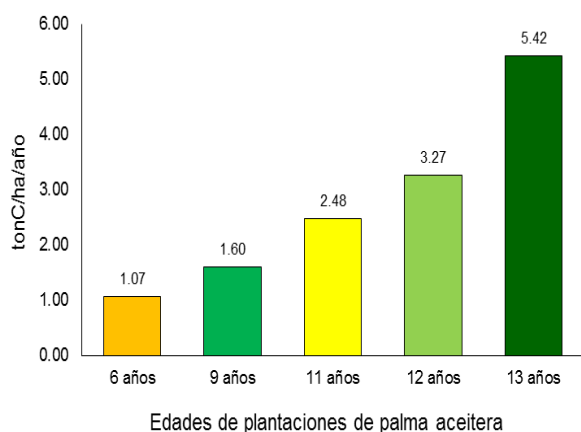


Figura 3. Flujo anual de carbono en edades diferentes de plantaciones de palma aceitera de diferentes edades.

Valoración económica

El Cuadro 10 se presentan los datos referenciales respecto a las posibles ganancias que recibirían los propietarios de los sistemas evaluados según el precio actual de las emisiones reducidas de dióxido de carbono CO₂, en el mercado internacional US\$ 4.80 dólares por tCO₂/ha/año (12).

Cuadro 10. Estimación de los créditos de carbono para cada uno de las edades de palma aceitera.

| Edades SUT | Carbono almacenado SUT tC/ha | flujo carbono SUT tC/ha/año | flujo x 3.667 tCO ₂ equivalente (t/ha/año) | tCO ₂ x US\$ 4.8 Monto a recibir cada (año/t/ha) |
|------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|
| 6 | 6.40 | 1.07 | 3.91 | 18.78 |
| 9 | 9.62 | 1.07 | 3.92 | 18.80 |
| 11 | 14.88 | 1.35 | 4.96 | 23.81 |
| 12 | 19.63 | 1.64 | 6.00 | 28.79 |
| 13 | 32.52 | 2.50 | 9.17 | 44.03 |

La plantación de palma aceitera más rentable para esta actividad es de la edad de 13 años, con un ingreso anual aproximado de US\$ 43.03 dólares americanos, por tCO₂/ha/año.

Seguido por la plantación de 11 y 12 años con un ingreso de US\$ 23.81 y 28.79 dólares americanos tCO₂ / ha / año. Los ingresos menores se

encuentran en las edades de 6 y 9 años con un ingreso de US\$ 18.78 y 18.80 tCO₂/ ha / año, respectivamente.

Estos sistemas tienen una dinámica flexible, y podrían tener una oportunidad de mejora en cualquiera de los periodos de desarrollo en que se encuentren los sistemas, todo depende del tipo de manejo que se les implemente.

Discusión

Ecuación alométrica de la palma aceitera

La ecuación para determinar la biomasa aérea en función de la edad y la altura total presentó un coeficiente de determinación alto (R²= 0.8464). En el Cuadro 20 se presenta los valores de los parámetros del modelo $Y = AX^{\alpha}Z^{\beta}C_0$, se presenta la distribución de los datos observados y los valores ajustados de acuerdo con la ecuación de regresión generada.

De la metodología utilizada (5), que recomienda tomar diámetros a la altura del pecho, por otro lado (13) se recomienda utilizar diámetro a la altura del pecho a 30 cm del suelo y la edad como variables predictoras para encontrar la biomasa arbórea en SUT de cacao, en esta investigación se decidió tomar como variables predictoras a altura total y la edad debido a que la palma aceitera no presenta características de un árbol.

Asimismo, con los resultados obtenidos se puede afirmar que mediante el modelo alométrico se puede determinar el carbono de la biomasa aérea en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.).

Estimación de la biomasa aérea total en las plantaciones de edades diferentes

La cantidad de biomasa de la palmera obtenida mediante las ecuaciones alométrica (4); es decir cuyo incremento de la biomasa de palmera viva es dependiente de la altura, número de hojas y diámetro de la palma aceitera. Asimismo, al evaluarse plantaciones con edades entre 11 y 19 años utilizando la misma ecuación, obtuvo valores entre 11.4 t/ha y 17.1 t/ha (14), valores muy cercanos a los encontrados en nuestra investigación.

Además, se puede observar que los aportes de la biomasa no arbórea (arbustiva, herbácea y hojarasca), son pequeñas cantidades con 0.003 t/ha (Cuadro 20 y Figura 12); estos resultados difieren con lo encontrado por otros autores (14), con un promedio de 0.5, la diferencia es notable, pero en ambos casos esta biomasa siempre aportará pequeñas cantidades. Esta variación se asume a las diversas actividades culturales (limpieza) que se realizadas en su mantenimiento, debido que algunos agricultores optan por retirar las hojas podadas de la plantación, mientras que otros

las conservan acumulándolas en las calles intermedias entre plantas, las que forman bloques y se descomponen naturalmente.

Además se debe tener en cuenta también que no se evaluó los frutos de la palma aceitera. Otro factor que hace variar esta cantidad es la ausencia de madera muerta debido que durante el tiempo transcurrido desde la tumba del bosque primario; mucha de la madera se encuentra descompuesta, otras fueron retiradas y utilizadas como combustible (leña).

Evaluación del carbono almacenado en la biomasa aérea de la palma aceitera por el método alométrico.

Comparando estos resultados con otros sistemas de uso de la tierra se observa que existe grandes diferencias, si se compara con la evaluación de carbono aéreo almacenado en tres sistemas de uso de la tierra (bosque primario remanente, pastizal y palma aceitera), siendo el bosque primario que tuvo el mayor stock de carbono arbóreo almacenado (120.6 t/ha) (15).

(11), determinaron la capacidad de captura de carbono en la biomasa aérea en distintos sistemas de uso de la tierra, evaluados en San Martín a diferentes niveles altitudinales, siendo el bosque primario que contiene mayor contenido de carbono almacenado (485 t/ha), siendo este valor mayor a lo obtenido de la biomasa aérea de un bosque secundario de 30 años es 215.7 t/ha (16).

Al evaluarse el almacenamiento de carbono en aguajales de la Reserva Nacional Pacaya Samiria, se obtiene resultados de 115.40 t/ha y 424.7 t/ha el contenido de carbono vegetal almacenado en los aguajales denso y mixto respectivamente, destacándose la mayor contribución de carbono del suelo 369.13 t/ha en aguajales densos y 336.22 t/ha en aguajales mixtos (16).

Por otra parte, determinó el carbono total aéreo almacenado en sistemas de bosques secundarios y SAF de cacao más laurel obteniendo mayor contenido de carbono aéreo en los bosques secundarios (102.1 t/ha) (17),

Señalado los cuatro sistemas de uso de la tierra (bosque primario y secundario, aguajales, palma aceitera) haciendo una comparación entre ellos nos damos cuenta que el bosque primario es el que almacena mayor carbono aéreo, siendo la palma aceitera la que captura menos.

En la edad de 13 años el almacenamiento de carbono aéreo total es mayor que con 32.52 tC/ha; seguido la edad de 12 años con 19.63 tC/ha; y la de menor almacenamiento es la edad de 6 años con 6.4 tC/ha (Figura 13), esta diferencia se debe que existen factores que pueden incrementar o disminuir la cantidad de carbono almacenado

debido a la calidad de sitio, la especie utilizada y la etapa de desarrollo en la que se encuentre la planta evaluada (18).

Estos resultados comparado con los resultado obtenidos a 11 años de edad (126.32 t/ha) y a 8 años de edad (124.07 t/ha) determinado por el método alométrico (19), supera ampliamente debido que en nuestro estudio no se utilizó la ecuación para evaluar la biomasa arbórea viva sugerida por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería; en vez de ella se utilizó la generada por (4).

Asimismo,(14) se obtuvo un carbono promedio de 14.4 t/ha; en plantaciones entre 11 y 19 años, comparado con nuestros resultados se puede observar la similitud de sus resultados con la plantación de 11 años evaluado en esta investigación esto debido que las dos investigación se realizaron en la misma zona.

Evaluación del flujo de carbono

Según el estudio (10), el sistema de 20 años de cacao ubicado en Pucallpa fijó 200 tC/ha con un flujo encontrado de 2.3 tC/ha/año; (13), en el SUT cacao combinado con especies forestales el mayor flujo encontrado fue 3.63 tC/ha/año, comparado con el (17) cuyo flujo de carbono en las edades de 9,10 y 11 años para el SAF cacao + laurel es de 5.59, 6.95 y 7.60 t/ha/año mientras que para los bosques secundarios fue de 3.08, 7.48 y 9.28 t/ha/año, observamos que este posee los más altos flujo; igualmente en esta investigación se obtuvo un promedio de 2.77 tC/ha/año, comparado con los demás SUT descritos observamos que es menor el flujo esto debido que lo SUT mencionados presentan árboles y por definición son los que almacena más carbono en su estructura.

Valoración económica

En la investigación la plantación de palma aceitera con 13 años presentó el mayor ingreso económico con US\$ 44.03 dólares americanos; obteniendo un promedio entre todas las plantaciones el ingreso sería US\$ 26.84.

Respecto a la acumulación de carbono en este sistema agroforestal podría contribuir a la economía familiar si se crean las condiciones y certificados de reducción de emisión de gases de efecto invernadero; y generar ingresos complementarios por la venta de este servicio ecosistémico a la sociedad (17).

Conclusiones

1. La ecuación alométrica encontrada para determinar la biomasa fue: $Biomasa = 0.0428 Edad^{0.6749} Altura Total^{0.5891}$ del tipo potencial, esto a un nivel de confianza del 95% y se ajusta a diferentes tipos de palmeras de zonas con similares condiciones edafológicas.

2. La cantidad de carbono aéreo encontrado en las plantaciones de 13, 12, 11, 9, 6 años fueron de 32.52 tC/ha, 19.63 tC/ha, 14.88 tC/ha, 9.62 tC/ha y 6.4 tC/ha respectivamente.
3. Los flujos de carbono para cada uno de los sistemas fluctuaron desde 1.07 a 5.42 tC/ha/año y la plantación más rentable para esta actividad es de la edad de 13 años con un ingreso anual aproximado de US\$ 43.03 dólares americanos, por tCO₂/ha/año. A su vez la menos rentable fue el de la edad de 6 años con US\$ 18.78 dólares americanos por tCO₂/ha/año.

Referencias bibliográficas

1. Schlegel B. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Universidad Austral de Chile. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales 8 al 20 de octubre del 2001. Valdivia, Chile; 2001.
2. León J. Área de palma aceitera se quintuplicó en Perú en los últimos 15 años. Agencia Agraria de Noticias. Lima, Perú. 2014; 12(1).
3. Ugarte L. Evaluación de los factores de sitio en la productividad de *Calycophyllum spruceanum* b. (Capirona) a través del índice de sitio en la Cuenca del Río Aguaytía, Ucayali-Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú; 2008.
4. Fairhurst T, Härdter R. Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields. In: *El International Plant Nutrition Institute*. Trad, español. por E. Maldonado, F. Maldonado, R. Jaramillo. Medellín, Colombia; 2003.
5. Arévalo L, Alegre J, Rios E, Callo Concha D, Palm, CH. Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú. IV Congreso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais. Brasil; 2002.
6. Rugnitz M, Chacon M, Porro R. Guía para la determinación de carbono em pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú; 2009.
7. Brown S, Gillespe A, Lugo A. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 1989; 35(4): 881-902.
8. Chacón P, Leblanc H, Russo R. Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica. Universidad EARTH. Las Mercedes de Guácimo, Costa Rica; 2007.
9. IPCC. Resumen técnico. En cambio climático 2007: Mitigación. Contribución del grupo de trabajo III al cuarto informe de evaluación del panel gubernamental de expertos sobre cambio climático. Cambridge University Press. Cambridge; 2007.
10. Alegre J, Arevalo L, Ricse A. Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonia peruana. ICRAF/INIA. Perú; 2002.
11. Lapeyre T, Alegre J, Arévalo L. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Revista Ecología Aplicada*. 2004; 3(1,2): 35-44.
12. Peters, M. State of the voluntary carbon markets. *Forest trends Ecosystem Marketplace*. EE. UU; 2014.
13. Larrea G. Determinación de las Reservas de Carbono en la biomasa aérea de combinaciones agroforestales de *Theobroma cacao* L. & Determinación De La Ecuación Alométrica para el Cacao. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú; 2007.
14. Hinostroza E. Cuantificación del carbono en la biomasa aérea de tres diferentes usos de la tierra en la cuenca de aguaytía sectores: Irazola, Curimaná y campo verde-Región Ucayali. Tesis en Ing. Forestal. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú; 2012.
15. Vargas M. Estimación de carbono aéreo en bosque secundario, Pucayacu-Huánuco. Tesis en Ing. Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú; 2008.
16. Freitas A, Otarola A, Del Castillo T, Linares B, Martínez D, Malca S. Servicios ambientales de almacenamiento y secuestro de carbono del ecosistema aguajal en la reserva nacional Pacaya Samiria, Loreto- Perú. Documento técnico N° 29. Iquitos, Perú; 2006.
17. Bringas H. Estimación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) comparado con un bosque secundario de tres edades. Tesis. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María-Perú; 2010.
18. Smith J, Sabogal C; Jong W, Kairmowitz D. Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. CIFOR; 1997.
19. De La Cruz M. Estimación del carbono almacenado en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) de diferentes edades en Pumawasi- Uchiza. Tesis. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú; 2010.