



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

**EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y
BIOMASA AÉREA DE CUATRO FINCAS AGROECOLÓGICAS
EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN TORTUGUERO,
COSTA RICA.**

Marcia Gómez Cortés

Cartago, Costa Rica

2014

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y BIOMASA ÁREA DE CUATRO FINCAS AGROECOLÓGICAS EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN TORTUGUERO, COSTA RICA

Marcia Gómez Cortés*

Resumen

La adaptación a condiciones climáticas genera un gran interés por la agricultura orgánica y la silvicultura, establecidos en sistemas más integrales tales como las fincas agroecológicas. Para conocer los alcances en tema de intercambio gaseoso con la atmosférica, se calcularon las emisiones de gases de efecto invernadero y la biomasa aérea de cuatro fincas agroecológicas ubicadas en el cantón de Pococí en el Área de Conservación Tortuguero. Las mayores emisiones en el año 2014 son causadas por la fermentación entérica, de 0,15 a 4,88 tCH₄/año o 3,20 a 102,5 tCO₂e/año y la combustión de fuentes de energía contabilizó 1,08 a 3,4 tCO₂e/año. También se calcularon las emisiones por la gestión de estiércol, el uso de fertilizantes nitrogenados y la gestión de desechos, los cuales suman de 2,14 a 3,72 tCO₂e/año. Con respecto a las remociones de GEI, la biomasa de cada finca es Génesis 71,34 t en 4,3 ha; La Amistad 220,06 t en 3,82 ha y La Pulga 291,21 t en 7,32 ha. El Progreso posee un promedio general de 6707,64 t de biomasa en 29,98 ha de bosques y 2154,97 t de biomasa en sus cercas vivas y árboles en potreros en 52,65 ha. Al calcular las equivalencias en toneladas de dióxido de carbono anual, se obtuvo que las fincas La Pulga y La Amistad tuvieron un balance negativo o carbono neutro; las fincas Génesis y El Progreso se ven desequilibradas por el número de animales con respecto al área con cobertura vegetal.

Palabras claves: agricultura orgánica familiar, gases de efecto invernadero, dióxido de carbono equivalente, fincas integrales, Zona Caribe-Norte Costa Rica.

*Estudiante de Ingeniería Forestal
e-mail: marciagoco@gmail.com

GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND ABOVEGROUND BIOMASS OF FOUR AGROECOLOGICAL FARMS IN TORTUGUERO CONSERVATION AREA, COSTA RICA

Abstract

Adaptation to climate change has generated a great interest in organic agriculture and forestry. One of such systems is agro-ecological farms. In order to understand the greenhouse budget of this kind of farms, four agro-ecological farms at Pococí, in the Tortuguero Conservation Area were assessed in terms of their emissions and possible carbon sinks. For the year 2014 major emissions were caused by enteric fermentation (from 0,15 to 4,88 tCH₄/year or 3,20 to 102,5 tCO₂e/year), followed by combustion of energy sources (1,08 to 3,4 tCO₂e/year). Other emissions were calculated from manure management, nitrogen fertilizers and waste management, which summed up 2,14 to 3,72 tCO₂e/year. Concerning greenhouse gas removals, the biomass at each farm was also recorded, Genesis 71,34 t in 4,3 ha; Amistad 220,06 t in 3,82 ha; Pulga 291,21 t in 7,32 ha. Progreso shows a general average of 6707,64 t biomass in 29,98 ha of forestry ecosystems and 2154,97 t of biomass of living fences and trees in the pastures in 52,65 ha. The carbon balance in carbon dioxide tons per year equivalent were calculated with Pulga and Amistad obtaining the classification of carbon neutral with a negative balance that indicates more removals than emissions, however Genesis and Progreso have a positive emissions budget most likely influenced by the cattle rearing activities therein.

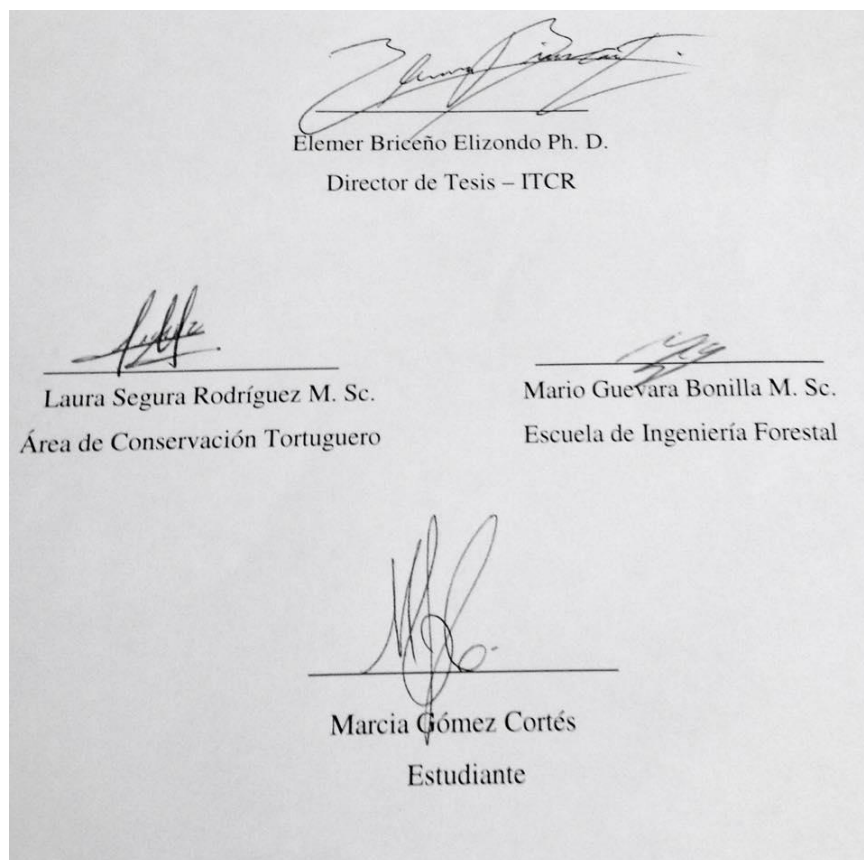
Key words: organic agriculture, family farms, greenhouse gases inventories, equivalent carbon dioxide, integrated farms, Costa Rica Northern Caribbean.

Acreditación

Esta tesis fue aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y BIOMASA AÉREA DE CUATRO FINCAS AGROECOLOGICAS EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN TORTUGUERO, COSTA RICA.

Miembros del Tribunal Evaluador



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi padre, quien ha apoyado mis proyectos de aire y tierra; nosotros, que somos agua y fuego.

La dedicatoria se extiende también al resto de mi familia que ha brindado apoyo e ideas en cada etapa de la vida.

Agradecimientos

Gracias a la energía vital que nos alimenta de *prāna* en cada instante, con consciencia y devoción podemos alcanzar todo en comunión con el todo.

Gracias a los bosques y sus seres que siempre nos enseñan a vivir y a respetar. Cada encuentro es una nueva relación de aprendizaje.

Gracias al Caribe y sus lluvias, me bañé en abundancia con este trabajo de campo.

Agradezco mucho a las familias que me han dado su hospitalidad, son un aporte muy importante con sus prácticas agroecológicas. Espero que puedan seguir viviendo en paz y que las siguientes generaciones sean agradecidas con la cultura en que nacieron, para perpetuar el conocimiento del desarrollo sustentable.

Gracias a las facilidades del Área de Conservación Tortuguero, a Laura Segura y Noldan Chavarría, a los agricultores y ganaderos don Nelson Montero, doña Betty Vargas, doña Sonia García, Dane Lemone, doña Vicky Godínez, doña Nuria Chaves y don Carlos Alpízar.

Gracias a Braulio Vílchez, Carlos Roldán, Casia Soto, Claudia Chaves, Dagoberto Arias, Danilo F. Cortés, Edgar Ortíz, Elemer Briceño, Francisco Murillo, Lupita Vargas, Marilyn Manrow, Miguel Soto, Ruperto Quesada, y a todos los académicos por sus contribuciones.

Gracias a los ayudantes, Alberto Pistorello, Fabián Marín y Mauricio Córdoba, que no se han limitado al trabajo de campo, sino también al dictado de datos y al enfoque del tema.

En fin, gracias a mi madre por su atención, abuela, tías, hermanos, profesores y compañeros que han sido parte del crecimiento constante en cada etapa.

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------------|
| <i>Resumen</i> | <i>i</i> |
| <i>Abstract</i> | <i>ii</i> |
| <i>Acreditación</i> | <i>iii</i> |
| <i>Dedicatoria</i> | <i>iv</i> |
| <i>Agradecimientos</i> | <i>v</i> |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Materiales y métodos | 3 |
| 2.1. Área de estudio..... | 3 |
| 2.2. Recopilación de datos | 4 |
| 2.2.1. Cuantificación de emisiones por fuentes | 4 |
| 2.2.2. Cuantificación de las remociones por sumideros | 5 |
| 2.3. Variables y modelos utilizados para la cuantificación de emisiones por fuentes y remociones por sumideros | 6 |
| 2.3.1. Cálculo de emisiones de GEI..... | 6 |
| 2.3.2. Cálculo de remociones..... | 7 |
| 2.3.3. Balance de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero | 8 |
| 2.4. Análisis estadístico..... | 9 |
| 3. Resultados | 9 |
| 3.1. Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero..... | 10 |
| 3.2. Cuantificación de las remociones por sumideros | 15 |
| 3.3. Balance de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero | 19 |
| 4. Discusión | 20 |
| 5. Conclusiones | 35 |
| 6. Recomendaciones | 36 |
| 7. Referencias | 37 |
| 8. Anexos | 47 |

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización de las fincas de estudio en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica..... | 3 |
| Cuadro 1. Fincas agroecológicas estudiadas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica..... | 4 |
| Cuadro 2. Áreas de los estratos de las fincas según mediciones de campo..... | 6 |
| Cuadro 3. Factores de emisión utilizados en los cálculos de emisiones de gases de efecto invernadero en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero..... | 7 |
| Cuadro 4. Emisiones (tCO ₂ e/ñ) por fuentes de energía de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 10 |
| Cuadro 5. Emisiones (tCO ₂ e/ñ) por fermentación entérica de los años 2003 y 2014 de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 11 |
| Cuadro 6. Emisiones (tCO ₂ e/ñ) por gestión de estiércol y producción de compost de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica..... | 12 |
| Cuadro 7. Emisiones (tCO ₂ e/ñ) por gestión de suelo con fertilizantes sintéticos de los años 2003 y 2014 en dos fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 13 |
| Cuadro 8. Consumo de productos plaguicidas en tres fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero. | 13 |
| Cuadro 9. Emisiones (tCO ₂ e/ñ) por gestión de desechos de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 14 |
| Cuadro 10. Emisiones de gases de efecto invernadero de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 15 |
| Cuadro 11. Biomasa (t) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica..... | 17 |
| Cuadro 12. Dióxido de carbono equivalente (tCO ₂ e) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. 2014. | 18 |
| Cuadro 13. Aproximación del crecimiento anual (tCO ₂ e/ñ) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. 2014..... | 19 |
| Cuadro 14. Balance aproximado de dióxido de carbono equivalente en el 2014 (tCO ₂ e/ñ) para cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. | 19 |

INDICE DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1. Errores de muestreo de la finca PU. | 47 |
| Anexo 2. Errores de muestreo de la finca GE. | 47 |
| Anexo 3. Errores de muestreo de la finca AM. | 48 |
| Anexo 4. Errores de muestreo de la finca PR. | 48 |

1. Introducción

El cambio paulatino del clima provoca adaptaciones constantes del ser humano (Hug et al., 2007). La influencia del cambio climático, ya sea por razones propias de los ciclos de la Tierra o por los efectos de gases de tipo invernadero en la atmósfera han provocado calentamientos de la superficie terrestre (Apps, 2003; IPCC, 2007; Pacala y Socolow, 2004; Preston y Leng, 1989; Serreze, 2009), con estos pronósticos se ha hecho importante disminuir las emisiones a la atmósfera y abogar por estrategias de acumulación de biomasa.

Se atribuye un porcentaje considerable de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al sector agropecuario en Costa Rica (Banco Mundial, CIAT y CATIE, 2014; Chacón, Montenegro y Sasa, 2009). La producción agropecuaria convencional produce gran cantidad de gases por el uso de maquinaria agrícola, fertilización química, ganadería intensiva sin manejo del estiércol, sin árboles en los potreros, aplicación de plaguicidas y cultivos anuales con remoción total de biomasa. Todo esto acelera el aumento de emisiones y más efectos adversos, ya que también se perturba la conservación de suelos y la calidad del agua (CCA, 2014; Smith, 2014).

Las emisiones consideradas en modelos de fincas agropecuarias provienen de los gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). En el tipo de fincas estudiadas, las actividades que se relacionaron con la contaminación atmosférica fueron la quema de combustibles, fermentación entérica, gestión de estiércol, uso de fertilizantes sintéticos y gestión de residuos (Lewandrowski et al., 2004; Mora, 2009; Najarro y Samayoa, 2009). Las emisiones son clasificadas como directas si sus fuentes son controladas por la organización e indirectas si las fuentes son importadas, con un origen fuera de los límites de la organización (Hidalgo, 2013; INTE-ISO 14064, 2006).

Las remociones, absorciones o fijaciones se refieren a la capacidad de la biomasa de capturar el carbono en sumideros (Chacón y Porro, 2009; MacDicken, 1997; Rüginitz, Schlegel, Gayoso y Guerra, 2001). Las plantas, por medio de la fotosíntesis, son capaces de fijar el carbono en biomasa aérea, subterránea y en el suelo. Consecuentemente, este se mantiene en materia muerta y en el suelo como hojarasca, donde pueden hallarse

equilibradas, según la edad del ecosistema. El ciclo del carbono está presente en los procesos de crecimiento de la vegetación, en el suelo y la atmósfera, por lo que se da tanto la fijación como la liberación de dióxido de carbono mediante la respiración y la descomposición en procesos complejos, los cuales dependen en gran medida de la disposición de agua, cantidad de nutrientes en el suelo y cantidad de entrada de luz (Chazdon y Montgomery, 2002; Vickery, 1991).

Las fincas estudiadas presentan una acumulación de biomasa a lo largo de un periodo aproximado de diez años o más, en los cuales se han establecido áreas para cultivos, sistemas agroforestales (SAF), conservación de bosque y potreros con cercas vivas; además, se realizan actividades pecuarias sostenibles y de consumos alternativos de energía (Chacón, 2001; Montoya, 2012; Navarro, 2012).

La producción orgánica y los sistemas agroecológicos permiten que los ciclos de carbono y nitrógeno se completen y potencialicen su fijación (Groot, Oomen y Roosing, 2012; Grignani, Zavattaro, Sacco y Monaco, 2007). Este desarrollo puede considerarse una manera sostenible para mantener la diversidad de especies, riqueza del suelo y productividad sin alterar negativamente la interacción entre espacio físico y ser humano (Altieri y Nicholls, 2000; Mollison, 1998). En el Caribe Norte costarricense existe una red de fincas agroecológicas que tiene, como uno de sus fines, brindar capacitación a través del Programa Educativo Aula Verde. Para estas fincas es de gran importancia conocer la interacción de las actividades con la atmósfera y determinar cuál es el balance de gases de efecto invernadero. Aula Verde es una escuela de agricultores locales que recibe apoyo del Programa de Gestión Local y Corredores Biológicos del Área de Conservación Tortuguero (ACTo) y recientemente del Programa Pequeñas Donaciones del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (PNUD), estas relaciones y la experiencia diaria permiten mejorar y aplicar el conocimiento, que puede a la vez, ser traspasado a otras familias productoras de la región.

El presente estudio tiene como objetivo calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y las remociones captadas por la biomasa aérea expresadas en dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) en cuatro fincas agroecológicas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El Área de Conservación Tortuguero (ACTo) se encuentra en la región noreste de Costa Rica, desde el río San Juan al norte hasta el río Parismina al sur, donde limita con el Área de Conservación La Amistad-Caribe (ACLA-C) (Hernández, 2003). Las fincas del estudio se encuentran en el cantón de Pococí en la provincia de Limón (Navarro, 2012). La figura 1 muestra la ubicación de las fincas a partir de puntos tomados con GPS Garmin Oregon 550.

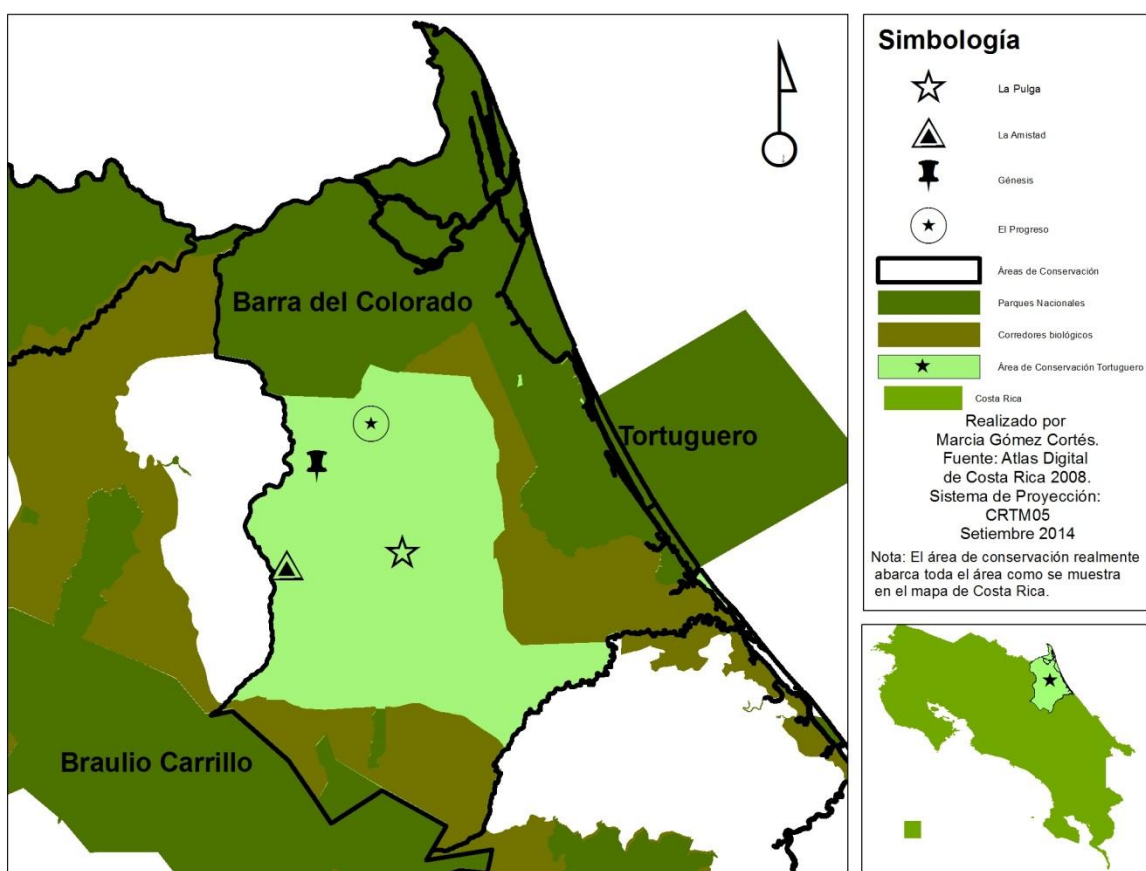


Figura 1. Localización de las fincas de estudio en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

El clima se caracteriza por ser tropical muy húmedo, con precipitación de 4000-8000 mm anuales, temperaturas que oscilan de 18 a 24° C en el piso premontano y de 24 a 30° C en el piso basal (Ortíz, 2008). Los suelos son de tipo inceptisol en mayoría, de relieve plano y origen aluvial (Navarro, 2012). Las fincas Génesis (GE), El Progreso (PR) y La Pulga (PU) se encuentran en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (Bmh-T) y La

Amistad (AM) en la zona de vida bosque muy húmedo tropical premontano transición a basal (Bmh-P6) (Holdridge, 1978). A continuación, se presenta información sobre las fincas.

Cuadro 1. Fincas agroecológicas estudiadas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Finca | Localidad | Coordenadas geográficas | Área total (ha) | Actividades pecuarias | Otras actividades |
|------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|--|--|
| La Pulga (PU) | Campo 3, Cariari | 10°22.365N 83°42.613W | 7,32 | Ganado de doble propósito, gallinas y cerdos | Preparación de abonos orgánicos |
| Génesis (GE) | Sota 1, Ticabán | 10°27.791N 83°48.160W | 4,30 | Ganado de doble propósito, cerdos y ovejas | Preparación de abonos orgánicos |
| La Amistad (AM) | Istarú, Ticabán | 10°21.472N 83°50.110W | 3,82 | Cabras y gallinas | Reforestación con especies nativas |
| El Progreso (PR) | Sota de Colinas, Cariari | 10°30.587N 83°44.633W | 86,66 | Ganado de doble propósito, gallinas y cerdos | Uso de energía solar, pago por servicios ambientales |

2.2. Recopilación de datos

El inventario se realizó del 3 de julio al 4 de agosto de 2014. La recopilación de información se basa en datos de registros y datos de inventario de biomasa. Las emisiones medidas se clasificaron en consumo de energía, agricultura, pecuaria y gestión de desechos. Las remociones se clasificaron en agricultura y silvicultura.

2.2.1. Cuantificación de emisiones por fuentes

Se calcularon las emisiones de los años 2003 y 2014 para relacionar su comportamiento temporal. En el año 2003, el uso de suelo correspondía a potreros y cultivos convencionales (PU, GE y AM). En cuanto al uso de suelo anterior, por medio de fotografías aéreas y capas del Atlas Digital de Costa Rica (Ortíz, 2008), se ha confirmado que las fincas PU, GE y AM estaban deforestadas hace diez años e incluso, según el “Uso de tierras Kyoto 2008”, estas estaban deforestadas antes de 1989. La finca PR se presenta uniforme en este lapso de tiempo.

Las fuentes de emisiones por consumo de energía fueron consumo de combustibles (litros/ñ), consumo de gas LPG (litros/ñ), consumo de electricidad (kW/h/ñ), consumo de candelas (kg/ñ) y leña (m³ estéreo/ñ).

Para la estimación de las categorías pecuaria y agricultura se consideró la fermentación entérica y la gestión de estiércol de las especies vacas, cabras, ovejas, gallinas y cerdos, además de las emisiones por producción de compost.

Se estimaron las emisiones por uso de fertilizantes nitrogenados en las fincas PU y AM, aunque se ha disminuido o eliminado el consumo de estos productos. Hay productos como plaguicidas clorados que presentan fórmulas complejas que fueron excluidas del estudio, ya que no se conoce su reacción química ni se consiguió su huella de carbono.

La gestión de desechos medida es la basura no orgánica que termina en rellenos sanitarios o el tratamiento que realizan con ella, en GE y PR la basura es quemada. Además, se contabiliza el gas metano producto de tanques sépticos y drenajes de tratamiento de aguas residuales a partir del número de personas por finca.

2.2.2. Cuantificación de las remociones por sumideros

Las remociones se calcularon con los datos de inventario del 2014, el cual se realizó con un diseño de muestreo estratificado con escogencia de la muestra al azar, se consideraron los estratos por usos de suelo diferentes en cada finca, que fueron árboles en potreros, cercas vivas, sistemas agroforestales y bosques. Se midieron las variables diámetro a la altura de pecho a 1,3 m (dap en centímetros), altura del tronco y altura total en metros, también se realizó la identificación botánica de las especies.

Para las fincas PU, GE y AM se desarrolló una metodología similar, debido a que son fincas de menor tamaño. Estas se inventariaron con intensidad de muestreo entre 5 y 20%, variable según el área de cada estrato. Se establecieron parcelas temporales circulares de 250 m² en cultivos agroforestales y de 100 m² en zonas boscosas. Para PR se desarrolló un inventario más amplio, con parcelas de 1 ha en potreros y de 1000 m² en ecosistemas boscosos.

Para todas las fincas se estimó la longitud total de cercas vivas y se muestreó un 15% aproximado en transeptos de 50 m de longitud. Se muestra la distribución de áreas y largo de cercas vivas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Áreas de los estratos de las fincas según mediciones de campo.

| Finca | Área del estrato (ha) | | | | | | | Cercas vivas (m) | |
|-------|-----------------------|----------------------------|-------------------|---------|------|---------------|-------------|------------------|--------|
| | Bosque Primario | Reforestación o plantación | Bosque secundario | Potrero | SAF | Instalaciones | Agricultura | | Total |
| PU | | 1,20 | | 3,89 | 0,86 | 0,43 | 0,94 | 7,32 | 2721,3 |
| GE | | 0,08 | | 1,98 | 1,39 | 0,48 | 0,37 | 4,30 | 1408,4 |
| AM | | | 0,65 | 1,13 | 1,62 | 0,42 | | 3,82 | 250 |
| PR | 21,58 | | 8,41 | 52,65 | | 2,54 | 1,48 | 86,66 | 3600 |

2.3. Variables y modelos utilizados para la cuantificación de emisiones por fuentes y remociones por sumideros

El cálculo de emisiones se centra en los gases CO₂, CH₄ y N₂O, donde el gas metano y el óxido nitroso tienen un potencial 21 y 310 veces el potencial de calentamiento del dióxido de carbono, respectivamente (IMN, 2009; IPCC, 2006). El estudio se basó en las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006), la Guía de Buenas Prácticas (USDA, 2000), Factores de emisión de GEI del Instituto Meteorológico Nacional (2014) y normas INTE-ISO 14064-1:2006.

2.3.1. Cálculo de emisiones de GEI

La ecuación básica para calcular las emisiones se muestra a continuación:

(1) $Emisiones = DA \times FE$, donde DA corresponde a los datos de la actividad y FE los factores de emisión. A continuación se presentan los factores de emisión utilizados para cada fuente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Factores de emisión utilizados en los cálculos de emisiones de gases de efecto invernadero en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero.

| Categoría | Fuente de emisión | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Unidades | Referencia |
|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------------------|---------------|
| Energía | Gasolina | 2,26 | 0,0003265 | 0,00001959 | kg gas/l | IMN, 2014 |
| Energía | Diesel | 2,69 | 0,000363 | 0,00002178 | kg gas/l | IMN, 2014 |
| Energía | Gas LPG | 1,61 | 0,0001277 | 0,000002554 | kg gas/l | IMN, 2014 |
| Energía | Electricidad | 0,13 | | | kg gas/l | IMN, 2014 |
| Energía | Candelas | 0,24 | | | kg gas/ kg | Alpizar, 2014 |
| Energía | Leña | 0,896 | | | kg gas/m ³ stereo | Alpizar, 2014 |
| F. entérica | Vacas adultas | | 85,67 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| F. entérica | Toros | | 111,70 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| F. entérica | Novillas | | 41,91 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| F. entérica | Novillos | | 70,16 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| F. entérica | Terneros | | 16,81 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| F. entérica | Cabras y ovejas | | 5 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| G. estiércol | Ganado vacuno | | 1 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| G. estiércol | Cabras y ovejas | | 0,17 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| G. estiércol | Cerdos | | 1 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| G. estiércol | Aves de corral | | 0,02 | | kg gas/cabeza | IMN, 2014 |
| G. estiércol | Prod. de compost | | 0,004 | 0,0003 | kg gas/kg sólido | IMN, 2014 |
| G. suelos | Fertilizantes | | | 0,01 | kg gas/kg | IMN, 2014 |
| G. desechos | Basura convenc. | | 0,0581 | | kg gas/kg basura | IMN, 2014 |
| G. desechos | Quemas (basura) | 2,916 | | | kg CO ₂ e/kg | Base Carbone |
| G. desechos | Tanque séptico | | 4,38 | | kg gas/persona | IMN, 2014 |
| G. desechos | Descarga a ríos | | 0,876 | | kg gas/persona | IMN, 2014 |

2.3.2. Cálculo de remociones

Las remociones de carbono se calcularon con base en modelos de estimación de biomasa para potreros, sistemas agroforestales y ecosistemas boscosos. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

(2) $Biomasa\ total = AB \times a \times ff \times PEB \times FEB$, donde AB es el área basal (m²), a es la altura del tronco (m), ff es el factor de forma de 0,5 y 0,7; PEB es el peso específico básico de la madera de cada especie (t/m³) y FEB , el factor de expansión de biomasa de 1,5 y 1,66.

El uso del factor de forma fue 0,5 y el factor de expansión de biomasa de 1,5 con base en recomendaciones del IPCC (2006). Para los árboles de cercas vivas se utilizó un factor de forma de 0,7 y un factor de expansión de biomasa de 1,66; este último con base en Solano (2012), quien realizó pruebas destructivas para la cuantificación de biomasa en los árboles de las cercas vivas de la finca PR.

(3) $tCO_2e = Biomasa\ total \times f_c \times f_{CO_2}$. Las toneladas de CO₂e corresponden a la biomasa anterior por f_c la fracción de carbono equivalente a 0,49 y f_{CO_2} la relación de masas molares de CO₂e sobre el carbono (44g/moles de CO₂/12 g/moles de C). Luego, los datos de las fincas PU, GE, AM y cercas vivas de PR se dividieron en diez años para estimar el crecimiento aproximado anual por estratos y por hectárea.

Los bosques primario intervenido, secundario y de galería en la finca PR han estado presentes desde mucho tiempo atrás. Se realizó una comparación del crecimiento con la base de datos de Rodríguez y Zúñiga (2012), quienes tomaron únicamente el dato de diámetro a la altura del pecho (dap). Para el cálculo del volumen se utilizó el siguiente modelo alométrico para el cálculo de biomasa aérea de los años 2012 y 2014 (Chave et al., 2014).

(4) $Biomasa\ aérea = 0,0673 \times (\rho D^2 H)^{0,976}$, donde ρ es la densidad de la madera en g/cm³, D es el dap en cm y H es la altura en m.

Para calcular la altura se utilizó la siguiente ecuación (Ortíz, 2014; com. personal).

(5) $H = 1,3 + \left(\frac{d^2}{b_1 \times d + b_2 d^2} \right)$, donde b_1 es igual a 0,93786799, b_2 es igual a 0,01931886, H es la altura en metros y d es el dap en centímetros.

2.3.3. Balance de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero

Se sumaron las emisiones de las categorías energía (sin la combustión de leña), fermentación entérica, gestión de estiércol, uso de fertilizantes sintéticos y gestión de desechos (tCO₂e/ñ) y se realizaron comparaciones con el volumen de CO₂e almacenado en la biomasa aérea, la cual creció a lo largo de periodos establecidos, por ello se compararon las emisiones con las remociones aproximadas por año (tCO₂e/ñ) para realizar un balance

aproximado en las cuatro fincas agroecológicas. El balance se realizó con la siguiente fórmula:

(6) $Balance = Emisiones\ totales - Remociones$, en caso de que el balance sea negativo, se concluye que la finca es Carbono neutro, caso contrario, no es Carbono neutro.

2.4. Análisis estadístico

El almacenamiento y gestión de datos se realizó con los programas Microsoft Office Excel (2010) e Infostat (2012). Se realizaron pruebas estadísticas para calcular medidas de tendencia central, de dispersión y errores de muestreo con un 95 % de confianza (Orozco y Brumer, 2002; Steel y Torrie, 1989).

3. Resultados

Entre los años 2003 y 2014, PU y GE aumentaron sus emisiones, AM y PR las disminuyeron. Al contabilizar las emisiones totales por sectores, en el 2014, la mayor emisión estimada fue la fermentación entérica en las cuatro fincas. La gestión de suelos con fertilizantes nitrogenados tiene un impacto relevante en las emisiones de gases, PU posee emisiones de este tipo de fuente de 4,28 a 1,71 tCO₂e/ñ para los años 2003 y 2014, respectivamente; AM sólo en 2003, correspondiente a 15,40 tCO₂e/ñ.

La gestión de cada finca se ve reflejada en sus resultados de emisiones y remociones de GEI. Por ejemplo, en los datos de emisiones, la finca GE básicamente no había desarrollado su proyecto en 2003, lo que refleja un aumento para el 2014. PU presenta aumentos en la energía, pero disminuciones en el uso de fertilizantes sintéticos. AM posee una gran mejoría, gracias al cambio de uso del suelo, de monocultivos con fertilizantes sintéticos y plaguicidas a sistemas agroforestales. La finca PR es la de mayor área, también es la que emite mayor cantidad de metano por la fermentación entérica, ya que posee 85 cabezas de ganado vacuno al pastoreo. Asimismo, posee la mayor área de bosques primarios intervenidos, de galería, secundario y potreros densos de árboles con especies como caobilla (*Carapa nicaraguensis*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y roble sabana (*Handroanthus rosea*).

Las fincas GE y AM poseen un área restringida para aumentar más su área de cultivos agroforestales y cultivo de árboles, porque poseen menos de 5 ha. Las cuatro fincas cuentan con un paisaje agroecológico lleno de especies forestales, frutales, cercas vivas de especies fijadoras de nitrógeno, cultivos de alimentos y forrajes.

3.1. Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones por fuentes energéticas, a lo largo de los últimos diez años, han aumentado en las fincas PU, GE y PR; AM disminuyó. PU presenta aumento por consumo de combustibles, debido a que en la actualidad se cuenta con vehículo y antes no. La finca GE no contaba con proyecto, lo cual cambió después; en la actualidad cuenta con electricidad, vehículo y generación de desechos. La finca AM utilizaba tractores para preparar el terreno y constantes viajes para comercializar camote (*Ipomea batatas*) y ñame (*Dioscorea alata*), por lo que sus emisiones han disminuido significativamente, mientras que PR se encuentra estable, con un leve aumento (Cuadro 4).

Cuadro 4. Emisiones (tCO₂e/ñ) por fuentes de energía de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Fuente de emisión | | PU | GE | AM | PR |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Gasolina | 2003 | 0,109 | 0 | 0 | 0,273 |
| | 2014 | 2,182 | 0,413 | 1,740 | 0,273 |
| Diesel | 2003 | 0 | 0 | 6,945 | 2,704 |
| | 2014 | 0 | 0 | 0 | 2,704 |
| Gas LPG | 2003 | 0,139 | 0,416 | 0,416 | 0,208 |
| | 2014 | 0,633 | 0,416 | 0,416 | 0,416 |
| Electricidad | 2003 | 0,117 | 0 | 0,125 | 0 |
| | 2014 | 0,468 | 0,250 | 0,250 | 0 |
| Candelas | 2003 | 0,001 | 0,034 | 0,001 | 0,001 |
| | 2014 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Leña | 2003 | 0,003 | 0 | 0,052 | 0,013 |
| | 2014 | 0,003 | 0,001 | 0,052 | 0,003 |
| Total 2003 (tCO ₂ e/ñ) | | 0,368 | 0,451 | 7,539 | 3,199 |
| Total 2014 (tCO ₂ e/ñ) | | 3,286 | 1,081 | 2,459 | 3,397 |

Las emisiones causadas por la fermentación entérica provienen del ganado vacuno y caprino; se clasificaron en vacas adultas, toros, novillos, terneros, cabras y ovejas. La finca PR pasó de tener 95 a 85 cabezas de ganado vacuno, GE de 0 a 24 cabezas de ganado vacuno y 0 a 14 cabezas de cabras y ovejas, PU pasó de 11 a 19 cabezas de ganado vacuno y AM no poseía ganado en 2003, ahora posee 2 cabezas de ganado vacuno y 10 cabras.

La fermentación entérica causa gas metano producto de la digestión de rumiantes. Se obtuvo los siguientes resultados, para el año 2003: 0,46 tCH₄/ñ en PU y 5,29 tCH₄/ñ en PR; para 2014: 1,29 tCH₄/ñ en PU; 0,68 tCH₄/ñ en GE; 0,15 tCH₄/ñ en AM y 4,88 tCH₄/ñ en PR. Las cifras son más altas cuando se analiza la conversión de metano a dióxido de carbono equivalente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Emisiones (tCO₂e/ñ) por fermentación entérica de los años 2003 y 2014 de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Fuente de emisión | | PU | GE | AM | PR |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vacas adultas | 2003 | 8,995 | 0 | 0 | 80,958 |
| | 2014 | 21,589 | 8,995 | 1,799 | 77,360 |
| Toros | 2003 | 0 | 0 | 0 | 2,346 |
| | 2014 | 2,346 | 2,346 | 0 | 4,691 |
| Novillos/as | 2003 | 0 | 0 | 0 | 17,602 |
| | 2014 | 1,760 | 0 | 0 | 10,561 |
| Terneros | 2003 | 0 | 0 | 0 | 10,237 |
| | 2014 | 1,412 | 1,412 | 0,353 | 9,884 |
| Cabras | 2003 | 0,630 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0 | 1,050 | 1,050 | 0 |
| Ovejas | 2003 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0 | 0,420 | 0 | 0 |
| Total 2003 (tCO ₂ e/ñ) | | 9,625 | 0 | 0 | 111,143 |
| Total 2014 (tCO ₂ e/ñ) | | 27,107 | 14,223 | 3,202 | 102,497 |

También, se estudió el impacto del ganado vacuno en la capacidad de carga del área. La finca PR que es la mayor emisora en esta fuente, presenta el menor índice con 1,80 y 1,61 cabezas/ha en los años estudiados, respectivamente. PU cuenta con 2,82 y 4,88 cabezas/ha en los años estudiados, respectivamente. AM presenta 10,62 cabezas/ha en 2014 pero contempla cabras, al igual que GE con 12,12 cabezas/ha.

La gestión de estiércol se contabilizó de manera general para todos los tipos de tratamientos que se realizan con estiércol animal proveniente del ganado vacuno semi-estabulado, cerdos en establo, cabras semi-estabuladas y aves en corral. Por gestión de estiércol se comprende dejar el estiércol en los potreros, almacenamiento en pilas, digestor anaeróbico, producción de compost y estiércol de aves de corral con hojarasca. Sin embargo, se estimó también las emisiones por producción de compost, ya que esta contempla la emisión de óxido nitroso en el proceso de apilamiento, mezcla y movimiento de materia orgánica en descomposición (Cuadro 6).

Cuadro 6. Emisiones (tCO₂e/año) por gestión de estiércol y producción de compost de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Fuente de emisión | | PU | GE | AM | PR |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Ganado vacuno | 2003 | 0,230 | 0 | 0 | 1,995 |
| | 2014 | 0,399 | 0,504 | 0,042 | 1,785 |
| Cabras | 2003 | 0,630 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0 | 1,050 | 1,050 | 0 |
| Ovejas | 2003 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0 | 0,420 | 0 | 0 |
| Cerdos | 2003 | 0,210 | 0 | 0 | 0,336 |
| | 2014 | 0,084 | 0,168 | 0,147 | 0,336 |
| Aves de corral | 2003 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0,126 | 0,055 | 0,008 | 0,105 |
| Producción de compost | 2003 | 0,779 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0,227 | 0,066 | 0,085 | 0,000 |
| Total 2003 (tCO ₂ e/año) | | 1,859 | 0 | 0 | 2,331 |
| Total 2014 (tCO ₂ e/año) | | 0,837 | 2,263 | 1,333 | 2,226 |

La gestión de suelos con la utilización de fertilizantes nitrogenados es una actividad contaminante en la atmósfera, por causa de la volatilización del nitrógeno. A continuación, se puede observar el impacto de tales productos en las fincas PU y AM (Cuadro 7). La finca GE no utiliza ningún tipo de fertilizante ni plaguicida, mientras que PR no utiliza fertilizantes únicamente.

Cuadro 7. Emisiones (tCO₂e/ñ) por gestión de suelo con fertilizantes sintéticos de los años 2003 y 2014 en dos fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Finca | Consumo de fertilizante 2003 (NPK 12-24-12) | Consumo de fertilizante 2014 (NPK 12-24-12) | Emisión 2003 (tCO ₂ e/ñ) | Emisión 2014 (tCO ₂ e/ñ) |
|-------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| PU | 1380 | 552 | 4,278 | 1,711 |
| AM | 4968 | 0 | 15,401 | 0 |

El consumo de plaguicidas se muestra a continuación (Cuadro 8), aunque no se calculó su emisión, se puede observar la disminución en las fincas PU y AM, y un uso continuo de estos productos en PR. Los herbicidas generalmente usan nombres comerciales distintos como Paraquat, Tordon, 2-4, B o Gramoxon, pero en su fórmula básicamente es Dicloruro de 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridilo (C₁₂H₁₄N₂) o un herbicida no selectivo de cuatro amonios (Pesticide Management Education Program, 1993).

Cuadro 8. Consumo de productos plaguicidas en tres fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero.

| Finca | Producto | Consumo (2003) | Consumo (2014) | Unidades |
|-------|-------------------------|----------------|----------------|----------|
| PU | Gramoxones (herbicidas) | 12 | 3,788 | litros/ñ |
| PU | Fungicida (Ditane) | 1 | 0,5 | kg/ñ |
| PU | Insecticida | 1 | 0 | litros/ñ |
| PU | Cal | 552 | 184 | kg/ñ |
| AM | Gramoxones (herbicidas) | 12 | 0 | litros/ñ |
| AM | Insecticidas | 1,183 | 0 | litros/ñ |
| AM | Cal | 736 | 0 | kg/ñ |
| PR | Herbicida (Tordon) | 7,576 | 7,576 | litros/ñ |
| PR | Herbicida (Paraquat) | 37,880 | 37,880 | litros/ñ |
| PR | Cal | 552 | 552 | kg/ñ |

La gestión de desechos se clasificó según el tratamiento elegido para desechar sólidos y aguas residuales que generan gases como el metano. En los sitios estudiados no hay servicio de recolección de basura por lo que hay más responsabilidad en la toma de decisiones para la clasificación, separación de desechos orgánicos, reciclaje de ciertos materiales y elección del tratamiento de la basura restante; esta puede ser dirigida a relleno sanitario o incinerado en el sitio. Las fincas AM, GE y PR han realizado estas prácticas de

incineración a cielo abierto, que generan monóxido de carbono, óxido de azufre, dióxido de carbono y otros gases venenosos producto de la combustión incompleta de derivados de petróleo.

Los tratamientos de aguas utilizados en las fincas son uso de tanque séptico para los desechos fecales y drenaje de aguas residuales ordinarias por medio de canales en las fincas, los cuales están cubiertos de vegetación para conservación de suelos. Los detalles de la gestión de desechos se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Emisiones (tCO₂e/año) por gestión de desechos de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Fuente de emisión | | PU | GE | AM | PR |
|-------------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Basura no orgánica | 2003 | 0,293 | 0 | 0 | 0 |
| | 2014 | 0,732 | 0 | 0,146 | 0 |
| Quema de basura | 2003 | 0 | 0 | 0,350 | 1,400 |
| | 2014 | 0 | 0,035 | 0 | 0,280 |
| Tanques sépticos | 2003 | 0,460 | 0 | 0,368 | 0,552 |
| | 2014 | 0,368 | 0,368 | 0,552 | 0,276 |
| Aguas residuales | 2003 | 0,092 | 0 | 0,074 | 0,110 |
| | 2014 | 0,074 | 0,074 | 0,110 | 0,055 |
| Total 2003 (tCO ₂ e/año) | | 0,845 | 0 | 0,791 | 2,062 |
| Total 2014 (tCO ₂ e/año) | | 1,174 | 0,477 | 0,809 | 0,611 |

También, se calculó la cantidad de gases de efecto invernadero clasificados en dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (Cuadro 10). El dióxido de carbono procede de la combustión de fuentes de energía y la quema de desechos; el metano proviene de la quema de combustibles, la fermentación entérica, la gestión de estiércol, la producción de compost y el manejo de desechos; el óxido nitroso es generado por los fertilizantes nitrogenados, combustión de derivados del petróleo, producción de compost y quema de residuos.

Cuadro 10. Emisiones de gases de efecto invernadero de los años 2003 y 2014 en cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| GEI | | PU | GE | AM | PR |
|---|------|-------|----------|-------|-------|
| Dióxido de carbono (tCO ₂ /ñ) | 2003 | 0,486 | 0,542 | 7,978 | 4,584 |
| | 2014 | 3,274 | 1,114 | 2,450 | 3,662 |
| Metano (tCH ₄ /ñ) | 2003 | 0,583 | 3,29E-05 | 0,953 | 5,837 |
| | 2014 | 1,777 | 0,888 | 0,533 | 5,405 |
| Óxido nitroso (tN ₂ O/ñ) | 2003 | 0,004 | 6,59E-07 | 0,062 | 0,024 |
| | 2014 | 0,026 | 0,005 | 0,017 | 0,024 |

3.2. Cuantificación de las remociones por sumideros

Los cálculos de biomasa se dedujeron a partir del inventario de cada finca, según los estratos y áreas (Cuadro 2). Se puede observar en el Cuadro 11, que el mayor sumidero de biomasa lo posee la finca PR, ya que contiene mayor área de bosques y el mayor volumen de biomasa por hectárea, presente en el estrato bosque de galería.

PU contiene los estratos potrero, sistemas agroforestales y reforestación. Los potreros son densos, con especies frutales tropicales, maderables y cercas vivas, que dividen aproximadamente cuatro hectáreas en once apartados para rotación del ganado. Los sistemas agroforestales se encuentran en un área menor a una hectárea, por lo cual el valor de la biomasa total es menor que el valor/ha. La reforestación consiste en árboles de teca y melina, con especies de la zona y cercas vivas.

GE contiene sólo dos estratos con cobertura, los potreros y sistemas agroforestales. En los potreros, los apartados casi no cuentan con árboles, por lo que su biomasa es baja, las cercas vivas corresponden a madero negro (*Gliricidia sepium*), diferente del resto de las fincas que utilizan poró y elekeme (*Erythrina* spp). Los sistemas agroforestales son áreas heterogéneas con pastos de corta, yuca (*Manihot sculenta*), banano, plátano, (*Musa* spp), cacao (*Theobroma cacao*) y en medio de esto, especies forestales, medicinales, frutales y árboles leñosos, que son los menos abundantes.

AM ha tenido un cambio muy drástico entre el uso del suelo anterior y el actual, cuenta con tres estratos: potrero, sistemas agroforestales y bosque secundario. Después del cultivo de camote y ñame, quedaron las eras aun formadas y posiblemente esto contribuyó

a la contención de la humedad y nutrientes en el suelo y con ello, se ha dado un crecimiento muy acelerado. En los estratos se encontraron árboles como almendro (*Dypterix panamensis*), caoba (*Swietenia macrophylla*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), cedro amargo (*Cedrela odorata*), cebo (*Vochysia guatemalensis*), laurel (*Cordia alliodora*), entre otros, los cuales fueron plantados junto a especies frutales como cítricos (*Citrus* spp), mamón chino (*Nephelium lappaceum*), guayaba (*Psidium guajaba*), mango (*Mangifera indica*) y carambola (*Averrhoa carambola*). La densidad en esta finca es alta, a pesar de ser pequeña, contiene bastante biomasa y especies leñosas.

PR contiene los estratos potrero de 52,65 ha y bosques primario intervenido, de galería y secundario, de un total de 29,98 ha. Es la finca con mayor biomasa por el tipo de ecosistemas avanzados y el área total de la finca. Los potreros están altamente poblados de especies como caobilla que continuamente está en reproducción, presentan semillas germinadas, brinzales, árboles jóvenes y adultos distribuidos a lo ancho de toda la finca. Posee cercas vivas en todos los potreros, dividiendo estos para el pastoreo del ganado en áreas según disponibilidad de pastos y cercanía al área de ordeño.

Los bosques de mayor edad son los de galería, con individuos de gran porte, especialmente guácimos colorados (*Luehea seemanii*), caobillas y almendros. Los bosques primarios se encuentran en lomas y áreas anegadas, con gran diversidad, dominados por las familias Fabaceae, Rubiaceae, Arecaceae y Tiliaceae, como las más abundantes. Los bosques secundarios presentan un estado avanzado con presencia de remanentes y abundancia de palmas, es llamado de este modo al tener más perturbación; sin embargo, las especies presentes son semejantes a los otros estratos boscosos.

En las fincas AM, GE y PU los valores de biomasa y dióxido de carbono equivalente de las cercas vivas están contenidos en el estrato potrero, ya que había más mezcla entre las especies plantadas dentro de los potreros y cercas vivas, mientras que en la finca PR, era notable que las cercas vivas se constituían por poró y elekeme, y los árboles en potrero por especies de forma y edad diferente. A continuación, se presentan los resultados de la biomasa calculada en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Biomasa (t) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Finca | Biomasa aérea (t) por estrato de cada finca | | | | | | | | |
|-------------|---|---------------------|----------------|-------------|-----------|---------|---------|--------------|----------|
| | | Bosque Prim Interv. | Bosque galería | Bosque sec. | Reforest. | Potrero | SAF | Cercas vivas | Total |
| PU | total | | | | 106,792 | 117,479 | 66,938 | | 291,209 |
| | t/ha | | | | 88,993 | 30,169 | 78,29 | | |
| GE | total | | | | | 30,2454 | 41,093 | | 71,338 |
| | t/ha | | | | | 15,258 | 29,615 | | |
| AM | total | | | 92,298 | | 23,232 | 104,533 | | 220,063 |
| | t/ha | | | 142,259 | | 20,472 | 64,483 | | |
| PR 2012* | total | 2433,831 | 937,835 | 1399,701 | | - | | 75,2** | 4846,567 |
| | t/ha | 157,072 | 154,097 | 166,572 | | - | | | 159,13 |
| PR 2014 | total | 3600,672 | 1554,213 | 1552,756 | | 2098,18 | | 56,794 | 8862,615 |
| | t/ha | 232,376 | 255,375 | 184,786 | | 39,851 | | | 223,71 |

*Uso de base de datos de Rodríguez y Zúñiga (2012). ** Dato reportado por Solano (2012).

Para contar con datos fiables para la comparación de biomasa en bosques entre ambas mediciones (2012 y 2014), se decidió calcular el promedio general de la biomasa ponderada. Se obtuvo que en 2012 hay 159,13 t/ha y en 2014, 223,71 t/ha. La diferencia entre estas es de 64,58 t/ha o bien, 32,29 t/ha/año. Con base en el cálculo del error de muestro y los límites inferior y superior, se considera que no hay diferencias significativas entre los dos años, no se puede demostrar que hayan remociones anuales. Las remociones son iguales a cero porque ambos datos son estadísticamente iguales (Anexo 4).

Los valores totales de la finca PR están dadas por el promedio general multiplicado por el área del bosque, 6707,64 t más la biomasa de las cercas vivas y los árboles en potrero, 2154,97, que suman 8862, 62 t de biomasa.

La biomasa contribuye a la comprensión de la fijación del carbono en la vegetación, además, para los fines del estudio de comparar con las emisiones, se convirtieron los datos de biomasa a toneladas de dióxido de carbono equivalente, lo cual genera los siguientes resultados (Cuadro 12).

Cuadro 12. Dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. 2014.

| Finca | Dióxido de carbono equivalente (tCO ₂ e) por estrato de cada finca | | | | | | | Total |
|-------|---|----------------|-------------|-----------|---------|----------|--------------|-----------|
| | Bosque Prim Interv. | Bosque galería | Bosque sec. | Reforest. | Potrero | SAF | Cercas vivas | |
| PU | total (t) | | | 93,197 | 211,262 | 120,374 | | 424,833 |
| | t/ha | | | 77,664 | 54,253 | 140,788 | | |
| GE | total (t) | | | | 35,490 | 73,898 | | 109,388 |
| | t/ha | | | | 17,903 | 53,256 | | |
| AM | total (t) | | 165,979 | | 40,246 | 187,981 | | 394,205 |
| | t/ha | | 255,824 | | 35,465 | 115,959 | | |
| PR | total (t) | 6469,208 | 2792,403 | 2789,784 | | 3773,157 | 102,132 | 15926,685 |
| | t/ha | 417,503 | 458,824 | 331,999 | | 71,665 | | |

A partir de la cantidad de dióxido de carbono equivalente, se estimó el crecimiento anual de la vegetación por estratos, en PU, GE, AM y las cercas vivas de PR se estimaron los incrementos a lo largo de diez años. La razón de este cálculo anual es que las emisiones de GEI se contabilizaron por año, así las unidades (tCO₂e/ñ) permiten realizar el balance entre emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. A continuación se presenta, en el Cuadro 13, dichos resultados. El único cálculo que no se pudo estimar anualmente es el de los árboles en potreros de PR, por lo cual se colocó un NA en tales casillas. Además de las remociones de los bosques.

Cuadro 13. Aproximación del crecimiento anual (tCO₂e/ñ) según estratos y valores por hectárea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. 2014.

| Aproximación del crecimiento anual (tCO ₂ /ñ) por estratos de cada finca | | | | | | | | | |
|---|-------|---------------------|----------------|-------------|-----------|---------|--------|--------------|--------|
| Finca | | Bosque Prim Interv. | Bosque galería | Bosque sec. | Reforest. | Potrero | SAF | Cercas vivas | Total |
| PU | total | | | | 9,320 | 21,126 | 12,037 | | 42,483 |
| | t/ha | | | | 7,766 | 5,425 | 14,079 | | |
| GE | total | | | | | 3,549 | 7,390 | | 10,939 |
| | t/ha | | | | | 1,790 | 5,326 | | |
| AM | total | | | 16,598 | | 4,025 | 18,798 | | 39,421 |
| | t/ha | | | 25,582 | | 3,546 | 11,596 | | |
| PR | total | NA | NA | NA | | NA | | 10,213 | 10,213 |
| | t/ha | NA | NA | NA | | NA | | | |

3.3. Balance de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero

Como resultado final, se realizó el balance entre emisiones y remociones; así se puede conocer el comportamiento de las fincas con respecto al impacto atmosférico de las actividades agropecuarias, consumo de energía y manejo de desechos, y la capacidad de la vegetación de crecer y fijar carbono. Todos estos datos, expresados en dióxido de carbono equivalente generan los siguientes resultados (Cuadro 14).

Cuadro 14. Balance aproximado de dióxido de carbono equivalente en el 2014 (tCO₂e/ñ) para cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica.

| Finca | Energía | Ferm. entérica | Gestión de estiércol | Prod. de compost | Fertilizantes sintéticos | Gestión de desechos | Emisiones totales (tCO ₂ e/ñ) | Remociones (tCO ₂ e/ñ) | Balance (tCO ₂ e/ñ) |
|-------|---------|----------------|----------------------|------------------|--------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| PU | 3,28 | 27,11 | 0,61 | 0,23 | 1,71 | 1,17 | 34,11 | 42,48 | -8,37 |
| GE | 1,08 | 14,22 | 2,20 | 0,07 | 0,00 | 0,48 | 18,04 | 10,94 | 7,10 |
| AM | 2,41 | 3,20 | 1,25 | 0,09 | 0,00 | 0,81 | 7,75 | 39,42 | -31,67 |
| PR | 3,39 | 102,50 | 2,23 | 0,0004 | 0,00 | 0,61 | 108,73 | 10,21 | 98,52 |

Como se muestra en el cuadro anterior, dos fincas son carbono neutro, PU y AM, con base en su balance calculado; sin embargo, GE y PR no lo son. Estas últimas, no poseen la capacidad de equiparar las emisiones de GEI que realizan con respecto al crecimiento de la biomasa presente en cada finca. La mayor emisión que puede estar afectándolas es la fermentación entérica. GE posee poca cobertura forestal en sus potreros y

PR, aunque posee suficiente cobertura boscosa, estos tienen un crecimiento que tiende a cero porque son bosques maduros y se encuentran en equilibrio.

4. Discusión

El patrón general de una finca integrada contiene las necesidades básicas de una familia rural: consumo de energía, actividades agropecuarias, forestales y su propia gestión de desechos. Las fincas agroecológicas integran los procesos que brindan productos y servicios, estos se interrelacionan cuando el residuo de una actividad puede servir como materia prima de otra actividad, desarrollada cíclicamente (Groot et al., 2012; Restrepo, 2007).

En las fincas estudiadas se practica la agricultura orgánica o agroecología, por lo que los ciclos de nitrógeno, carbono, fósforo y otros elementos resultan beneficiados por la biodiversidad tanto vegetal y animal como en los suelos, donde los microorganismos aceleran la disposición de nutrientes (Altieri, 1999; Ferguson y Lovell, 2014; Vickery, 1991). Las plantas están altamente relacionadas con los microorganismos, desde la etapa de semillas hasta que su biomasa retorna al suelo, sin los microorganismos en el bosque no se daría el reciclaje de nutrientes (Gilbert, 2002).

La presencia de organismos en el suelo contribuye a la fertilidad (Vickery, 1991), la fauna del suelo como termitas y gusanos ayudan a mejorar la estructura y la ventilación del suelo con sus movimientos. Estos animales se alimentan de la materia orgánica y con sus excretas colaboran a la descomposición, que se beneficia con las temperaturas de la zona. Los fertilizantes llamados MM o microorganismos de montaña contribuyen altamente a que los nutrientes se encuentren disponibles para la absorción por las plantas.

Las actividades que se realizan dentro de fincas integrales favorecen la acumulación de biomasa para la producción de alimentos para la familia, para animales y comercializables. Los residuos agrícolas y las excretas animales contribuyen en la producción de abonos orgánicos como el compost, bocashi y otros fertilizantes (Bernal y Gondar, 2008; Marín, 2013). El estiércol restante queda acumulado en el potrero y emiten

directamente el gas metano, mas aportan nutrientes al suelo. Además de eso, los potreros están densamente poblados con árboles y cercas vivas de especies fijadoras de nitrógeno.

La medición exacta de los gases de efecto invernadero es un tema muy complejo según sea el alcance al que se desea llegar. Por esta razón, se debe buscar cuáles son los aspectos más relevantes en la dinámica atmosférica del tipo de proyecto. El estudio se delimitó por los usos de suelo existentes. Los flujos de GEI se ven afectados por procesos biológicos como la fotosíntesis, la respiración, la descomposición, nitrificación/desnitrificación, fermentación entérica y por procesos físicos como la combustión (IPCC 2006; Moureaux, Bodson y Aubinet, 2008).

Los flujos de GEI pueden estimarse por dos métodos: uno como cambios netos en las existencias de carbono con el paso del tiempo o directamente como flujos de gases que van hacia y desde la atmósfera (IPCC, 2006). En este caso se calculó como flujos hacia la atmósfera por fuentes energéticas, fermentación entérica, gestión de estiércol y de desechos. Las fijaciones de carbono se asumen como absorciones de CO₂ atmosférico que se implanta en el crecimiento vegetal.

Primeramente, se estimaron las emisiones de cuatro fincas. Estas tienen un comportamiento diferente en un lapso de diez años. PU y GE aumentaron sus emisiones y AM y PR las disminuyeron. PU por la existencia de un vehículo que consume gasolina, aumento en el consumo de gas y electricidad, aumento de ganado y el volumen de desechos. Se observa un aumento del consumo general, lo cual es proporcional a las emisiones generadas. Aunque hubo disminución en el uso de fertilizantes nitrogenados.

GE empieza a establecer su proyecto de finca agroecológica en el año 2004. Un año antes solo presenta consumo energético por medio de candelas para la iluminación y consumo de gas. Actualmente, la finca consume gasolina, electricidad y leña; poseen ganado, se generan desechos y se realiza quema de basura plástica. Nunca se ha utilizado fertilizantes químicos ni plaguicidas.

AM poseía un uso del suelo poco sostenible, el cultivo de camote y ñame con mecanización tres veces al año, tres arados distintos por vez, uso excesivo de fertilizantes y

plaguicidas. También, se realizaban viajes constantes de Istarú a Heredia para comercializar sus productos en un vehículo que consumía diesel. El cambio de estas prácticas muestra la influencia de los combustibles fósiles y la fertilización química en el impacto atmosférico. Actualmente, las mayores emisiones pertenecen a la fermentación entérica; sin embargo, se muestra que la cría de cabras tiene un impacto mucho menor que la de vacas.

PR se muestra estable a lo largo de los diez años estudiados, su disminución en las emisiones se debe principalmente al cambio de diez cabezas de ganado vacuno, ya que el consumo de gasolina y diesel es el mismo; hubo disminuciones en el consumo de leña a cambio del aumento en el consumo de gas. Nunca se utilizó fertilizantes sintéticos ni electricidad, la energía eléctrica se obtiene con paneles solares. La gestión de desechos se ve beneficiada por la separación y reciclaje de ciertos materiales. Si bien, aún se practica la incineración, esta se realiza con volúmenes menores.

La ganadería tiene impactos serios sobre el ambiente. La mayor emisión generada en 2014 para todas las instalaciones estudiadas es la fermentación entérica. El metano se produce en el sistema digestivo de los rumiantes, cuando los microorganismos descomponen los carbohidratos en moléculas simples para la absorción de los nutrientes. La cantidad de metano que se emite depende del tracto digestivo, edad y peso del animal; también, influye el tipo de alimento consumido. Los rumiantes son los animales a los que se les atribuye mayor producción de metano por su estructura intestinal. Estos son los vacunos, ovinos, búfalos y caprinos, los cuales poseen el rumen, una cámara expansiva en la parte delantera del tracto digestivo que les ayuda a digerir mejor, pero en ella hay una actividad microbiana intensiva que influye en la tasa de emisión de metano (IPCC 2006, Moss, Jouany y Newbold, 2000).

Junto a la producción animal se encuentra la gestión de estiércol de dichas especies. Entre ellas fueron consideradas dejar el estiércol en el pastizal, la colecta en los establos, el apilamiento y la producción de abonos orgánicos. Estas prácticas poseen diferentes grados de emisiones de metano; sin embargo, fueron contempladas en el estudio como una sola, la gestión de estiércol y, adicionalmente, la producción de compost que también genera óxido nitroso.

La menor emisión se realiza cuando el estiércol es dejado en el potrero, ya que las emisiones son menores cuando se encuentra en condiciones aeróbicas. En cambio, el apilamiento promueve la descomposición; además, la incorporación de insumos como semolina, carbón, granza, tierra, melaza y microorganismos ascomicetes para la producción de abonos contribuyen al enriquecimiento nutricional y la aceleración de descomposición de la materia orgánica. Debe haber una relación equivalente de carbono y nitrógeno, dado que el carbono es fuente de alimento de los microorganismos y el nitrógeno de los hongos y bacterias que llevan a cabo el proceso de descomposición (Camacho, 2010).

Sin embargo, la producción de abonos orgánicos es de suma importancia para la fertilización de los cultivos sin el uso de químicos, ya que estos abonos aportan gran cantidad de nutrientes, organismos y estructura al suelo (Bernal y Gondar, 2008). Se considera una ventaja el aprovechamiento de las excretas en la producción de abonos orgánicos, pues se disminuye el volumen de desechos, se estabiliza su pH, se destruyen los agentes patógenos, y se puede generar energía con digestores anaeróbicos (IPCC, 2006).

El proceso de compostaje alcanza la máxima temperatura de aproximadamente 60° C al inicio del proceso, después empieza a descender hasta alcanzar unos 20° C. A tales temperaturas, se destruyen los organismos patógenos. La aireación es vital, ya que la falta de oxígeno puede causar un cambio de organismos aeróbicos por anaeróbicos. Esto afecta la degradación de los residuos orgánicos, genera malos olores y gases indeseados (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

La recuperación energética del metano es una buena manera de utilizar los desechos como las excretas animales en digestores anaeróbicos (Espinosa-Solares et al., 2006), así se substituye el consumo de electricidad y gas para cocinar. Las fincas estudiadas han tenido estos mecanismos en etapas diferentes de los años estudiados.

El consumo de energía es necesario para la subsistencia de cualquier familia, sea esta energía de tipo eléctrica, combustibles fósiles, quema de biomasa o recuperación de energía. En tres fincas se utiliza la energía eléctrica, una fuente indirecta de emisiones; PR utiliza energía solar. También, hay dependencia del consumo de combustibles para vehículos, máquinas y bombas de extracción de agua.

La energía proveniente de la combustión de hidrocarburos emite los gases monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (CH), plomo (Pb), partículas u hollín, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), dióxido de carbono (CO₂); por lo cual se emiten más gases que los analizados. Se reconoce que las reacciones de los óxidos nitrosos e hidrocarburos en presencia de luz solar producen contaminantes foto reactivos. Los automóviles son los responsables de la contaminación atmosférica y el exceso de monóxido de carbono en sitios urbanos (Gaviria, Mora y Agudelo 2002; Vitousek, 1994).

El gas LPG es un producto simultáneo de la extracción de petróleo, compuesto principalmente por butano (C₄H₁₀) y propano (C₃H₈) (IPCC, 2006; Balat, 2005). En las cuatro fincas se utiliza para la cocción de los alimentos. Un sustituto de esta fuente es el digestor anaeróbico que funciona a base de excretas animales y humanas, también genera abonos orgánicos para el suelo al utilizar el sustrato del biodigestor y sus lixiviados (Camacho, 2010; Arce, 2011).

La leña es un recurso renovable que proviene de los recursos forestales. Está formada por carbono vegetal que fue fijado en biomasa. La combustión eficiente puede reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, esto ligado al contenido de humedad y densidad de la madera, los cuales definen su valor calorífico (Biomass Energy Center, 2009). La contabilización de generación de gases se realizó en el análisis de fuentes de emisiones energéticas; sin embargo, no se consideró en el análisis del balance.

La eficiencia energética es un factor importante que se debe considerar, ya que la combustión de leña en estas fincas es muy rudimentario. Si se utilizaran estufas u hornos en vez de hogueras, se realizaría un mejor aprovechamiento del calor, simultáneamente se estarían emitiendo menos gases (CATIE y National Academy of Science, 1984).

Con respecto a la producción de óxido nitroso, esto ya se realiza de manera natural en procesos del suelo mediante la nitrificación y la desnitrificación. La nitrificación es la oxidación microbiana aeróbica del amonio en nitrato y la desnitrificación es la reducción microbiana anaeróbica del nitrato en gas de nitrógeno (N₂). El óxido nitroso es un producto intermedio gaseoso en la secuencia de reacción de la desnitrificación y un producto derivado de la nitrificación que se fuga de las células microbianas al suelo y después a la

atmósfera. Esto está relacionado con la disponibilidad de N inorgánico en el suelo. Por lo tanto, se estiman las emisiones de N_2O por los agregados de N causados por influencia antropogénica, como lo son la adición de fertilizantes sintéticos, depósito de estiércol, residuos agrícolas y barros cloacales (García-Fernández y Sánchez, 2008).

Las emisiones de N_2O producidas por agregados de N se producen directamente e indirectamente por la volatilización de amonio (NH_3) y nitratos (NO_x), por los combustibles fósiles y la quema de biomasa (IPCC, 2006). Como ya fue mencionado, el óxido nitroso es una sustancia que se produce naturalmente por los procesos del suelo. Estos últimos se ven afectados por la gestión que se realiza, siendo la fertilización orgánica o sintética. En la fertilización orgánica se contempla la gestión de estiércol que produce metano además de óxido nitroso y otros componentes orgánicos volátiles distintos del metano.

Los fertilizantes químicos para cultivos anuales contienen los tres macronutrientes más necesarios para las plantas, en forma de nitrato de amonio (NO_3NH_4), óxidos de fósforo (P_2O_5) y óxidos de potasio (K_2O) (The Fertilizer Institute, 1980). Estos componentes deben pasar por procesos que incluyen microorganismos del suelo para ser absorbibles por las plantas, ya que estas requieren nitratos, fósforo y potasio como elementos libres (Vickery, 1991). Solo el nitrógeno se convierte en elemento gaseoso, su volatilización es un proceso secundario proporcional a la cantidad de abono sintético aportado al suelo (IPCC, 2006).

Las fincas presentan un consumo mayor de fertilizantes en el pasado y esto se refleja claramente en las cuantificaciones de CO_2e en el año 2003. Por ejemplo, la finca AM usaba en exceso los fertilizantes sintéticos para cultivos que, en realidad, son bajos en exigencias nutricionales.

Las emisiones por el uso de fertilizantes son muy altas. Andrade, Campo, y Segura (2014) contabilizan las emisiones de este tipo como las responsables del 65 % de las emisiones totales en cultivos de arroz. También, Cheng et al. (2011) presentan las mayores emisiones por el uso de fertilizantes en la producción de cultivos de China entre 1993 y 2007.

Además de estos fertilizantes nitrogenados, se ha realizado el registro de plaguicidas clorados que contienen nitrógeno. La mayor cantidad de productos son herbicidas como Paraquat, Tordon, 2-4, B o Gramoxon ($C_{12}H_{14}N_2$) (Pesticide Management Education Program, 1993). Burns y Audus (1970) explican que el paraquat se rompe en el suelo por medio de las arcillas o por el metabolismo de una levadura llamada *Lipomyces starkeyi* que utiliza el nitrógeno como fuente de alimento. También los suelos con altos contenidos en materia orgánica son capaces de absorberlo con facilidad, lo que desencadena en la quema de los microorganismos vivos y vegetación.

Los plaguicidas clorados como Paraquat, Gramoxones, Tordon y otros fungicidas e insecticidas se utilizaron especialmente en 2003, en AM mayormente y se siguen utilizando en cultivos de ñame en PU, que abarcan 0,8 ha. No se encontró fórmulas o factores de emisión que permitieran realizar el cálculo de emisión por el uso de estos productos, de cómo estos reaccionan químicamente y se volatilizan, así que fueron excluidos. Sin embargo, se debe argumentar a favor de que no existen prácticas de quema de los residuos orgánicos con aplicaciones de estos productos reportados, ya que, esta es una práctica común en algunos sitios y tiene consecuencias graves a lo largo de la cadena alimenticia (CCA, 2014).

Además, la quema de residuos agrícolas, que fueron atomizados con plaguicidas clorados como el fungicida pentaclorofenol (PCF) y el herbicida ácido 2,4-D diclorofenoxiacético se convierten en dioxinas durante el proceso de combustión. La presencia de los plaguicidas clorados en la biomasa quemada aumenta 150 veces la producción de dioxinas, además de emitir dioxinas en el suelo a través de la ceniza. La exposición a dioxinas está relacionada con grandes daños a la salud, ya que se ha comprobado que afectan las células reproductivas, hormonales, la leche materna y produce cáncer (CCA, 2014). Se puede afirmar que en los casos estudiados no se practica la quema de residuos agrícolas.

Otra consideración al respecto de los fertilizantes y plaguicidas es que estos tienen una huella de carbono de mucho peso, ya que la producción de estos implica gran contaminación atmosférica; además si estos son importados o igualmente transportados dentro del país y hasta el sitio de consumo (Stoessel, Juraske, Pfister y Hellweg, 2012; The

Fertilizer Institute, 1980). Si se analizara el impacto indirecto de utilizar estos productos, comparado con la producción de abonos orgánicos, se haría visible el gran impacto de los químicos.

Con respecto a la gestión de los desechos sólidos, su composición es muy variable. Estos contienen carbono orgánico degradable y carbono fósil. La composición de los desechos estudiados son mayormente polietilenos de baja densidad como empaques plásticos de productos, otros polietilenos no reciclables y latas.

Los desechos sólidos que no contienen materia orgánica son separados en todas las fincas, con ello se llevan a sitios de acopio para reciclar plásticos, vidrios, papel, cartón y cauchos. Los desechos restantes son llevados a sitios que cuentan con el servicio municipal de recolección y dirigidos a rellenos sanitarios. Este es el caso de las fincas PU y AM, pero en las fincas GE y PR los desechos son tratados con incineración abierta, lo cual genera mayor contaminación ambiental que los rellenos sanitarios.

En el caso de los desechos que se incineran, esto se hace abiertamente, el humo y otras emisiones se liberan directamente al aire, sin chimenea ni columna. Los gases emitidos incluyen el CO₂, CH₄ y N₂O, además de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x) (IPCC, 2006).

Domínguez y Reyes (2011) mencionan que la combustión empleada para obtener calor es un proceso de emisión de contaminantes muy significativo, clasificados en dos tipos, los primarios son los contaminantes que permanecen en la atmósfera tal como fueron emitidos por la fuente, como los óxidos de azufre y el monóxido de carbono. Los secundarios son los contaminantes que pueden experimentar cambios químicos, como algunos compuestos de nitrógeno y subproductos de la combustión de productos derivados del petróleo, que favorecen la formación de ozono, además de la contaminación radiactiva. Este mismo autor afirma que, en las ciudades, los residuos no orgánicos emiten un tercio de todas las emisiones totales de gas metano. La mejor manera de evitar estas emisiones es disminuir o eliminar el consumo de materiales problemáticos para el reciclaje y tratamiento.

En cuanto a las remociones, la biomasa está acumulada en potreros arbolados, sistemas agroforestales y bosques. La cuantificación llevada a cabo contempla los sistemas agroforestales de tres fincas, bosques secundarios de AM y PR, bosques primarios intervenidos y de galería en PR y área de reforestación en PU.

La mayor biomasa equivale a 255,38 t/ha está acumulada en el bosque de galería de la finca PR. Este poseía árboles de gran tamaño que realmente evidencian la acumulación de biomasa durante mucho tiempo. Las capas de cobertura como “uso de tierras Kyoto 2008” (Ortíz, 2008) muestran que la zona siempre tuvo vocación forestal, los actuales dueños de la finca afirman haber realizado manejo forestal en la década de los 70, no obstante, la zona de bosque de galería no fue manejada.

Los bosques primarios de PR fueron intervenidos hace cerca de veinte años, desde esa ocasión se han mantenido protegidos y actualmente cuentan con el pago por servicios ambientales. La presencia de especies como manú negro (*Minuartia guianensis*), olla de mono (*Lecythis ampla*), grandes individuos de caobilla, almendro o fruta dorada (*Virola koschnyi*) y gran abundancia de palmas como *Socratea exorrhiza*, que son indicadores del estado avanzado de los bosques, presentes en los tres estratos, primario, secundario avanzado y galería. La biomasa del bosque primario intervenido es de 232,38 t/ha y la biomasa del bosque de galería es de 255,38 t/ha, similares a la biomasa de 253,16 t/ha reportada por Ortíz, Chazdon y Vílchez (2011) en bosques primarios de Península de Osa.

El bosque secundario de PR posee un valor de biomasa de 184,79 t/ha, la composición florística es similar a la del bosque primario, aunque con presencia de algunas especies heliófitas, como *Colubrina spinosa* y *Ochroma pyramidale*. Existen árboles remanentes, presencia de quebradas pequeñas, densidad alta y mayor presencia de palmas por intervención humana, ya que esta área se utiliza para el cultivo experimental de dichas especies.

Otra finca que posee bosque secundario es AM, la cual presenta un valor de 142,26 t/ha de biomasa. Este bosque comenzó a regenerarse naturalmente en 2004. Las especies presentes son mayormente heliófitas y existe gran cantidad de árboles de poró y cebo que fueron plantados. Los valores de biomasa se encuentran cerca de los reportados por Ulate

(2011) de 153,7 t/ha o los presentados por Ortíz, Chazdon y Vélchez (2011) de 116, 81 t/ha. Sin embargo, los valores reportados por los autores son para bosques secundarios de más antigüedad, en el sitio se encontró gran densidad, árboles de diámetros y alturas considerables.

El crecimiento acelerado de la vegetación de la finca AM puede estar facilitado por la existencia de eras que quedaron del cultivo anterior. Esta respuesta del ecosistema puede ser atribuido a los mecanismos de nucleación y rugosidad expuestos por Tres y Reis (2009) para la restauración rápida de ecosistemas. Estos autores atribuyen a la formación de eras una capacidad de retención de humedad y nutrientes que comienzan a funcionar como núcleos de biodiversidad que van expandiéndose al resto del área. La restauración ecológica es sensible a las condiciones iniciales de rugosidad del sitio (Aumond, 2007)

Los cultivos en sistemas agroforestales se centran mayormente en ecosistemas heterogéneos de especies arbustivas, arbóreas, palmeras; especies nativas y exóticas, entre ellas se encontraron mamón chino (*Nephelium lappaceum*), cítricos, aguacate (*Persea americana*), coco (*Cocos nucifera*), palmito (varias *Arecaceae*), cacao (*Theobroma cacao*), guayaba (*Psidium guajaba*), pejibaye (*Bactris gasipaes*), guanábana (*Annona muricata*) y arazá (*Campomanesia xanthocarpa*). Preponderan las familias *Myrtaceae*, *Annonaceae*, *Arecaceae*, *Rutaceae*, entre otras. Estos estratos poseen abundantes especies forestales como teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), almendro, roble coral (*Terminalia amazonia*), entre otras, además de especies que se establecieron naturalmente como *Conostegia* spp, *Clethra* sp y *Schyzolobium parahyba*.

Los cultivos de otras especies de menor porte con gran importancia alimenticia son banano, plátano, yuca, medicinales, maíz, pastos, frijol, cucurbitáceas, entre otras; estas se encuentran en áreas pequeñas, sembradas con métodos orgánicos como doble escavado, siembra intensiva, siembra diversificada o asociación de cultivos, por ejemplo, maíz con ayote o bloques dedicados únicamente a pastos de corta “King grass” y yuca. Estos bloques de cultivo no fueron cuantificados como sumideros de carbono, ya que no se presentan a lo largo del tiempo.

Los potreros contienen gran cantidad de cercas vivas de poró (*Erythrina berteruana*), elekelme (*Erythrina fusca*) y madero negro (*Gliricidia sepium*), especies que crecen con rapidez, con gran capacidad de rebrote, reproducción por podas y estacas. Las cercas vivas cumplen la función de segmentar los potreros, por lo cual, el ganado puede estar en sitios restrictivos, limitan la compactación del suelo y rotan el impacto (Nygren, 1995). El mantenimiento de los potreros se da manualmente, donde la especie dormilona (*Mimosa púdica*) se controla mecánicamente y se evita la aplicación de herbicidas. Además, las especies utilizadas en cercas vivas son fijadoras de nitrógeno al pertenecer a la familia *Fabaceae Papilionoidea*.

PU posee gran cantidad de árboles de melina (*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*), balsa (*Ochroma pyramidale*) y frutales en medio de los potreros, los cuales producen frutos, madera y ayudan en la limpieza de las aguas residuales por medio de una zanja que cruza la propiedad. La finca GE contiene pocos árboles en potreros; solamente algunas guanábanas, cítricos y especies que se establecieron ahí naturalmente. La colindancia con una reserva de biodiversidad contribuye al aporte de semillas y protección de los cursos de agua. AM es la finca que posee menor cantidad de cercas vivas, pero hay árboles de gran porte como almendros y guanacastes (*Enterolobium cyclocarpum*) plantados hace menos de diez años. PR contiene cerca de 50 árboles por hectárea en 52,65 ha de potrero, donde las principales especies son caobilla (*Carapa nicaraguensis*), roble de sabana (*Handroanthus rosea*), cedro amargo (*Cedrela odorata*), laurel (*Cordia alliodora*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*), manú plátano (*Vitex cooperi*), entre otras; en este sitio, se realizará un aprovechamiento de algunos árboles de potrero, ya que la densidad es considerable y los árboles se mantienen en un constante ciclo de reproducción por semilla cerca de los árboles madre.

Los cálculos de biomasa de los potreros son diferenciados entre las fincas, ya que no eran homogéneas entre ellas. PU posee muchos árboles en potrero, cercas vivas simples, dobles y triples con árboles frutales y maderables, por lo que se utilizó un muestreo de tres apartados correspondiente a la mitad del potrero total. Mientras que las fincas GE y AM fueron muestreadas ciertos transeptos de cercas vivas y medidos todos los árboles dentro del potrero, ya que eran menos. Así que para PU se extrapólo el volumen de biomasa

existente en la muestra para el resto del estrato, mientras que en AM y GE se extrapoló el volumen de cerca muestreada más el volumen de los árboles en potrero. PR posee el análisis de árboles en potrero y cercas vivas por separado.

Para la medición de los flujos de gases de efecto invernadero, se han diseñado gran cantidad de hojas electrónicas como el IPCC tool (IPCC, 2006) y Ext-Ant (Bernoux, Brockel, Giacomo y Tinlot, 2010) o para Costa Rica, la Planilla de Carbono (Alpizar, 2014). Esta última es una manera de cuantificar proyectos tales como los del presente estudio, apoyados por el Programa de Pequeñas Donaciones. Dicha hoja no fue utilizada porque se tiene mejor consistencia con los datos del inventario; sin embargo, se tomaron los factores de emisión de las candelas y la leña para el cálculo de emisiones.

Con respecto al trabajo de campo realizado, se debe tomar en cuenta algunos detalles técnicos, en estos casos, la heterogeneidad entre los estratos y dentro de ellos. La estratificación es clave, según lo mencionan protocolos como Chacón y Porro (2009), MacDicken (1997), Orozco y Brumer (2002), Prodan, Peters, Cox y Real (1997), Rüginitz, Schlegel, Gayoso y Guerra (2001). Con base en estos trabajos, se realizó la elección del tamaño de la muestra según la densidad del estrato y el número de repeticiones con base en el área y el tiempo disponible (Andrade e Ibrahim, 2003).

Los errores de muestreo de todas las fincas se presentan más altos de lo debido, esto limita la confiabilidad en los resultados de las remociones. En algunos casos, el área muestreada era suficiente pero no la distribución de la muestra y en otros casos faltó aumentar la intensidad de muestreo. El menor valor de error de muestreo corresponde al estrato bosque secundario de la finca AM y los mayores errores fueron los del bosque de galería de la finca PR.

La biomasa aérea fue el único sumidero de carbono cuantificado. Se midieron los árboles a partir de 5 cm, se excluyó la biomasa del sotobosque, hojarasca, biomasa viva subterránea y carbono en el suelo. Esto debido a que las parcelas de muestreo fueron temporales, y solo se contaba con tiempo para mediciones limitadas. En otras palabras, no se realizó más mediciones para monitoreo, además de la limitante de la complejidad del uso de modelos exactos para el conocimiento de los aportes de estos sumideros.

La medición de carbono en el suelo incrementaría los valores de las remociones, ya que los ecosistemas poseen un mantillo de hojarasca, materia muerta de árboles caídos y carbono orgánico en el suelo que son muy importantes para el ecosistema; esta es la materia prima para el establecimiento de nuevos árboles. Aguilar, Ortiz, Vílchez y Chazdon (2012) mencionan que en bosques primarios la acumulación de carbono es mayor, seguida por bosques secundarios maduros y los estados de sucesión más jóvenes poseen menos biomasa muerta en el suelo; estos obtuvieron valores entre 9,7 a 5,6 tC en la capa del mantillo, de 7,8 a 3,4 tC en la madera muerta y de 109,2 a 78,5 tC en el suelo, los valores más altos representan los estados más avanzados de sucesión. Uno de los mayores sumideros de carbono se encuentra en el suelo en forma de carbono orgánico (Ibrahim et al., 2007; Kemanian y Stöckle, 2010; Robert, 2002).

En el caso de los árboles bifurcados, fueron tomados en cuenta como individuos aparte al tener su bifurcación bajo 1,3 m, debido a que es el mejor ajuste para contabilizar la biomasa, un promedio de diámetros sesga cerca de la mitad del volumen real. Esta manera de calcularlo está fundamentada por Cruzado y Flores (2010).

Cierta necromasa fue contabilizada en el inventario en las fincas PU, GE y AM, estos eran individuos que no poseían copa pero continuaban en pie. Para efectos de contenido de carbono se utilizó un peso específico de la madera de 0,5, pues, según Chao et al. (2008), quienes cuantificaron el porcentaje de madera muerta en los bosques amazónicos, este aspecto está relacionado con la velocidad del reciclaje de nutrientes, el tipo de suelo y la topografía. La biomasa muerta puede variar de un 6 a 25 % de la biomasa total (Clark et al., 2002).

Los estratos boscosos de PR fueron comparados con Rodríguez y Zúñiga (2012). Al utilizar el modelo alométrico de Chave et al. (2014) se uniformizaron ambas bases de datos, con diámetros a partir de 10 cm, sin bejucos, sin árboles muertos ni caídos y sin los árboles de mayor porte del bosque de galería. El análisis de error de muestreo demuestra que los datos de 2012 están en el rango de confianza mínimo y máximo del 2014, por lo cual se concluye que los datos obtenidos en ambos años son estadísticamente iguales y se asume que las remociones son cercanas a cero. Se debió haber establecido más parcelas de muestreo en el bosque secundario y de galería para obtener datos confiables.

Según se observa en los resultados de PR, los valores de biomasa de los bosques muestreados son menores en 2012 que en 2014, con una variación bastante alta que no puede ser considerada como cierta, por el análisis de los rangos del error de muestreo, también porque los bosques conforme aumentan su edad tienden a disminuir su incremento en biomasa, distinto de los ecosistemas jóvenes, como lo exponen Araujo-Murakami, Arroyo-Padilla, Killen y Saldias-Paz (2006); Quesada, Acosta, Garro y Castillo (2012); Vélchez, Chazdon y Milla (2008) y Wadsworth (2000). Sin embargo, Quinto (2010) obtuvo crecimientos significativos entre tres periodos distintos de mediciones y prueba varios modelos matemáticos, además encontró que no hay diferencias entre gradientes de precipitación, pero sí entre diferentes pisos altitudinales.

El modelo alométrico, propuesto por Chave et al. (2014), se basa en el uso de los valores dap, altura y densidad de la madera al igual que los modelos probados por Chou y Gutiérrez-Espeleta (2012) y muchos aportes de estudios que prueban modelos alométricos para el cálculo de biomasa aérea.

Por lo tanto, aunque los bosques primarios, secundarios maduros y de galería se encuentran en un estado de equilibrio, estos no aumentan significativamente su crecimiento de biomasa a la velocidad de un bosque secundario temprano o plantaciones forestales (Quesada et al., 2012). La manera en que se pueden dar remociones significativas en la finca PR es aumentando el área de bosques o realizando nuevos estratos dedicados a sistemas agroforestales o bosques con cultivo de palmas o plantaciones forestales.

A pesar de que se concluye que dos fincas estudiadas son carbono neutro y dos no, se afirma que la agricultura orgánica y los sistemas agroforestales son mecanismos para generar una serie de beneficios tanto comerciales como ambientales. Así lo mencionan Briner, Hartmann, Finger y Lehmann (2012) quienes estudiaron varios tipos de sistemas de producción ganadera en Suiza. Sus resultados reflejaron que los sistemas agroecológicos son la única opción a largo plazo para la reducción de la huella de carbono en la producción de carne y leche.

El impacto de las fincas de producción orgánica son claramente menores que los sistemas convencionales, por lo que es importante destacar los servicios ecosistémicos

aportados al ambiente, como lo son fertilidad del suelo, protección del agua, biodiversidad, ausencia de plagas, conservación del suelo, entre otras.

Los servicios ecosistémicos son condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies conforman y sustentan la vida humana, con ellos se mantiene la diversidad y la producción de bienes (CATIE, 2010).

Las fincas estudiadas cumplen funciones ecosistémicas muy importantes ante el cambio de clima o las posibles amenazas climáticas. La optimización de los sistemas productivos se beneficia tanto por los retornos económicos como por los servicios ambientales (Groot et al., 2012). La sostenibilidad es la capacidad de crear, experimentar y mantener la adaptación.

La resiliencia de los ecosistemas es la capacidad que tienen estos para adaptarse a perturbaciones sin alterar su estructura y funcionalidad. Al haber una gran conectividad entre los componentes de los sistemas estudiados, existe una gran complejidad entre las entradas y salidas de energía, lo cual sigue jerarquías de orden y escala, pero permite que haya estabilidad (Gunderson, Holling, Pritchard y Peterson, 2002; Holling, 2001). Con prácticas sostenibles se puede obtener una mayor resiliencia de los sistemas productivos por soportar los aumentos de temperatura y desórdenes de temporadas lluviosas y secas en años futuros, lo que puede permitir la permanencia de los proyectos a lo largo del tiempo.

5. Conclusiones

→ PU y GE aumentaron sus emisiones, AM y PR las disminuyeron entre los años 2003 y 2014. PU por aumento de ganado, GE por el establecimiento del proyecto, AM por eliminación del uso de fertilizantes nitrogenados y cambio de combustibles de diesel a gasolina y PR se encuentra similar entre ambos años, con diferencia de diez cabezas de ganado.

→ La fermentación entérica es la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en el 2014. Es menor el impacto del ganado caprino que el vacuno.

→ Las emisiones energéticas son mayores con uso de diesel que gasolina. Generalmente las fuentes de energía consisten en la segunda mayor emisión en el año 2014.

→ Las emisiones por uso de fertilizantes nitrogenados son también importantes. Solo se utilizaron en PU y AM. Al eliminar el uso en AM, se nota una variación notable de 2003 a 2014.

→ La gestión de estiércol, producción de compost y gestión de desechos son emisiones menores. Aunque, es más contaminante quemar los residuos no orgánicos que tratar en relleno sanitario.

→ En fin, PU emite 34,11 tCO₂e/año, GE emite 18,04 tCO₂e/año, AM emite 7,76 tCO₂e/año y PR emite 108,73 tCO₂e/año.

→ En cuanto a remociones, las fincas poseen las siguientes cantidades de biomasa totales; PU, 291,21 t en 7,32 ha; GE, 71,34 t en 4,30 ha; AM 220,06 t en 3,82 ha y PR posee un promedio general de 6707,64 t de biomasa en 29,98 ha de bosque y 2154,974 t de biomasa en sus cercas vivas y árboles en potreros de 52,65 ha. Con respecto a la biomasa en dióxido de carbono equivalente, se obtuvo que PU posee 424,833 tCO₂e, GE, 109,388 tCO₂e; AM, 394,205 tCO₂e y PR, 15926,685 tCO₂e.

→ Al analizar el crecimiento anual de la biomasa de las fincas y comparar con las emisiones de GEI generadas, se establece que las fincas PU y AM son carbono neutro y no son carbono neutro GE y PR. El balance de PU es -8,37; AM, -31,67; GE, 7,10 y PR, 98,52.

6. Recomendaciones

Se recomienda calcular el carbono en el suelo y de abonos para dar a conocer el potencial de la agricultura orgánica en la fijación de dicho elemento. Con estos datos, se aumentarían los valores de las remociones, además de ampliar la validez del estudio.

En términos de inventarios, el error de muestreo se disminuye al establecer más muestras o distribuir la muestra por el área a estudiar. Con ello, los datos se vuelven más confiables, los errores de muestreo disminuyen.

La mejor contabilización del crecimiento de biomasa es con parcelas permanentes de muestreo monitoreadas cada año. Así también puede monitorearse la capa de hojarasca o mantillo en el suelo en cada parcela periódicamente. Esto se realiza cuando existe la disposición de tiempo y recursos.

Se les recomienda a las familias aumentar al máximo posible la cobertura forestal así aumentará la densidad de vegetación en sus fincas para contrarrestar el efecto causado por el ganado vacuno y las otras fuentes de emisiones. En algunas situaciones se puede aprovechar aún más el área de las fincas con cultivo de especies forestales.

Además de aumentar el área de la vegetación, se puede reducir la huella de carbono cuando se realizan menos emisiones por medio de algunas prácticas, entre ellas, el uso consciente de los combustibles, supresión total del uso de fertilizantes nitrogenados y plaguicidas clorados, y en vez de realizar quemas de desechos, realizar pequeños rellenos sanitarios controlados en la misma propiedad o llevar todos los desechos afuera de la finca. Aunque la mejor medida es disminuir a lo máximo el consumo de plásticos o productos empacados.

7. Referencias

- Aguilar, H., Ortíz, E., Vílchez, B., Chazdon, R. L. (2012). Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9 (22), 22-31.
- Alpízar, E. (2014). Guía para la aplicación de la plantilla digital para estimar gases de efecto invernadero en proyectos del Programa Pequeñas Donaciones (PPD) del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Alpízar, E. (2014). Planilla de carbono digital para mitigación. Programa Pequeñas Donaciones (PPD), Fondo para el medio ambiente (GEF) del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Documento Excel.
- Altieri, M. (1999). *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Nordan-Comunidad. Montevideo, Uruguay.
- Altieri, M., y Nicholls, C. I. (2000). *Agroecología. Teoría y práctica para una agricultura sostenible*. Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente.
- Andrade, H. J., Campo, O., y Segura, M. (2014). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia. *Corpoica Ciencia, Tecnología y Agropecuaria*, 15 (1), 25–31.
- Andrade, J., e Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas agro pastoriles? *Agroforestería En Las Américas*, 10 (39-40), 109–116.
- Apps, M. J. (2003). Bosques, el ciclo mundial del carbono y el cambio climático. XII Congreso Mundial Forestal.
- Araujo-Murakami, A., Arroyo-Padilla, L., Killen, T. J., y Saldias-Paz, M. (2006). Dinámica del bosque, incorporación y almacenamiento de biomasa y carbono en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado. *Ecología en Bolivia*, 41 (1), 24-45.

- Arce, J. J. (2011). *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de animales aplicable en las zonas del litoral ecuatoriano* (Tesis en Ingeniería Industrial). Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador. Guayaquil, Ecuador.
- Aumond, J. J. (2007). *Adoção de uma nova abordagem para a recuperação de área degradada pela mineração*. (Tese de Doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- Balat, M. (2005). Fuel Properties of Hydrogen, Liquefied Petroleum Gas (LPG), and Compressed Natural Gas (CNG) for Transportation. *Energy Sources*, 24 (7), 601-610.
- Banco Mundial, CIAT, CATIE. (2014). *Agricultura climáticamente inteligente en Costa Rica. Serie de perfiles nacionales de agricultura climáticamente inteligente para América Latina*. Washington DC, Estados Unidos.
- Base Carbone. (2014). Emisiones indirectas. Tomado el 22 de noviembre del 2014. Disponible en: <http://www.basecarbon.fr/docs/generale/index.html?incineration.htm>.
- Bernal, M. P., y Gondar, D. M. (2008). Producción y gestión de los residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. In *Compostaje* (Moreno, J y Moral, R., pp 11-41).
- Bernoux, M, Bockel, L, Giacomo, B, y Tinlot, M. (2010). Herramienta de cálculo del balance de carbono Ex ante (EX ACT) (Versión 3). Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Tomado de <http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/es/>
- Biomass Energy Center. (2009). *Wood as fuel. A guide to choosing and drying logs*.
- Briner, S., Hartmann, M., Finger, R., y Lehmann, B. (2012). Greenhouse gas mitigation and offset options for suckler cow farms: an economic comparison for the Swiss case. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change*, 17, 337-355. doi: 10.1007/s11027-011-9329-3

- Bueno, P., Díaz, M. J., y Cabrera, F. (2008). Factores que afectan el proceso de compostaje. In *Compostaje*. (Moreno, J., y Moral, R., pp 93-109).
- Burns, R. G., y Audus, L. J. (1970). Distribution and breakdown of paraquat in soil. *Weed Research*, 10, 49–58.
- Camacho, F. (2010). *Diseño y análisis técnico-financiero de un sistema agropecuario integral para el campus de la Universidad de Georgia en San Luis de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Universidad para la Cooperación Internacional.
- Carpio, I. (1992). *Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales*. (1° ed.). San José, CR: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- CATIE, y National Academy of Science. (1984). *Especies para leña. Arbustos y árboles para la producción de energía*. (Proyecto Leña y Fuentes Alternativas de Energía.). Turrialba, Costa Rica.
- CATIE. (2010). Determinación del balance de gases de efecto invernadero en fincas ganaderas de la Región Chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad.
- CCA. (2014). La quema de residuos agrícolas: Fuentes de dioxinas. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal, Canadá.
- Chacón, M. (2011). Aula Verde: la finca como escuela. *Biocenosis*, 25 (1-2), 1–4.
- Chacón, A. R., Montenegro, J., y Sasa, J. (2009). Inventario nacional de gases con efecto invernadero y absorción de carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005.
- Chao, K. J., Phillips, O., y Baker, T. (2008). Wood density and stock of coarse wood debris in a northwestern Amazonian landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 795–805. doi: 10.1139/X07-163.
- Chave, J., Réjou-Mecháin, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., ... Vieilledent. (2014). Improved allometric models to estimate aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20, 3177–3190. doi:10.1111/gcb.12629.

- Chazdon, R. L., y Montgomery, R. A. (2002). La adquisición de carbono en las plantas. In *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (Guariguata, M. R. y Kattan, G. H., pp. 225–250).
- Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., ... Yan, M. (2014). Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993–2007. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142, 231–237. doi:10.1016/j.agee.2011.05.012
- Chu, S. W., Gutiérrez-Espeleta, E. E. (2012). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 26 (2), 41-54.
- Clark, D., Clark, D., Brown, S., Oberbauer, S., y Veldkamp, E. (2002). Stock and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest and topography gradient. *Forest Ecology and Manage*, 164, 237–248.
- Cruzado-Blanco, L. A., y Flores-Negrón, C. F. (2010). Protocolo para la determinación de carbono en el suelo y en la biomasa vegetal aérea de los bosques de la concesión para conservación Alto Huayabamba: Versión 1.0. Asociación Amazónicas por la Amazonía - AMPA. Moyobamba, Perú. 55 p.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M., y Robledo C.W. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Espinosa-Solares, T., Bombardiere, J., Chatfield, M., Domaschko, M., Easter, M., Stafford, D. A., Castillo-Angeles, S., y Castellanos-Hernández, N. (2006). Macroscopic mass and energy balance of a pilot plant anaerobic bioreactor operated under thermophilic conditions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129-132, 959-968.
- Ferguson, R. S., Lovell, S. T. (2014). Permaculture to agroecology: design, movement, practice, and worldview. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 251-274.
- García-Fernández, R. A., y Sánchez, A. (2008). Control de emisión de gases y olores. In *Compostaje* (Moreno, J y Moral, R., pp 168-185).

- Gaviria, J., Mora, E., y Agudelo, J. (2002). Historia de los motores de combustión interna. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 26, 68–78.
- Gilbert, G. (2002). Interacciones entre microorganismos y plantas. In *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (Guariguata, M. R. y Kattan, G. H., pp. 435–463).
- Grignani, C., Zavattaro, L., Sacco, D., y Monaco, S. (2007). Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems. *European Journal of Agronomy*, 26, 442-453.
- Groot, J. C., Oomen, G. J. M., y Roosing, W. (2012). Multi - objective optimization and design of farming systems. *Agricultural Systems*, 110, 63-77.
- Gunderson, L., Holling, C. S., Pritchard, L., y Peterson, G. D. (2002). Resilience. In *Encyclopedia of Global Environmental Change, Volume 2 the Earth System: biological and ecological dimension of global environmental change*. (Munn, T., pp 530-531).
- Hernández, C. M. (2003). Plan de Manejo del Parque Nacional Tortuguero. Recopilación y análisis de información secundaria.
- Hidalgo, A. (2013). Guía Metodológica. Cálculo del inventario de gases de efecto invernadero de actividades y eventos corporativos. Programa ACCIÓN Clima-GIZ.
- Holdridge, L.R. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems*, 4, 390-405. doi: 10.1007/s10021-00 -0101-5
- Hug, M., Khatun, R., Hossen, M. S., Khan, M. B., Baten, M. A., Mano, M., y Miyata, A. (2007). Long - term carbon dioxide flux measurement at Bengal Lowland. *Asia Flux Newsletter*, 33, 13-15.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., y Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería de las Américas*, 45, 27-36.

- Kemanian, A. R., y Stöckle, C. L. (2010). C-Farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles. *European Agronomy Journal*, 32, 22-29.
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Preparado por el Programa de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, (Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., y Tanabe, K. (Eds)). Publicado por: IGES, Japón.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de Publicación)]. Ginebra, Suiza.
- INTE-ISO 14064-1, 2, 3: 2006. (2006). Gases de efecto invernadero- Parte 1, 2 y 3.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2009). Inventario nacional de emisión de gases con efecto invernadero y de absorción de carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005. Disponible en: http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventario_gases_efecto_invernadero.pdf
- Instituto Meteorológico Nacional. (2014). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Tomado 10/10, 2014, de http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/factoresemision-gei-2014_1.pdf.
- Lewandrowski, J. K., Peters, M., Jones, C., House, R., Sperow, M., Eve, M., y Paustian, K. (2004). Economics of Sequestering Carbon in the U.S. Agricultural Sector. *Economic Research Service. USDA. Technical Bulletin 1909*.
- Marín, F. (2013). *Diseño de una estrategia de implementación de un proceso de compostaje para el manejo de residuos sólidos urbanos orgánicos en la Municipalidad de Alvarado, Cartago, Costa Rica* (Tesis de Bachillerato). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- McDicken, K. G. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Project. Winrock International Institute for Agricultural Development.

- Mollison, B. (1997). Introducción a la permacultura. Disponible en: http://ploff.net/wp-content/uploads/2013/06/introduccion_a_la_permacultura_-_bill_mollison.pdf_parte_1.pdf
- Montoya, A. (2012). Programa Aula Verde: la finca como escuela. Sistematización Participativa del Programa de Gestión Local y Corredores Biológicos del Área de Conservación Tortuguero-ACTo. Proyecto “Removiendo Barreras para la Sostenibilidad del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Costa Rica”.
- Mora, V. (2009). Validación metodológica para alcanzar la carbono neutralidad en fincas integrales agropecuarias en Costa Rica. Dirección Huetar Atlántica. Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Moss, A. R., Jouany, J. P., y Newbold, J. (2000). Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie*, 49, 231-253.
- Moureaux, C., Bodson, B., y Aubinet, M. (2008). Mesure de flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures: état de la question et méthodologie. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 12 (3), 303-315.
- Najarro, T.T., y Samayoa, S. (2009). *Mecanismo de Desarrollo Limpio: Conceptos Básicos. Guía para la formulación y presentación de proyectos*. Comunica.
- Navarro, A. M. (2012). Evaluación participativa del aporte de fincas integrales a los servicios ecosistemáticos y a la calidad de vida de las familias en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica. (Tesis en Agricultura Ecológica). CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Nygren, P. (1995). *Carbon and nitrogen dynamics in Erythrina poeppigiana (Leguminosae: Phaseolae). Trees managed by periodic punning*. University of Helsinki, Department of Forest Ecology.
- Orozco, L., y Brumer, C. (2002). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central* (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)).

- Ortíz, E., Chazdon, R., y Vílchez, B. (2011). Línea base de estudio de la biodiversidad, servicios ambientales y valores para la conservación de bosques secundarios y maduros en el Corredor Biológico Osa.
- Ortíz, E. (2008). *Atlas digital de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.
- Pacala, S., y Soccolow, R. (2004). Stabilization Wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305: 968-972. doi: 10.1126/science.1100103.
- Pesticide Management Education Program. (1993). Paraquat. Pesticide Information Profile. Disponible en: <http://pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/metiram-propoxur/paraquat-ext.html>.
- Preston, T. R., y Leng, R. A. (1989). The greenhouse effect and its implications for world agriculture. The need for environmentally friendly development. *Livestock Research for Rural Development*. 1 (1). doi: <http://www.lrrd.org/lrrd1/1/preston.htm>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y Real, P. (1997). *Mensura Forestal* (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)).
- Quesada, R., Acosta, L., Garro, M., y Castillo, M. (2012). Dinámica del crecimiento del bosque húmedo tropical, 19 años después de la cosecha bajo cuatro sistemas de aprovechamiento forestal en la Península de Osa, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 25 (5), 56-66.
- Quinto, H. (2010). *Dinámica de la biomasa aérea en bosques primarios de Colombia y su relación con la precipitación y la altitud*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Restrepo, J. (2007). *El A, B, C de la agricultura orgánica y harina de rocas*. Managua, Nicaragua: SIMAS.
- Robert, M. (2002) Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Rodríguez, R., y Zúñiga, C. (2012). Composición y estructura horizontal de los remanentes boscosos de la Finca Agroecológica El Progreso en Las Colinas, Rita, Pococí, Limón.
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., y Porro R. (2009). *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales*. Primera edición. Lima, Perú. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF)/Consórcio Iniciativa Amazônica (IA).
- Schlegel, B., Gayoso, J., y Guerra, J. (2001). *Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial*. Proyecto FONDEF D9811076. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Serreze, M. (2009). Understanding Recent Climate Change. *Conservation Biology*, 24 (1): 10-17.
- Smith, S. J. (2014). Historical and future carbon emissions from croplands. *Earth System Dynamics Discussions*, 5, 1–27. doi:10.5194/esdd-5-1-2014.
- Solano, J. (2012). Acumulación de biomasa y carbono aéreo en cercas vivas de *Erythrina berteruana* (Poró) y *Erythrina fusca* (Elekelme), finca agroecológica El Progreso.
- Steel, R., y Torrie, J. (1989). *Bioestadística: principios y procedimientos*. México: McGraw-Hill.
- Stoessel, F., Juraske, R., Pfister, S., y Hellweg, S. (2012). Life Cycle Inventory and Carbon and Water Footprint of Fruits and Vegetables: Application to a Swiss Retailer. *Environmental Science and Technology*, 46, 3253–3262. doi:10.1021/es2030577.
- The Fertilizer Institute. (1980). *Manual de Fertilizantes*.
- Tres, D. R., y Reis, A. (2009). *Perspectivas sistêmicas para a conservação e restauração ambiental : do pontual ao contexto* (Herbário Barbosa Rodrigues).

- Ulate, C. A. (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- United States Agency for International Development. (2000). *Best practice guide: Monitoring, Evaluation, Reporting, Verification, and Certification of Climate Change Mitigation Projects*. Prepared by Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California.
- Vickery, M. L. (1991). *Ecología de plantas tropicales* (1^{ra} reimpresión.). México.
- Vílchez, B., Chazdon, R. L., y Milla, V. (2008). Dinámica de la regeneración en cuatro bosques secundarios tropicales de la región Huetar Norte, Costa Rica. Su valor para la conservación o uso comercial. *Recursos Naturales y Ambiente*, 55, 118-128.
- Vitousek, P. (1994). Beyond global warming: Ecology and Global Change. *Ecology*, 75 (7), 1861–1876.
- Wadsworth, F. H. (2000). *Producción Forestal en América Tropical*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal. Washington DC, Estados Unidos.

Este documento se puede citar como:

Gómez, M. (2014). *Emisiones de gases de efecto invernadero y biomasa aérea de cuatro fincas agroecológicas en el Área de Conservación Tortuguero, Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

8. Anexos

Anexo 1. Errores de muestreo de la finca PU.

| Estadístico calculado | Potrero | | | SAF | | | Reforestación | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ |
| Promedio | 30,17 | 54,25 | 5,43 | 78,29 | 140,79 | 14,08 | 88,99 | 77,66 | 7,77 |
| Desviación estándar | 9,29 | 16,70 | 1,67 | 48,41 | 87,05 | 8,71 | 82,12 | 79,76 | 7,98 |
| CV % | 30,79 | 30,79 | 30,79 | 61,83 | 61,83 | 61,83 | 92,27 | 102,70 | 102,70 |
| Error de muestreo | 14,59 | 26,24 | 2,62 | 39,90 | 71,75 | 7,17 | 65,13 | 63,26 | 6,33 |
| % Error | 48,37 | 48,37 | 48,37 | 50,96 | 50,96 | 50,96 | 73,18 | 81,45 | 81,45 |
| Li | 15,57 | 28,01 | 2,80 | 38,39 | 69,04 | 6,90 | 23,86 | 14,41 | 1,44 |
| Ls | 44,76 | 80,50 | 8,05 | 118,19 | 212,54 | 21,25 | 154,12 | 140,92 | 14,09 |
| Área muestr.(ha) | 2,23 | | | 0,18 | | | 0,08 | | |
| Área total (ha) | 3,89 | | | 0,86 | | | 1,2 | | |
| Intensidad (%) | 57,21 | | | 20,35 | | | 6,67 | | |

Anexo 2. Errores de muestreo de la finca GE.

| Estadístico calculado | SAF | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|
| | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ |
| Promedio | 29,61 | 53,26 | 5,33 |
| Desviación estándar | 35,29 | 63,46 | 6,35 |
| CV % | 119,17 | 119,17 | 119,17 |
| Error de muestreo | 34,96 | 62,86 | 6,29 |
| % Error | 118,04 | 118,04 | 118,04 |
| Li | -5,34 | -9,61 | -0,96 |
| Ls | 64,57 | 116,12 | 11,61 |
| Área muestr.(ha) | 0,15 | | |
| Área total (ha) | 1,39 | | |
| Intensidad (%) | 10,79 | | |

Anexo 3. Errores de muestreo de la finca AM.

| Estadístico calculado | SAF | | | Bosque secundario | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ | t Biom/ha | tCO ₂ e/ha | tCO ₂ e/ha/ñ |
| Promedio | 64,48 | 115,96 | 11,60 | 142,26 | 255,82 | 25,58 |
| Desviación estándar | 51,27 | 92,20 | 9,22 | 62,93 | 113,17 | 11,32 |
| CV % | 79,51 | 79,51 | 79,51 | 44,24 | 44,24 | 44,24 |
| Error de muestreo | 44,75 | 80,48 | 8,05 | 54,98 | 98,87 | 9,89 |
| % Error | 69,40 | 69,40 | 69,40 | 38,65 | 38,65 | 38,65 |
| Li | 19,73 | 35,48 | 3,55 | 87,28 | 156,96 | 15,70 |
| Ls | 109,23 | 196,44 | 19,64 | 197,24 | 354,69 | 35,47 |
| Área muestr.(ha) | 0,18 | | | 0,07 | | |
| Área total (ha) | 1,62 | | | 0,65 | | |
| Intensidad (%) | 10,80 | | | 10,77 | | |

Anexo 4. Errores de muestreo de la finca PR.

| Estadístico calculado | Árboles en potrero | | Bosque primario intervenido | | Bosque de galería | | Bosque secundario | |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| | t Biom./ha | tCO ₂ e/ha | t Biom./ha | tCO ₂ e/ha | t Biom./ha | tCO ₂ e/ha | t Biom./ha | tCO ₂ e/ha |
| Promedio | 39,85 | 71,66 | 232,38 | 417,50 | 255,38 | 458,82 | 184,79 | 332,00 |
| Desviación estándar | 19,84 | 35,68 | 47,23 | 84,85 | 99,47 | 178,71 | 26,07 | 46,85 |
| CV % | 49,79 | 49,79 | 20,32 | 20,32 | 38,95 | 38,95 | 14,11 | 14,11 |
| Error de muestreo | 47,85 | 86,05 | 57,69 | 103,63 | 878,90 | 344,04 | 231,47 | 90,19 |
| % Error | 120,07 | 120,07 | 34,19 | 24,82 | 476,37 | 74,98 | 179,30 | 27,17 |
| Li | -8,00 | -14,38 | 111,04 | 313,87 | -694,40 | 114,79 | -102,37 | 241,81 |
| Ls | 87,70 | 157,71 | 226,42 | 521,14 | 1063,40 | 802,86 | 360,57 | 422,19 |
| Área muestreada (ha) | 3 | | 0,5 | | 0,2 | | 0,2 | |
| Área total (ha) | 52,65 | | 15,495 | | 6,086 | | 8,403 | |
| Intensidad (%) | 5,70 | | 3,23 | | 3,29 | | 2,38 | |