



Fijación de carbono en un sistema silvopastoril (*Erythrina berteroana* Urban y *Brachiaria brizantha* CV Toledo) de una explotación lechera en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Carbon fixation in a silvopastoral system (*Erythrina berteroana* Urban and *Brachiaria brizantha* CV Toledo) from a dairy farm in the Northern Huetar Region of Costa Rica

Luis Alberto Camero-Rey^{✉1}

Palabras clave

Sistema Silvopastoril, balance de carbono, fijación de carbono, emisión de carbono, fermentación ruminal.

Resumen

La investigación se desarrolló en la finca La Esmeralda, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el distrito Florencia, cantón San Carlos, provincia de Alajuela, Costa Rica. El ensayo se estableció en un potrero dedicado a pastoreo de vacas en producción que inicialmente presentaba una cobertura de especies gramíneas (*Ischaemum indicum* y *Paspalum fasciculatum*) con un alto grado de degradación. Para establecer el primer componente arbóreo (*Erythrina berteroana*) se utilizó estacas con 8 a 12 cm de diámetro y 1,5 a 2 m de largo. Se realizó una incisión (1 cm) a lo largo de la estaca y se plantaron en surcos de 10 cm de profundidad y 20 m de distancia entre los surcos, para un total de 320 m lineales ha⁻¹. La semilla de *B. brizantha* se distribuyó al voleo en el área experimental a razón de 5,5 kg ha⁻¹. A los 120 días de establecido el pasto *B. brizantha*, se inició el pastoreo rotacional con períodos establecidos de 30 días de descanso. Al final del período experimental se cosechó la biomasa total (aérea y raíces del componente arbóreo) para determinar producción y contenido de carbono en el tejido. Bajo las condiciones en que se desarrolló el estudio, se encontró que el balance (fijación y emisión) de carbono en el sistema silvopastoril (*Brachiaria brizantha*/*Erythrina berteroana*) resultó positivo con 3820 kg ha⁻¹ año⁻¹, siendo superior las fijaciones respecto a las emisiones. El mayor aporte al balance positivo por fijación de carbono en el sistema se encontró en el suelo (45720 kg ha⁻¹), seguido del componente herbáceo, heces producidas por los animales en pastoreo y en componente arbóreo. El mayor aporte a la emisión de carbono en el sistema lo representó el componente herbáceo representado en este caso por la fermentación ruminal del forraje consumido. El incremento del contenido de materia orgánica del suelo aportado por la biomasa de los componentes pasto-árbol y la deposición de heces producidas por los animales en pastoreo favorecieron el balance positivo del sistema.

Key words

Silvopastoral system; balance of carbon; carbon fixation; carbon emission; ruminal fermentation.

Abstract

The research was conducted at La Esmeralda farm, owned by the Costa Rica Institute of Technology (TEC), in the district of Florencia, canton of San Carlos, province of Alajuela, Costa Rica. The experiment was conducted in a paddock used for cow grazing in a production stage that initially was covered with graminaceous species (*Ischaemum indicum* and *Paspalum fasciculatum*) with a high degree of degradation. To establish the first arboreal component (*Erythrina berteroana*), stakes with a diameter between 8 and 12 cm and 1.5 to 2 m in length were used. An incision (1 cm) was done throughout the plant and planted in furrows 10 centimeters deep and 20 meters apart between the furrows for a total of 320 linear meters ha⁻¹. The *B. brizantha* seed was distributed broadcast in the experimental area at a rate of 5.5 kg ha⁻¹. After 120 days of establishing the *B. brizantha* pasture, rotational grazing began with established periods of 30 days of rest. At the end of the experimental period the total biomass (aerial and roots of the arboreal component) was harvested to determine production and carbon content in the tissue. Under the conditions in which the study was conducted, it was possible to find a positive balance of carbon (fixing and emission) in the silvopastoral system (*Brachiaria brizantha*/*Erythrina berteroana*) with 3820 kg ha⁻¹ año⁻¹, higher fixations compared to emissions. The biggest contribution to the positive balance for carbon fixation in the system was found in the soil (45720 kg ha⁻¹) followed by the herbaceous component, feces produced by grazing animals and tree component. The greatest contribution to carbon emission in the system corresponded to the herbaceous component represented in this case by the ruminal fermentation of the forage consumed. The biomass of the pasture-tree components and the deposition of feces produced by the grazing animals increased the content of the organic matter of the soil and that favored the positive balance of the system.

Recibido: 15 noviembre, 2019

Aceptado: 22 marzo, 2020

Publicado: 20 mayo, 2020

DOI: 10.18860/rath.v2i2.5194

1 M. Sc. en Sistemas de Producción Animal. correo[✉]: acamero2003@yahoo.com.

Introducción

La producción ganadera a nivel mundial es cuestionada tanto por el deterioro físico del suelo causado por el pisoteo, como por su elevado aporte al incremento de gases contaminantes, que contribuyen al efecto invernadero y cambio climático global. Una inmejorable referencia sobre este aspecto se puede encontrar en la publicación de la FAO [1] titulada “*La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones*”, donde se hace un estudio profundo de los impactos del sector ganadero en el medio ambiente. De allí la importancia de encontrar variantes en el modelo ganadero hacia lo que algunos investigadores llaman “ganadería amigable con el ambiente”.

La maquinaria fotosintética de las plantas es sin duda alguna espectacular. Esto se puede corroborar con los datos reportadas por Hernández [2] quien señala una producción anual de materia seca estimada en $1,55 \times 10^{11}$ toneladas, con aproximadamente 60% formada en la tierra, el resto en océanos y aguas continentales. En los ecosistemas forestales, el secuestro de carbono se efectúa mediante el intercambio de carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, almacenándolo en la biomasa y en el suelo. Por fotosíntesis, los árboles absorben dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y lo almacenan como carbono y simultáneamente emiten oxígeno a la atmósfera, siendo las plantas de crecimiento rápido las que absorben mayor cantidad de CO_2 [3], mientras que los árboles viejos absorben poco CO_2 , al igual que los árboles muertos [4].

Los sistemas agroforestales como actividades agropecuarias representan sumideros importantes de carbono; entre estos destacan los sistemas silvopastoriles (SSP). Camero *et al.* [5] mencionan que los sistemas silvopastoriles permiten la rehabilitación de pasturas degradadas, la prevención del deterioro de los recursos naturales y el aseguramiento de la competitividad ante la apertura de mercados; conceptualizando la producción animal en el contexto de que los sistemas silvopastoriles constituyen un enfoque válido y necesario. Mannelje *et al.* [6] afirman que los sistemas productivos y los ecosistemas silvopastoriles en América Tropical son capaces de secuestrar y almacenar grandes cantidades de carbono en el suelo en comparación con los bosques naturales.

Es indudable que otro elemento de importancia en el ambiente es el metano (CH_4) como gas de efecto invernadero. Los datos reportados por Moss *et al.* [7] indican que el gas CH_4 es muy superior en su capacidad de absorción de radiación que el CO_2 . Se ha referenciado en muchos trabajos y opiniones de que las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen grandemente a la emisión de gases de efecto invernadero, en especial el CH_4 . Tanto es así, que la FAO [1] afirma que la ganadería bovina es la responsable del 18% de los gases que causan el calentamiento global. Berra *et al.* [8] y Fernández *et al.* [9] han señalado que después del sector energético, la ganadería es la actividad que más aporta al cambio climático por emisión de gases de efecto invernadero.

Los trabajos de Mora [10], Villanueva e Ibrahim [11] y Ruiz *et al.* [12] dan pauta para la implementación de otras investigaciones similares aunque en agroambientes distintos.

El objetivo general de este estudio fue cuantificar la cantidad de carbono fijado a partir de la biomasa arbórea y gramínea (aérea y raíces), carbono fijado en el suelo y el carbono fijado por las heces de los animales en pastoreo en un sistema silvopastoril (*Brachiaria brizantha/Erythrina berteroana*) en una explotación lechera en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Materiales y métodos

Localización del estudio

La investigación se desarrolló en la finca La Esmeralda, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), en el distrito Florencia, cantón San Carlos, provincia de Alajuela, Costa Rica. La misma está localizada geográficamente a $10^\circ 22'$ Latitud Norte, $84^\circ 31'$ Longitud Oeste y a una altura de 160 msnm. Las condiciones climatológicas presentan una temperatura máxima de $30,1^\circ\text{C}$, una media mínima de $21,5^\circ\text{C}$ y una media general de $25,6^\circ\text{C}$; la precipitación anual promedio es de 3300 mm; la humedad relativa promedio es 84% con una máxima y mínima de 95 y 60%, respectivamente. La zona se clasifica como Bosque Húmedo Tropical [13].

El ensayo se estableció en un potrero dedicado a pastoreo de vacas en producción de la finca La Esmeralda del TEC. Anteriormente en el

área experimental predominaban dos especies gramíneas: *Ischaemum indicum* (ratana) y *Paspalum fasciculatum* (gamalote), con un alto grado de degradación y sometido a un régimen de pastoreo de 12 horas de ocupación y 17 días de descanso. Seis meses antes de la instalación de un nuevo componente herbáceo de *Brachiaria brizantha* CV. Toledo, se plantó el componente arbóreo de poró (*Erythrina berteroana* Urban), para asegurar una altura de al menos 2 m en el mismo y evitar daños por ramoneo. El material vegetativo (estacas) de poró se obtuvo en la región Huetar Norte (Sarapiquí y Río Frío) producto de cercas vivas. Se utilizó la parte media de la estaca, con un diámetro entre 8 y 12 centímetros y 1,5 a 2 metros de largo, y se realizó una incisión (1 cm) a lo largo de la estaca para beneficiar la formación de raíces. Las estacas fueron plantadas en surcos de 10 centímetros de profundidad y 20 m de distancia entre los surcos para un total de 320 metros lineales ha⁻¹ (Figura 1). La semilla del pasto *Brachiaria* se distribuyó al voleo en el área experimental a razón de 5,5 kg/ha.

El contenido de materia parcialmente seca se cuantificó por secado en un horno de circulación de aire caliente forzado, a una temperatura de 50°C durante 76 horas, el peso de la muestra se determinó una vez que el material estuvo en equilibrio con la humedad ambiente. El contenido de Proteína Cruda (PC) se midió con el equipo de laboratorio "Nitrogen Analyzer Rapid N Cube". El contenido de Fibra Ácido Detergente (FDA) y Fibra

Neutro Detergente (FDN) se determinó mediante la adaptación de la metodología de Van Soest *et al.* [14] y Komarek [15] utilizada por Arredondo [16] para el equipo de laboratorio "Fiber Analyzer" (ANKOM TECHNOLOGY New York, USA). La digestibilidad aparente in vitro (DIVMS) se midió con el uso de la tecnología Ankom Método 3. Para la determinación del Carbono Orgánico se utilizó la metodología Walkley y Black.

Carbono fijado por los componentes del sistema

Para la determinación del carbono fijado por la biomasa del componente arbóreo, se cosechó al ras del suelo cuatro hileras de árboles de 6 m de longitud cada una y se pesó en campo la totalidad de la biomasa cosechada. Para la extracción de las raíces se utilizó una retroexcavadora en un área de 5 m de diámetro en cada una de las hileras muestreadas. Todas las raíces de los árboles se pesaron en campo. De las muestras de la biomasa aérea y raíces se tomaron submuestras para determinar contenido de materia seca. A partir de la biomasa seca obtenida (aérea y raíces) se cuantificó la producción de materia seca (kg MS ha⁻¹) y se determinó el contenido de carbono o fracción de carbono (FC).

Carbono fijado por la biomasa del componente pasto

A los 120 días de establecido el pasto *Brachiaria*, se inició el pastoreo rotacional con períodos



Figura 1. A) Establecimiento de poró (*Erythrina berteroana*) como componente arbóreo. B) Sistema silvopastoril seis meses después de establecido. Foto A. Camero.

Figure 1. A) Establishment of poró (*Erythrina berteroana*) as a tree component. B) Silvopastoral system six month after established. Photography by A. Camero.

establecidos de 28 días de descanso. Antes de la entrada a pastoreo se realizaron muestreos de biomasa para calcular producción de materia seca y ajustar la carga animal para un día de ocupación. A partir de la materia seca se determinó la producción acumulada durante el año ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el contenido de carbono o fracción de carbono (FC).

El muestreo de biomasa de raíces se realizó a los 24 meses de establecido el pasto. Para ello, se usó cilindros de hierro de 30 cm de alto por 10,7 cm de diámetro. Las muestras se tomaron a una profundidad de 30 cm. A las raíces muestreadas se les determinó el contenido de materia seca y el contenido de carbono o fracción de carbono (FC).

El carbono en la biomasa de cualquier componente vegetal (arbóreo, raíces o pasto) se calculó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$CB_c = \text{kg MS ha}^{-1} * FCB_c$$

Donde:

CB_c = Kilogramos de carbono fijado por hectárea en biomasa del componente (arbóreo, raíces o pasto)

kg MS ha^{-1} = Kilogramos de biomasa en base seca por hectárea en el componente (arbóreo, raíces o pasto)

FCB_c = Fracción de carbono en la biomasa del componente (arbóreo, raíces o pasto)

Carbono fijado en el suelo

Se muestreó el suelo a una profundidad entre 0 y 40 cm, mediante 10 muestras y se determinó el contenido de materia orgánica y densidad aparente. A partir de la materia orgánica se determinó el contenido de carbono en el suelo y con la densidad aparente la cantidad de carbono fijado. La cantidad de carbono fijado corresponde a la diferencia de contenido entre el contenido de carbono del primer muestreo de suelo y el contenido al finalizar el ensayo.

El carbono en el suelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$CAS = \% Cs * (DA * P * 10000)$$

Donde:

CAS= Kilogramos hectárea⁻¹ año⁻¹ de carbono fijado en el suelo

%Cs = Contenido de carbono en el suelo, en porcentaje

DA = Densidad aparente (kilogramos/m³)

P = Profundidad del suelo (m)

El porcentaje de carbono en el suelo se estimó utilizando la siguiente fórmula:

$$\%Cs = \frac{\%MO_s}{1,724}$$

Donde:

%Cs = Contenido de carbono en el suelo, en porcentaje

% MO_s = Materia orgánica del suelo, en porcentaje

Carbono fijado por las heces producidas por los animales

Para determinar la cantidad de carbono fijado por las heces de los animales se calculó el consumo de materia seca (CMS) del pasto, la digestibilidad de la materia seca (DIVMS), el contenido de fibra neutro detergente de la materia seca del forraje (FND) y la producción fecal (PF) de los animales.

El CMS seca de pasto se calculó utilizando la ecuación propuesta por Mertens [17], donde:

$$\%CMS = \frac{120}{\%FND}$$

El resultado se expresó como el total de forraje en base a MS que un animal puede consumir en un tiempo de 24 horas. Para el cálculo de PF de los animales, se utilizó la siguiente ecuación:

$$PF = CMS * (100 - DIVMS)$$

El carbono fijado por las heces de los animales se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$CFH = \text{kg HF} * \% MOHF * 65\%$$

Donde:

CFH = kg de carbono fijado por las heces producidas por los animales

kg HF = cantidad en kilogramos de heces producidas por los animales en pastoreo

% MOHF = porcentaje de materia orgánica presente en las heces de los animales en pastoreo

65% = porcentaje de la materia orgánica en descomposición que se fija como carbono [18]

Total de carbono fijado en el sistema

Para estimar la cantidad de carbono fijado en el sistema se totalizó la sumatoria del carbono almacenado en cada componente, así se tiene:

$$C_{total} = CBAA + CBRA + CBAP + CBRP + CAS + CFH$$

Donde:

C_{total} = Carbono total almacenado en el sistema

CBAA = Carbono almacenado en la biomasa aérea del componente arbóreo

CBRA = Carbono almacenado en las raíces del componente arbóreo

CBAP = Carbono almacenado en la biomasa aérea del componente pasto

CBRP = Carbono almacenado en las raíces del componente pasto

CAS = Carbono almacenado en el suelo

CFH = Carbono almacenado en las heces de las vacas

Resultados y discusión

Producción de biomasa y contenido de carbono del componente arbóreo

La producción de biomasa del componente arbóreo correspondió a la producción de dos años (desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha de toda la biomasa). Se cosechó todo el material y se determinó una producción de 3457 kg MS ha⁻¹. La mayor producción de biomasa correspondió a la fracción aérea, compuesta por tallos leñosos y hojas (2023 kg de MS ha⁻¹), seguida de las raíces finas y raíces gruesas (881 y 553 kg de MS ha⁻¹, respectivamente). El mayor contenido de carbono se encontró en la fracción aérea de biomasa con 29,3% de carbono, seguido por las raíces gruesas, con 24,6% y las raíces finas con 23,9%.

Los resultados de producción de biomasa aérea del componente arbóreo concuerdan con trabajos realizados por Camero-Rey y Rodríguez-Díaz [19] donde se encontraron producciones de 2724 kg MS ha⁻¹.

Producción de biomasa y contenido de carbono del componente herbáceo

La producción de biomasa (kg MS ha⁻¹) del componente herbáceo correspondió al segundo año de establecido el ensayo, después de doce pastoreos. El peso total de la biomasa herbácea fue de 40030 kg MS ha⁻¹ año⁻¹, correspondiendo a una producción de biomasa de 39089 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ para la fracción aérea y 221 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ para raíces. Estos datos concuerdan con lo reportado por Camero-Rey y Rodríguez-Díaz [19], quienes señalan valores de 33000 kg MS ha⁻¹ con cortes cada 30 días. Lascano *et al.* [20] reportan valores cercanos a los 33000 kg MS ha⁻¹ con períodos iguales de descanso. El contenido de carbono fue de 23,90% y 20,68% para la biomasa aérea y la de las raíces, respectivamente.

Contenido de carbono del componente de suelo (antes y después del período experimental)

El porcentaje de materia orgánica de los primeros 40 cm del suelo pasó de 6,66% al inicio del estudio a 8,88% al cabo de doce ciclos de pastoreo, mostrando que a medida que pasa el tiempo, la inclusión de pastos y árboles en el sistema influyó en el aumento del contenido de materia y por ende en el contenido de carbono del mismo (de 3,83% a 5,10%). La materia orgánica se incorpora paulatinamente por acción de la mesofauna en el suelo, tales como lombrices [21]. Es de suponer que, a pesar de que en este trabajo no se cuantificó la cantidad de macrofauna de lombrices en el suelo, la incorporación de los árboles al sistema de pasturas incrementó su número en el suelo. Lo anterior fue corroborado por trabajos de Camero-Rey y Rodríguez-Díaz [19] cuando encontraron que el contenido de materia orgánica en un sistema silvopastoril *Erythrina berteroana-Brachiaria brizantha* fue superior al compararlo con un sistema de pasturas solas. El aumento de materia orgánica se relacionó con un aumento del número de lombrices y mayor producción de biomasa, dándose el mayor aumento en los estratos más superficiales del suelo, esto por

influencia de la mayor producción de biomasa del pasto y por las excretas de los animales.

Producción de biomasa y contenido de materia orgánica de las heces

La producción de heces por los animales está relacionada al consumo de forraje y su digestibilidad. El consumo de forraje está dado específicamente por el contenido de FDN (68,36% en este estudio). La producción total de forraje en los doce ciclos de pastoreo fue de 27866 kg MS ha⁻¹ año⁻¹. Considerando un aprovechamiento del 70% del mismo, la cantidad de forraje potencialmente consumido fue de 19506 kg. Este consumo con una DIVMS de 53,13%, equivale a una producción de heces de 8953 kg con un contenido de 21% de carbono.

Carbono fijado en el sistema

La fijación de carbono que contribuye al balance total (fijación – emisión) es el resultado del aporte de la cantidad de carbono en la biomasa de los componentes arbóreos y herbáceo del sistema, de la cantidad de materia orgánica en el suelo y la fracción que aportan las heces de los animales en pastoreo.

Se estimó un total de 57477 kg ha⁻¹ año⁻¹ de carbono fijado en el sistema, con el mayor aporte dado por el componente suelo (45720 kg ha⁻¹), mientras que el carbono fijado mediante la producción fecal de los animales (1222 kg ha⁻¹) está directamente relacionado con el consumo y la digestibilidad de la materia seca del forraje que el animal consume, lo que afecta la cantidad de carbono reciclado por las excretas del animal. Veldkamp [18] reporta que la materia orgánica en descomposición de las heces fija como carbono el 65% de este material y el 35% restante se libera en forma de CO₂ como producto de la mineralización de la materia orgánica.

El carbono fijado por la biomasa de los componentes arbóreo y herbáceo (822 y 9713 kg ha⁻¹, respectivamente) representan una parte importante de la totalidad fijada.

Carbono emitido por efecto purines, suelo y fertilización nitrogenada aplicada a la pastura

Durante el tiempo de estudio se utilizaron 31 vacas lecheras con un peso promedio de 405 kg, lo que equivale a un consumo promedio de 7,128 kg MS

de forraje/animal en un período de 24 horas. En este ensayo se utilizaron vacas con producción promedio de 12 L de leche/día. Por lo tanto, para las mediciones de consumo de forraje, producción de heces y emisión de gases de efecto invernadero se tomaron en cuenta las condiciones productivas y fisiológicas de esos animales.

El total de emisiones de carbono en el sistema alcanzaron un valor de 53657 kg ha⁻¹ año⁻¹, representando la fermentación ruminal del forraje consumido, el 83% de las emisiones (44619 kg ha⁻¹ año⁻¹). Estos resultados de emisión de carbono por efecto de la fermentación concuerdan con Mora [10], quien reporta que el forraje representa más del 80% del total de CO₂ emitido. De allí que la mejor estrategia sería la utilización de forrajes de mejor valor nutricional para reducir la emisión de metano, producto de la fermentación del mismo.

Otras fuentes de emisiones de CO₂ que contribuyen al total emitido en el sistema fueron en su orden: las emisiones producidas por las heces del pasto consumido (4290 kg ha⁻¹ año⁻¹), las emisiones producto de la descomposición de la materia orgánica en el suelo y otros procesos en el mismo (3687 kg ha⁻¹ año⁻¹), y por último, las emisiones provenientes de las orinas y la fertilización nitrogenada al pasto (1061 kg ha⁻¹ año⁻¹).

Balance de carbono en el sistema

Para estimar el balance de carbono, se totalizó las capturas o fijaciones y se restó las emisiones que ocurrieron en el sistema. El total de carbono almacenado se obtuvo de la sumatoria del carbono fijado por el componente arbóreo, componente herbáceo, suelo y heces producidas por los animales en pastoreo. Las emisiones fueron calculadas a partir de la fermentación ruminal del forraje consumido, las emisiones provenientes de las excretas, materia orgánica en el suelo y las orinas y fertilización nitrogenada utilizada para el pasto.

Siendo que la fijación de carbono en el sistema se estimó en 57477 kg ha⁻¹ año⁻¹ y la emisión de carbono en 53657 kg ha⁻¹ año⁻¹, el balance de carbono en este sistema silvopastoril (*Erythrina berteroana* - *Brachiaria brizantha*) se cuantificó en 3820 kg ha⁻¹ año⁻¹, por lo que los resultados del estudio demostraron un balance positivo de carbono fijado.

Conclusiones

Bajo las condiciones en que se desarrolló el estudio se puede concluir lo siguiente:

- El balance (fijación y emisión) de carbono en el sistema silvopastoril (*Brachiaria brizantha*/*Erythrina berteroana*) resultó positivo con 3820 kg ha⁻¹ año⁻¹, superior las fijaciones respecto a las emisiones.
- El mayor aporte al balance positivo por fijación de carbono en el sistema se encontró en el suelo (45720 kg ha⁻¹), seguido del componente herbáceo, heces producidas por los animales en pastoreo y en componente arbóreo, respectivamente.
- El mayor aporte a la emisión de carbono en el sistema lo representó el componente herbáceo representado en este caso por la fermentación ruminal del forraje consumido.
- El incremento del contenido de materia orgánica del suelo aportado por la biomasa de los componentes pasto-árbol y la deposición de heces producidas por los animales en pastoreo favorecieron el balance positivo del sistema.

Bibliografía

- [1] FAO (Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), "Livestock's long shadow: Environmental issues and options", Roma: FAO, 2006.
- [2] R. Hernández, "Botanical Book", Mérida: Universidad de Los Ángeles, 2002.
- [3] G. Ávila, "Almacenamiento, Fijación de Carbono y Valoración de Servicios Ambientales en Sistemas Agroforestales en Costa Rica", *Agroforestería en las Américas*, vol. 8, no. 30, pp. 32-35, 2001.
- [4] P. Snowdon, J. Raison, H. Keith, P. Ritson, P. Grierson, M. Adams, K. Montagu, H. Bi, W. Burrows, D. Eamus, "Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass", Australian Greenhouse Office, 2002.
- [5] A. Camero, J. C. Camargo, M. Ibrahim, A. Schlönvoigt, "Agroforestería y sistemas de producción animal en Centro América; Intensificación de la ganadería en Centro América: Beneficios económicos y ambientales", Turrialba: CATIE, 2000.
- [6] L. Mannelje, M. C. Amézquita, P. Buurman, M. A. Ibrahim, "Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems", Países Bajos: Wageningen Academic Publishers, 2008.
- [7] A. Moss, J. Jouany, J. Newbold, "Methane production by ruminants: its contribution to global warming", *Annales de Zootechnie*, vol 43, pp. 231-253, 2000.
- [8] G. Berra, L. Finster, S. Valtorta. "Una técnica sencilla para la medición de emisiones de metano entérico en vacas", *Revista FAVE*, vol. 8, no. 1, pp. 49-56, 2009.
- [9] M. Fernández, M. García, C. Gómez, "Emisión de metano y sistemas de producción animal en el Perú: Implicancias nutricionales", [On line]. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/66-metano_peru.pdf [Accesado: 25 Feb., 2011].
- [10] C. Mora, "Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica", Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, 2001.
- [11] C. Villanueva, M. Ibrahim, "Evaluación del impacto de los sistemas silvopastoriles sobre la recuperación de pasturas degradadas y su contribución en el secuestro de carbono en lecherías de altura en Costa Rica", *Agroforestería en las Américas*, vol. 9, no. 35-36, pp. 69-74, 2002.
- [12] A. Ruiz, M. Ibrahim, B. Locatelli, J. Andrade, J. Beer, "Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica de fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua", *Agroforestería en las Américas*, no. 41-42, pp. 16-21, 2004.
- [13] L. Holdridge, "Ecología basada en zonas de vida", San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2000.
- [14] P. V. Van Soest, J. B. Robertson, B. A. Lewis, "Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition", *Journal of dairy science*, vol 74, no. 10, pp. 3583-3597, 1991.
- [15] R. Komarek, "A filter bag procedure for improved efficiency of fiber analysis", *Journal of Dairy Science*, vol. 76, pp. 250-259, 1993.
- [16] L. S. Arredondo-Pérez, "Evaluación del efecto de tres diferentes aditivos sobre parámetros de valor nutricional del ensilaje de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en condiciones tropicales", Tesis Lic. Escuela de Agronomía, ITCR, 2011.
- [17] D.R. Mertens, "Defining effective fiber and fiber recommendations for dairy cows", *US Dairy Forage Research Center*, pp. 88-90, 1995.
- [18] E. Veldkamp, "Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica", Tesis Ph. D. Agriculture University of Wagenigen, Wagenigen, 1993.
- [19] A. Camero-Rey, H. Rodríguez-Díaz, "Características químicas del suelo, producción forrajera y densidad poblacional de lombrices en un sistema silvopastoril

en la zona Huetar Norte de Costa Rica”, *Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 1, pp. 91-104, 2015.

- [20] C. Lascano, R. Pérez, C. Plazas, J. Medrano, O. Pérez, P. Argel, “Pasto Toledo (*Brachiaria brizantha*), gramínea de crecimiento vigoroso para intensificar la ganadería colombiana”, Colombia: Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria, 22 p, 2002.

- [21] P. Ojeda, J. Restrepo, D. Villada, C. Gallego, “Sistemas silvopastoriles, una opción para el manejo sostenible de la ganadería”, Santiago de Cali, Colombia: FIDAR, PRONATURA, CIAT, 2013.

De acuerdo con la norma IEEE, este documento debe citarse:

L. A. Camero-Rey, “Fijación de carbono en un sistema silvopastoril (*Erythrina berteroana* Urban y *Brachiaria brizantha* CV Toledo) de una explotación lechera en la Región Huetar Norte de Costa Rica”, *Revista AgrolInnovación en el Trópico Húmedo*, vol. 2, no. 2, pp. 19-26, 2019. DOI 10.18860/rath.v2i2.5194