

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Bibliotecas Bucaramanga
Universidad Santo Tomás

**Valoración Comparativa de la Captura de Carbono Orgánico en Sistemas Agroforestales
(Café + Madera) y su Relación con la Rentabilidad Productiva del Cultivo en dos
Municipios del Departamento de Santander.**

Carolina Hernández Contreras

Trabajo de grado para optar el título de
Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Director del Proyecto

Carlos Alberto Amaya Corredor

Ingeniero MsC Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

MsC Gestión y Auditorías Ambientales

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

2016

Dedicatoria

A Dios, quien me guío por el buen camino, por darme la fuerza para seguir adelante y no desfallecer en los momentos difíciles que se presentaron, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la esperanza.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por ser la fuerza que me impulsa a seguir adelante para ser cada día mejor persona y profesional.

Los amo con mi vida.

Agradecimientos

A Dios por protegerme durante todo mi camino y darme la fuerza para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

Al Ingeniero Carlos Alberto Amaya Corredor por darme la idea en la que se basó éste proyecto y su dedicación, aporte y apoyo para concluir este proyecto.

Al Ingeniero Ricardo Andrés Oviedo, por sus aportes contribuyeron a concluir satisfactoriamente este proyecto.

Finalmente, a la Universidad Santo Tomas, por contribuir en nuestra formación, así como a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta.

Lista de contenido

<u>RESUMEN</u>	<u>15</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>17</u>
<u>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</u>	<u>18</u>
<u>2. JUSTIFICACIÓN</u>	<u>21</u>
<u>3. OBJETIVOS</u>	<u>24</u>
3.1 OBJETIVO GENERAL	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
<u>4. MARCO REFERENCIAL</u>	<u>25</u>
4.1 MARCO TEÓRICO	25
4.1.1 EL EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	27
4.1.2 CAMBIO CLIMÁTICO	29
4.1.3 CICLO DEL GAS CARBÓNICO	32
4.1.4 PROTOCOLO DE KYOTO	33
4.1.5 REUNIÓN DE COPENHAGUE	34
4.1.6 COP 21 CUMBRE DE LA TIERRA	35
4.1.7 SISTEMAS AGROFORESTALES	36
4.1.8 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS O AMBIENTALES DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES	41
4.1.8.1 Reducción de la erosión y protección de la fertilidad de los suelos.	44
4.1.8.2 Acumulación de agua en cantidad y calidad.	44

CAPTURA DE CARBONO ORGÁNICO EN SISTEMAS AGROFORESTALES	6
4.1.8.3 Gestión de la diversidad biológica	45
4.18.4 Captura de carbono y reducción de gases efecto invernadero	46
4.1.9 SISTEMAS AGROFORESTALES Y CAPTURA DE CARBONO	47
4.1.10 VALORACIÓN Y RENTABILIDAD DE ARREGLOS AGROFORESTALES CAFÉ MADERA	52
4.1.10.1 Costos de producción, comercialización e ingresos del café.	53
4.1.10.2 Ingresos económicos por el servicio ambiental o ecosistémicos de captura de carbono.	55
5. DISEÑO METODOLÓGICO	58
5.1. ÁREA DE ESTUDIO	58
5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	59
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
6.1 CONDICIONES DASOMÉTRICAS QUE CARACTERIZAN CADA CULTIVO AGROFORESTAL SELECCIONADO Y SOPORTAN SU CAPACIDAD DE PRODUCTIVIDAD	62
6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE BIOMASA AÉREA DE LAS ESPECIES FORESTALES	68
6.3 CARACTERIZACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBÓN ORGÁNICO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN ESTUDIO, A PARTIR DE LA CONFIGURACIÓN PARTICULAR DE CADA CULTIVO.	72
6.4 INCIDENCIA DE LA CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO ₂ SOBRE LA RENTABILIDAD COMERCIAL DEL ARREGLO AGROFORESTAL	81
CONCLUSIONES	87
DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS	90
BIBLIOGRAFÍA	91

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Ecuación alométrica recomendada para el cálculo de biomasa en bosques naturales ...</i>	61
Tabla 2 <i>Valores de la Densidad de las plantas de Café (Coffe arábica L. Variedad Castilla) y Especies Forestales en la Finca La Pradera del Municipio de Aratoca y finca El Prado del Municipio de Zapátoca, Santander.</i>	65
Tabla 3 <i>Datos de biomasa aérea y carbono orgánico de Coffea arábica L. para la finca La Pradera del Municipio de Aratoca y la finca El prado para el Municipio de Zapátoca.</i>	73
Tabla 4 <i>Cálculos de biomasa y carbono orgánico para los árboles de sombra de la finca La Pradera del Municipio de Aratoca.....</i>	74
Tabla 5 <i>Sumatoria de los valores obtenidos para la finca La Pradera del Municipio de Aratoca.</i>	79
Tabla 6 <i>Sumatoria de los valores obtenidos para la finca El Prado del Municipio de Zapátoca.</i>	80
Tabla 7 <i>Precio indicativo por grupo OIC para el mes de septiembre 2016</i>	82
Tabla 8 <i>Valores Comerciales de Ingreso económica para cada especie maderable del SAF, de la Finca La Pradera del Municipio de Aratoca, Santander.....</i>	83
Tabla 9 <i>Valores Comerciales de Ingreso económica para cada especie maderable del SAF, de la Finca El Prado del Municipio de Zapátoca, Santander.</i>	84
Tabla 10 <i>Valor de comercialización de unidad de producción que se estimas para cada uno de los tres aspectos cuantificados en el SAF.</i>	85
Tabla 11 <i>Valor de comercialización de unidad de producción que se estimas para cada uno de los tres aspectos cuantificados en el SAF de las fincas La Pradera y El Prado.</i>	86

Lista de Figuras

<i>Figura 1</i> Sistema agroforestal seleccionado en la finca La Pradera (Izquierda) y sistema agroforestal seleccionado en la finca El Prado (Derecha).....	63
<i>Figura 2</i> Georreferenciación de los lotes en las fincas de estudio La Pradera (Izquierda) y El Prado (Derecha).....	63
<i>Figura 3</i> Correlación de DAP vs Biomasa de <i>Coffea arábica</i> L. de la finca la Pradera Municipio de Aratoca (Izquierda) y finca El Prado del Municipio de Zapátoca (Derecha), Santander.	67
<i>Figura 4</i> Correlación de DAP vs Biomasa de las especies forestales que se encontraron en la finca la Pradera Municipio de Aratoca, Santander (a) <i>Albizia Carbonaria</i> (b) <i>Brunellia comocladifolia</i> (c) <i>Cassia grandis</i> (d) <i>Cedrela odorata</i> (e) <i>Erythrina poeppigiana</i> (f) <i>Inga codonantha</i> (g) <i>Ochroma pyramide</i> (h) <i>Ricinus communis</i> (i) <i>Pinus patula</i>	69
<i>Figura 5</i> Correlación de DAP vs Biomasa de las especies forestales de la finca El Prado Municipio de Zapátoca, Santander (a) <i>Leucaena leucocephala</i> (b) <i>Persea americana</i> (c) <i>Erythrina edulis</i> (d) <i>Pithecellobium dulce</i> (e) <i>Inga edulis</i> (f) <i>Tabebuia rosea</i> (g) <i>Erythrina poeppigiana</i> (h) <i>Cordia alliodora</i> (i) <i>Salix humboldtiana</i> (j) <i>Cedrela odorata</i>	70
<i>Figura 6.</i> Datos de Biomasa y Carbono orgánico por especie de los árboles de sombra (a) Finca la Pradera (b) Finca el Prado.....	77
<i>Figura 7</i> Equivalencia porcentual por especie forestal para la finca La Pradera del Municipios de Aratoca.	78
<i>Figura 8</i> Equivalencia porcentual por especie forestal para la finca El Prado del Municipio de Zapatoca.	78

Glosario

Adaptación Al Cambio Climático: La adaptación al cambio climático se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. (IPCC, 2001)

Alometría: Medición y estudio de los cambios que se producen en las proporciones de varias partes de un organismo, en relación al crecimiento del conjunto, o dentro de una serie de organismos relacionados. (McMahon, 1975)

Biosfera: Parte del sistema Tierra que abarca todos los ecosistemas y organismos vivos de la atmosfera, de la tierra firme (biosfera terrestre) o de los océanos (biosfera marina), incluida la materia orgánica muerta resultante de ellos, en particular los restos, la materia orgánica del suelo y los detritus oceánicos. (IPCC, 2013)

Biomasa: La cantidad de masa seca total almacenada en materia orgánica viviente. (Angelsen, 2008)

Cambio Climático: Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de

la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. Véanse también Cambio climático asegurado y Detección y atribución. (IPCC, 2013)

Captura De Carbono: Proceso de retirar carbono de la atmósfera y depositarlo en un sumidero a largo plazo, como un océano o ecosistemas terrestres, mediante procesos físicos o biológicos tales como la fotosíntesis (Angelsen, 2008).

Certificado de Reducción de Emisiones (CER por sus siglas en inglés): El termino técnico para el resultado de los proyectos llevados a cabo en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Un CER es una unidad de reducciones de gases de efecto invernadero (GEI) que ha sido generada y certificada bajo las estipulaciones del Artículo 12 del Protocolo de Kioto, el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Un CER equivale a una tonelada de carbono. Existen dos tipos de CER que son otorgados por las remociones de emisiones netas de los proyectos de forestación o reforestación: (i) CER temporales (Temporary Certified Emission Reduction, tCER por su siglas en inglés) y (ii) CER de largo plazo (Insured Certified Emissions Reductions, ICER por sus siglas en inglés). (Angelsen, 2008)

Ciclo del carbono: Término utilizado para describir el flujo del carbono (en diversas formas; por ejemplo, como dióxido de carbono) en la atmosfera, los océanos, la biosfera terrestre y la litosfera. (IPCC, 2013)

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): Fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y rubricada ese mismo año en la Cumbre para la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, por más de 150 países más la Comunidad Europea. Su objetivo último es “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático”. Contiene cláusulas que comprometen a todas las Partes. En virtud de la Convención, las Partes incluidas en el anexo I (todos los países de la OCDE y países de economía en transición) se proponen retornar, para el año 2000, a los niveles de emisión de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal que existían en 1990. La Convención entró en vigor en marzo de 1994. En 1997 la CMNUCC incorporó el Protocolo de Kyoto. (IPCC, 2013)

Costos de producción: también llamados costos de operación, son los gastos necesarios para mantener un proyecto, línea de procesamiento o un equipo en funcionamiento, indica el beneficio bruto. (Torres, S. A. 1996.)

Deforestación: La FAO define la deforestación como ‘la conversión de bosque a otros usos de la tierra o la reducción a largo plazo de la cobertura forestal (cobertura de copa) por debajo del límite mínimo del 10 por ciento’. Las definiciones también estipulan la altura mínima de los árboles (FAO: 5 m *in situ*) y una superficie mínima (FAO: 0,5 ha), y que la agricultura no domine el uso del suelo. Sin embargo, las definiciones de cobertura de copa (forestal), altura y área mínimas varían según el país. (Angelsen, 2008)

Desarrollo sostenible: Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades. (Ley general ambiental de Colombia, 1993)

Degradación: Cambios en el bosque que afectan negativamente la estructura o función del sitio o área forestal, y por lo tanto disminuyen la capacidad del bosque de suministrar productos o servicios. En el contexto de un mecanismo REDD, la degradación forestal resulta en una pérdida neta de carbono del ecosistema. Una manera de medir la degradación es calcular la reducción en las reservas de carbono por unidad de área (por ejemplo, hectárea). (Angelsen, 2008)

Ecosistema: Sistema constituido por organismos vivos que interactúan entre sí y con su entorno físico. Los límites atribuibles a un ecosistema son en cierta medida arbitrarios, y dependen del aspecto considerado o estudiado. Así, un ecosistema puede abarcar desde escalas espaciales muy pequeñas hasta la totalidad del planeta Tierra. (IPCC, 2013)

GEI: Los Gases Efecto Invernadero son los gases que al acumularse de forma excesiva en la atmósfera conforman una especie de capa que hace que el calor se acumule en la Tierra haciendo que aumenten las temperaturas globales. Se llaman efecto invernadero, ya que su efecto es similar al que tienen los invernaderos de plantas. (IPCC, 2013)

Mecanismo de Desarrollo Limpio: Instrumento del Protocolo de Kyoto cuyo propósito es ayudar a los países desarrollados (Anexo I) a dar cumplimiento a sus compromisos de reducción de emisiones. El mecanismo permite que las partes incluidas en el Anexo I que financian y desarrollan proyectos que reducen las emisiones en países en desarrollo (No Anexo I) obtengan créditos que pueden ser utilizados para satisfacer sus propios compromisos de reducción de emisiones. El MDL no sólo tiene como objetivo reducir las emisiones o incrementar los sumideros, sino también contribuir al desarrollo sostenible en los países en vías de desarrollo. (Angelsen, 2008)

Mitigación: Acciones que previenen la acumulación adicional de GEI en la atmósfera reduciendo los montos emitidos o incrementando el almacenamiento de carbono en sumideros. (Angelsen, 2008)

Países Anexo I y Países No-Anexo I: La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) divide los países en dos grupos principales: países industrializados (conocidos como países del Anexo I) y países en vías de desarrollo (referidos como Países No-Anexo I). Conforme al principio de la responsabilidad común pero diferenciada, los países del Anexo I tienen mayores responsabilidades en lo relativo a problemas, opciones y consecuencias, a la implementación y reporte de políticas y la mayor parte de los mismos tienen compromisos de reducción de emisiones en el Protocolo de Kyoto. (Angelsen, 2008)

Pagos por servicios ambientales, PSA: Un sistema de PSA es una transacción voluntaria, donde un SA bien definido (o un uso de la tierra que aseguraría ese servicio) es ‘comprado’ por al menos un comprador de SA a por lo menos un proveedor de SA sólo si el proveedor asegura la provisión del SA transado (condicionamiento). (Sven Wunder, 2005)

Plan Nacional de Desarrollo: Documento de política, adoptado mediante una ley, que define los lineamientos a nivel de objetivos, estrategias, acciones, presupuesto y metas, que debe desarrollar cada Gobierno, para alcanzar el desarrollo social y económico del país. (Minambiente, 2012)

Protocolo de Kyoto: El Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptado en 1997 en Kyoto, Japón, en el tercer período de sesiones de la Conferencia de las Partes (CP) de la CMNUCC. Contiene compromisos jurídicamente vinculantes, que vienen a sumarse a los contenidos en la CMNUCC. Los países señalados en el anexo B del Protocolo (la mayoría de los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, y los países de economía en transición) acordaron reducir, entre 2008 y 2012, sus emisiones antropógenos de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre) en un 5% como mínimo respecto de los niveles de 1990. El Protocolo de Kyoto entró en vigor el 16 de febrero de 2005. (IPCC, 2013)

R.E.D.D Reducción de emisiones derivadas de la deforestación y degradación forestal (REDD): Se refiere a los mecanismos que están siendo negociados en la actualidad en el seno del CMNUCC para reducir las emisiones provenientes de la deforestación y degradación forestal. REDD puede referirse a una amplia gama de enfoques y acciones para alcanzar dicho objetivo pero la idea principal es crear mecanismos basados en el desempeño que recompensen a proyectos o países que reducen sus emisiones de carbono. (Angelsen, 2008).

Rentabilidad del cultivo: Capacidad de generar ingresos. Se mide en términos de beneficios obtenidos durante cierto período con respecto al capital empleado.

Sumidero de carbono: Un depósito que absorbe o secuestra carbono emitido por otros componentes del ciclo del carbono. (Angelsen, 2008).

Sistema agroforestal: conjunto de elementos o entidades que guardan estrechas relaciones entre si y que mantienen al sistema directa o indirectamente unido, de modo más o menos estable, cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Vidal, 2007).

Resumen

El siguiente estudio investigativo tiene como objeto evaluar el efecto de la captura de carbono, sobre la rentabilidad de la productividad, de los sistemas agroforestales (café- maderables) seleccionados. Para realizarlo se establecieron las condiciones dasométricas que caracterizan cada cultivo, así como se caracterizó la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en los sistemas agroforestales de 5 años de edad a partir de protocolos ya establecidos por Yepes *et al* (2011), y por último se estableció las condiciones de rentabilidad de un cultivo agroforestal, a partir de su capacidad de captación de carbono, como valor agregado a su condiciones de mercado teniendo en cuenta las condiciones físico bióticas del sistema Agroforestal, su capacidad de servicios ambientales, su valoración y posible influencia en el valor de comercialización de los productos generados en el cultivo agroforestal. Como resultado el valor total de captura de carbono a través del SAF evaluado corresponde a 99,72 toneladas por hectárea, del cual el 8,28% corresponde a la captura realizada por las plantas de café y el 91,72% restante a las especies

forestales encargadas de proporcionar sombra correspondiente a la finca La Pradera; así como para la finca El Prado el valor total de captura de carbono es 2,94 toneladas por hectárea el cual sería el 50,34% por captura realizada por plantas de café y el 49,66% restante corresponderá a las especies forestales. Por último se tiene en cuenta el ingreso económico posible para un cultivador de café orgánico en técnica de sombrío, lo debe constituir, el ingreso económico por venta del café, así como el ingreso económico posible de la comercialización de la madera de sombrío, más la posibilidad económica de comercialización de carbono capturado en la biomasa total del SAF.

Palabras Clave: Sistemas agroforestales, captura de carbono, servicios ambientales, café

Abstract

The objective of this study is to evaluate the effect of carbon sequestration on the productivity of selected agroforestry (coffee-growing) systems. In order to do so, we established the standard conditions that characterize each crop, as well as characterizing the storage capacity of organic carbon in the 5-year-old agroforestry systems based on protocols already established by Yepes et al (2011), and finally Established the conditions of profitability of an agroforestry crop, based on its carbon capture capacity, as value added to its market conditions taking into account the biotic physical conditions of the Agroforestry system, its capacity for environmental services, its valuation and possible influence In the marketing value of the products generated in the agroforestry crop. As a result, the total value of carbon capture through the agroforestry systems evaluated corresponds to 99.72 tons per hectare, of which 8.28% corresponds to the catch made by the coffee plants and the remaining 91.72% to the species Forestry responsible for providing shade corresponding to the La Pradera farm; As well as for the El Prado farm, the total value of carbon

capture is 2.94 tons per hectare, which would be 50.34% per harvest by coffee plants and the remaining 49.66% will correspond to forest species. Lastly, the possible economic income for an organic coffee grower in a shady technique must be taken into account, the economic income from the sale of coffee, plus the possible economic income from the marketing of shade wood, plus the possibility Economic impact of carbon trading captured on the total biomass of the agroforestry systems.

Keywords: Agroforestry systems, carbon sequestration, environmental services, coffee

Introducción

El cambio climático es generado por las actividades llamadas impulsadoras de desarrollo que emana gases a la atmósfera, alterando su composición por encima de su capacidad de recuperación, esto implica alteraciones ecológicas y ambientales como el calentamiento global, el efecto invernadero y la presencia de gases que atrapan calor, lo cual degrada los ecosistemas, la naturaleza y hace ineficientes los procesos de producción.

En el marco del protocolo de Kioto se desarrolló el proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio que resaltan la importancia de plantaciones agroforestales y forestales con fines de captura de carbono. Diseñado para promover la inversión en proyectos que capturen o disminuyan las emisiones de GEI en países en vía de desarrollo, por medio de la forestación y reforestación. Es así como este mecanismo es uno de los que promueven las alianzas entre países desarrollados y en vía de desarrollo, de esta manera estas naciones colaboran a mitigar la acumulación de GEI. Las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales son una opción realista para incrementar el secuestro de carbono de agroecosistemas en biomasa y materia orgánica.

Los sistemas agroforestales representan importantes sumideros de carbono, que nos ayudaría a la mitigación de este efecto; Sin embargo, en Colombia no han sido considerados en este sentido, debido fundamentalmente a la ausencia de información cuantificada sobre su potencialidad de almacenamiento y fijación de gases efecto invernadero. Además, la captura de carbono en cultivos, como el café, se presenta como una estrategia para combatir la pobreza rural, ya que el potencial de comercialización de servicios ambientales puede ser un valor económico agregado significativo para el productor y representativo en lo regional y global.

La presente investigación busca estimar la biomasa aérea de las especies arbóreas y arbustivas, por medio de la medición de variables dasométricas, en cada uno de los sistemas agroforestales localizados en las áreas objeto de estudio, cuantificar el carbón orgánico almacenado en la biomasa aérea, mediante el empleo de la ecuación alométrica propuesta por Yepes *et al.*, (2011), para la región tropical y evaluar el efecto de la captura de carbono, sobre la rentabilidad en la productividad, de varios sistemas agroforestales (café-madera) seleccionados del departamento de Santander.

Con esto último se buscará establecer una valoración de pagos por servicios ambientales del cultivo agroforestal, que explique la obtención de una ganancia económica adicional a la reconocida por condiciones de mercado del producto del cultivo, por su contribución a la reducción de emisiones por deforestación y degradación de los ecosistemas.

1. Planteamiento Del Problema

El debate sobre la acumulación atmosférica de gases de efecto invernadero y su papel en el calentamiento global culminó en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1997, en Kyoto, Japón, presentando como principal logro la firma de un

protocolo instando a los países participantes para encontrar formas de reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Por esta razón las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), acordaron en 2005 (COP11) poner en marcha una iniciativa que busca mitigar las emisiones potenciales de GEI generadas por los procesos de degradación y deforestación, con el fin de conservar y gestionar sosteniblemente los bosques y aumentar las reservas forestales de carbono en los países en desarrollo. Dicha iniciativa recibe el nombre de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD). Las naciones que la implementen, no solo ayudarán a reducir las emisiones de GEI a la atmósfera, sino que también obtendrán recursos por la venta de Certificados de Emisiones Reducidas (CERs).

A partir del protocolo de Kyoto, se establecieron compromisos vinculantes de reducción de las emisiones de los GEI por parte de los países industrializados, empleando el mecanismo de flexibilidad existente; siendo uno de ellos el proyecto llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que a través de los cuales se podrían incentivar las plantaciones agroforestales y forestales con fines de captura de carbono

Uno de los objetivos de la política medioambiental a nivel mundial para abordar el cambio climático es el enfoque bajo el costo relativo por captura de carbono. La agroforestería es uno de los enfoques que se están promoviendo actualmente para abordar el cambio climático a través de la conservación de carbono en el componente leñoso y el suelo.

La agroforestería es una opción adecuada para el secuestro de carbono ya que bajo este sistema de uso de la tierra la mayor parte de la tierra queda disponible para la producción de otros cultivos

(Nair, 2009) y esto es importante para la seguridad alimentaria y la mejora de los ingresos familiares (Schoeneberger, 2009).

A pesar de los estudios que demuestran el potencial de la agroforestería en el secuestro de carbono (Schoeneberger, 2009; Pandey, 2002), las estimaciones de la cantidad de carbono secuestrado en los sistemas agroforestales específicos son escasos debido a la variabilidad del suelo, limitaciones y complejidad de los sistemas agroforestales.

Estos Agroecosistemas juegan un papel central en el ciclo global del carbono y contienen aproximadamente 12% del carbono terrestre en el mundo (Albrecht y Kandji, 2003).

Los primeros estudios realizados en el cálculo de captura de carbono almacenado en la parte de la biomasa aérea de los árboles de sombra en asocio con plantaciones de café y cacao por Kursten y Burschel (1993), arrojaron datos cerca de 14 a 52 t.ha⁻¹ de carbono (C). Comparados con cultivos anuales, estos sistemas agroforestales almacenan carbono adicional, entre 10 y 50 t.ha⁻¹, en la capa vegetal y la materia orgánica depositada en el suelo.

En la zona cafetera colombiana, la necesidad de suplir los requerimientos energéticos y de materias primas (maderas) ha ocasionado que el mayor porcentaje de las emisiones se deba a cambios en el uso del suelo por la deforestación. Históricamente, parte de los excedentes de la fijación del carbono en los órganos no cosechables del sistema de producción cafetera, principalmente los tallos, han sido utilizados para la producción de carbón, el cual suple en parte las necesidades de energía (Farfán, 2014).

Si bien la agroforestería, pueden ser una forma de uso del suelo, eficiente para la captura de GEI, esta requiere ser atractiva socioeconómicamente, esto es, demostrar valores agregados a los tradicionales con los que la población se interese por el desarrollo de procesos agroforestales. Esto puede lograrse si a la agroforestería se le identifique una valoración económica desde dos fuentes de valor, uno, la representación comercial, socialmente aceptada de la producción de un cultivo

agroforestal, éste visto como un bien satisfactorio de una necesidad social y humana; y dos, valorar la captación de carbono del sistema agroforestales, entendiendo esta captura como un servicio ambiental, que por consiguiente, debe ser cuantificado y reconocido, para que su peso económico le permitan hacer visible su importancia social y ambiental.

En Colombia son muy pocos los estudios que han sido realizados sobre este tema por ello se deben tomar cuestionamientos que direccionen un proceso investigativo, a la construcción de soluciones, bajo la idea de Cuál es el nivel de influencia de la capacidad de captura de carbono de los sistemas agroforestales en la rentabilidad económica que puede generar el cultivo, teniendo en cuenta las condiciones de mercado y los pagos por servicios ambientales.

2. Justificación

Actualmente el consenso mundial es más fuerte sobre el calentamiento global y su relación con los procesos antrópicos, en particular promovidos en el último siglo. Aunque los compromisos e intereses en la búsqueda de alternativas entre los gobiernos no se han consolidado, en especial con las potencias responsables por las mayores emisiones de gases efecto invernadero, lo cierto es que los impactos ambientales ya son un hecho y su agravamiento y consecuencias en los próximos años, es conocido.

La reforestación y el manejo de la regeneración natural de árboles en los campos agrícolas podrían utilizarse para fijar carbono atmosférico, producir madera y otros servicios arbóreos de utilidad para el consumo o comercialización y, al mismo tiempo, contribuir a la mitigación del cambio climático y recibir un pago por este servicio ambiental.

Los sistemas forestales y agroforestales (SAF) pueden funcionar como sumideros de CO₂, almacenan en promedio 95 Mg C·ha⁻¹ en zonas tropicales (Pandey, 2002), para un total de 2,1

billones de Mg C por año en estas áreas (Dixon, 1995). Sin embargo, hay pocos estudios de estimación de C en la parte subterránea (raíces y suelo), mantillo y árboles muertos debido a la complejidad de los sistemas (Oelbermann, 2007), pero hay un estudio realizado en Bosque Secundario que reportan un valor de 24, 3Mg C ha⁻¹ para biomasa del suelo. (Mena, Andrade & Navarro, 2011)

Acosta y Esquivel reportaron que los sistemas agrícolas pueden almacenar entre 86 y 124Mg C·ha⁻¹. El sistema de barbecho natural puede almacenar entre 14 y 191 Mg C·ha⁻¹ en dos y 25 años, (Brown, 2002; Callo-Concha et al., 2002; Acosta, 2003) y el barbecho enriquecido hasta 60 Mg C·ha⁻¹ en cinco años (Esquivel, 2005).

Para poder determinar el pago de servicios ambientales por secuestro de carbono en sistemas agroforestales, es necesario en primera instancia, hacer una estimación de la cantidad de carbono que puede almacenar el componente arbóreo, ya que generalmente tiene mayor cantidad de biomasa dentro de estos sistemas (Kotto-Same, et al., 1997). Esto permitiría tener las bases para así calcular los pagos por servicios ambientales a los productores que implementen sistemas agroforestales.

Casanova-Lugo describe que a pesar de las diversas modalidades de los sistemas agroforestales que se practican a nivel mundial, su aplicación es más extendida en los trópicos (Medina, 1998). Aproximadamente el 20% de la población mundial (1,200 millones de personas), dependen directamente de los productos agroforestales y de sus servicios en los países en desarrollo (Schoeneberger, 2009). Dada su importancia y uso generalizado, una cuestión importante que debe abordarse es si la agroforestería aplicada pudiera satisfacer las demandas locales, además de promover la captura y almacenamiento de carbono, para obtener beneficios económicos, y ayudar a mitigar la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Casanova-Lugo, 2011).

Estos sistemas pueden mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos. En efecto, la agroforestería fomenta prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes, contribuyendo a almacenar carbono a largo plazo (Casanova-Lugo, 2011).

La captura de carbono en el cultivo del café se presenta como una estrategia para combatir la pobreza rural, ya que el potencial de comercialización de servicios ambientales se hace visible a nivel local y global.

Las investigaciones de los sistemas agroforestales con café son pertinentes en el contexto actual, puesto que un porcentaje considerable de la producción cafetera de varios países de Centro América y Latino América se maneja bajo sombra, con intensidades que van desde muy poco hasta un sombrío excesivo.

En Costa Rica se desarrolló un estudio donde se estimó el carbono almacenado en SAF café (*Coffea arabica*), laurel (*Cordia alliodora*) y café-poró (*Erithryna poeppigiana*) y en bosques secundarios ubicados en tres alturas diferentes. Durante este estudio se encontraron varios resultados, que el carbono almacenado en la biomasa total fue en promedio de 69,4 Mg C ha⁻¹ (Brown, 2002).

En otro estudio realizado en Perú se determinó la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de la tierra, con la finalidad de conocer el potencial de captura de carbono. Encontrándose en el sistema de café-guaba que es un sistema de cuatro años valores de 80,16t C ha⁻¹ observándose la importancia del establecimiento de estos sistemas para la recuperación del potencial de captura de carbono en áreas anteriormente perturbadas por tumba y quema, y usados para agricultura (Callo-Concha, et al., 2002)

Actualmente en Santander no se cuenta con estudios de cuantificación del contenido de carbono en la biomasa aérea, ni de la biomasa del suelo especialmente en sistemas agroforestales donde al

combinar los cultivos o frutales con especies forestales incrementan sus niveles de captura de carbono, mejorando además su productividad

Sobre esta base investigativa, el presente trabajo busca identificar dentro del sistema agroforestal café madera en Santander, la eficiencia en el secuestro de carbono, como servicio ambiental, potencialmente valorizable como ingresos económicos a favor del cultivador primario, desde el cual la especial atención se centra en la comercialización del café, pero genera variables ambientales no reconocidas, las cuales pueden llegar a generar un valor económico por la fijación y almacenamiento de carbono, sobre la rentabilidad en la productividad de los sistemas agroforestales seleccionados en el departamento de Santander.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la captura de carbono, sobre la rentabilidad de la productividad, de los sistemas agroforestales seleccionados.

3.2 Objetivos Específicos

Establecer las condiciones dasométricas que caracterizan cada cultivo agroforestal seleccionado y que soportan su capacidad de productividad

Caracterizar la capacidad de almacenamiento de carbón orgánico en los sistemas agroforestales en estudio, a partir de la configuración particular de cada cultivo.

Establecer las condiciones de rentabilidad de un cultivo agroforestal, a partir de su capacidad de captación de carbono, como valor agregado a su condiciones de mercado

4. Marco Referencial

4.1 Marco teórico

Tres hechos han determinado las trasformaciones ambientales que condicionan el entorno mundial, uno el cambio de costumbres nómadas a sedentarios, donde se estableció las presiones por recursos en los sitios escogidos por las primeras comunidades para asentarse; dos, el desarrollo de la agricultura, donde aumentó la presión sobre el suelo y el agua, fundamentalmente, para potenciar las capacidades productivas de la naturaleza y proveer al hombre de todo recurso para satisfacer sus necesidades; tres el proceso de industrialización posguerra del siglo XIX, donde se realizó la toma más grande y acelerada de recursos naturales para ser trasformados en todo elemento al servicio de la reconstrucción de los países y continentes devastados por las guerras sociales de ese siglo.

El primer y segundo hecho no dejan evidenciar inmediatamente su condonante sobre trasformaciones atmosféricas en el mundo y se necesitaría centrar un análisis en como las practicas nómadas y la masificación de la agricultura generan las afectaciones sobre la atmosfera. No se desconoce su influencia, pero se deja de lado su análisis.

El tercer hecho es el más trascendental y permanente en la influencia de gases atmosféricos al entorno mundial actual y futuro, ya que todos los procesos industriales generan emanaciones liquidas y gaseosas que alteran, afectan y cambian la composición de la atmosfera mundial;

además, generan residuos de todas las condiciones, desde ordinarios cotidianos, hasta complejos derivados industriales no gestionados.

Durante siglos, los humanos pudieron satisfacer sus necesidades básicas a través de la explotación de los recursos naturales de manera “artesanal”, sin causar daños negativos considerables al medio ambiente. En el siglo XVIII la humanidad experimentó grandes cambios, como el de la llamada “revolución industrial”, desde entonces fue evidente la contaminación atmosférica a gran escala.

En el siglo XIX en los años 50, los países industrializados aumentaron el requerimiento de petróleo y gas natural. Los científicos de la época iniciaron estudios acerca de la disminución de los glaciares y el posible aumento de la temperatura del planeta. A raíz de esta situación y de la preocupación que trajo consigo, las Naciones Unidas propiciaron una serie de negociaciones y acuerdos que tenían como fin reducir las emisiones de GEI, los cuales han sido los causantes directos del cambio climático. (Ciesla, 1996)

En 1972 durante la conferencia de Estocolmo se creó más conciencia ambiental, se tenía claro que la contaminación atmosférica, dependía, casi totalmente de los países industrializados, pero también estaba directamente relacionada con las decisiones tomadas por los países pobres en ese entonces, traería consecuencias a futuro, así que fue una realidad el hecho de admitir, que salvar el planeta era un trabajo de todos los países y no solo de los industrializados, racionamiento que se tomó muy en cuenta en 1992 durante la Cumbre de la Tierra realizada en Río de Janeiro que trató el tema de los diferentes cambios climáticos que se venían presentando en las últimas décadas alrededor del mundo, allí se creó el tratado internacional “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, CMNUCC. (United Nations Framework Convention on Climate Change ,2014). A partir de este, se tiene como la más reciente conclusión y la apuesta mundial por

controlar los procesos ambientales degradatorios, la reciente cumbre mundial COP21 París 2015. (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2015)

4.1.1 El efecto invernadero y el cambio climático

El efecto invernadero, entendiéndose como la acumulación de temperatura en el globo terrestre, puede explicarse, bajo el mismo principio, desde dos causas, la primera, a partir de causas naturales que posibilitan la vida, la segunda, los cambios antrópicos que aumentan el efecto y cambios dentro del globo terrestre.

El efecto invernadero natural, culpable de la vida dentro del planeta, se debe al equilibrio natural de la tierra, entre la energía solar recibida y reflejada. Esta energía proveniente del sol, penetra la atmosfera terrestre, solo con un 70% de la emitida, el otro 30% es devuelto al espacio. Por equilibrios naturales, la energía que atraviesa la atmosfera, debe ser rebotada hacia el espacio (ingreso=salida, sería la situación física ideal de equilibrio), pero la energía rebotada no logra traspasar la capa de gases atmosféricos naturales, que rodean la tierra, y por consiguiente, esta energía es nuevamente rebotada hacia dentro de la atmosfera terrestre. Si este fenómeno natural de movilidad de la energía, no tuviera lugar, la tierra sería demasiado fría como para albergar vida alguna. (Echarri, 1998)

Por otra parte, los procesos antropogénicos, fundamentalmente la energía proveniente de combustibles fósiles y el aumento de niveles de deforestación, han alterado la concentración de estos gases atmosféricos, además de las reacciones químicas entre ellas. Estos fenómenos se traducen en un aumento acelerado de la temperatura media del globo terrestre, por lo cual el efecto Invernadero, tiene una segunda fuente de fortalecimiento.

Se tiene un efecto invernadero natural y un efecto invernadero inducido, con lo cual la media de temperatura mundial ha aumentado. El natural no tiene más explicación de su causa, que la misma

conformación de la atmosfera terrestre, en el segundo, el inducido, las causas antrópicas son identificables de manera puntual:

- Deforestación, la extinción de los bosques y coberturas arbóreas del mundo erradicando la fuente natural de control de Gases de Efecto Invernadero, especialmente el CO₂. Al no contar con su principal gestor natural, la concentración de estos gases en la atmosfera, aumenta, por consiguiente la retención de energía solar también se eleva.
- Industrialización, la implementación de todo proceso trasformador que genere materiales y elementos útiles. En la medida que la población evoluciona y crece, obliga a mayores procesos trasformadores, los cuales se presentan en funcionan al servicio de altos volúmenes de consumo y derivan elementos contaminantes, en suelos, agua, atmósfera y todo recurso natural. La acumulación de gases industriales en la atmósfera, desequilibra en gran proporción los existentes por naturaleza, con lo cual la retención de energía solar dentro de la atmósfera también aumenta y por consiguiente la temperatura media mundial.
- Aumento de Consumo Energético, la evolución social demanda mayores satisfactores de necesidades, toda la población requiere de energía para activar todos sus medios de vida, bien por desplazamientos o por establecimiento, para ello las fuentes energéticas deben ser eficientes en las necesidades de consumo, su funcionamiento, principalmente a partir de combustibles fósiles, genera gases, fundamentalmente CO₂, principal derivado de consumo de toda forma de energía. Estos gases van a la atmósfera, repitiendo el desequilibrio natural, por aumento, y por consiguiente reteniendo energía solar, aumentando la temperatura media mundial.

Asociando entonces el efecto invernadero natural e inducido, la atmósfera terrestre presenta fuertes desequilibrios en su composición de gases, lo cual se refleja en la superficie terrestre, en

condiciones de Cambios Climáticos, afectando toda la composición ecológica y ambiental de nuestro planeta.

4.1.2 Cambio climático

El IDEAM habla del Cambio Climático, de acuerdo a la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas. Desde el punto de vista meteorológico, se llama Cambio Climático, a la alteración de las condiciones predominantes.

El Ministerio de Medio Ambiente de España, muestra que desde la cumbre mundial de cambio climático COP21, se llama cambio climático a la variación global del clima de la Tierra. Esta variación se debe a causas naturales y a la acción del hombre y se produce sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc., a muy diversas escalas de tiempo. (Escobar Piñataro, 2015)

En la actualidad existe un consenso científico, casi generalizado, en torno a la idea de que nuestro modo de producción y consumo energético está generando una alteración climática global, que provocará, a su vez, serios impactos tanto sobre la tierra como sobre los sistemas socioeconómicos.

El Informe de Síntesis del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, publicado en noviembre de 2014, concluye que:

La influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, y sus impactos se observan en todos los continentes. Si no se le pone freno, el cambio climático hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas. Sin embargo, existen opciones para la adaptación al cambio climático, y con actividades de mitigación rigurosas se puede conseguir que los impactos del cambio climático permanezcan en un nivel controlable, creando un futuro más claro y sostenible".

(Sainz de Murieta, 2014)

El mundo científico y social da importantes pasos para la comprensión y gestión del efecto invernadero y del cambio climático, concentrando esfuerzos, en dos frentes, uno combatirlo y prever la situación social ante las situaciones climáticas y dos, atacar sus causas y orígenes, de forma tal que su fuerza disminuya y por consiguiente sus consecuencias.

La concentración de gases atmosféricos requiere de trabajo multidimensional, multidisciplinario, para establecer medidas de regulación integrales. Los gases que ya se han mencionado, derivados de significativas y protagónicas actividades humanas, deben regularse y asimilarse, para que el equilibrio ambiental se mantenga y las actividades humanas se fortalezcan. (Escobar Piñataro, 2015)

En el entendido que el gas carbónico es el gas más influyente en el cambio climático y en el efecto invernadero, es importante comprender y popularizar medidas que procuren su control y gestión, para que se trabaje desde actividades sencillas, cotidianas y generadoras de bienestar, en el control de emisión de gases de efecto invernadero, fundamentalmente en el control y gestión del gas carbónico. Entre estos gases se encuentran el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano, que son liberados por la industria, la agricultura y la combustión de combustibles fósiles. El mundo industrializado ha conseguido que la concentración de estos gases haya aumentado un 30% desde

el siglo pasado, cuando, sin la actuación humana, la naturaleza se encargaba de equilibrar las emisiones. (Escobar Piñataro, 2015)

En términos generales, el gas carbónico es el más abundante de los gases efecto invernadero, se tiene gases atmosféricos con mayor potencial de calentamiento global, pero sus menores concentraciones evitan que este impacto térmico sea más fuerte. De las actividades humanas (ya descritas), el gas que más se aporta a la atmosfera es el CO₂, por consiguiente los esfuerzos de control y mitigación deben enfocarse con mayor interés en las fuentes de este agente. Los demás gases, causa y consecuencias serán controlados dentro de los mismos procesos que conlleven el gas carbónico.

Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC, Los dos gases más abundantes en la atmósfera, el nitrógeno (que abarca el 78% de la atmósfera seca) y el oxígeno (que abarca el 21%), apenas ejercen efecto invernadero. El efecto invernadero proviene de las moléculas más complejas y mucho menos comunes. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante y el dióxido de carbono (CO₂) es el segundo en importancia. El metano, el óxido nitroso, ozono y varios otros gases presentes en la atmósfera en pequeñas cantidades contribuyen también al efecto invernadero. En las regiones ecuatoriales húmedas donde hay tanto vapor de agua en el aire y el efecto invernadero es tan grande, la adición de una pequeña cantidad de CO₂ o de vapor de agua tiene solo un impacto directo pequeño en la radiación infrarroja descendente. Sin embargo, en las regiones frías y polares, el efecto de un pequeño incremento de CO₂ o vapor de agua es mucho mayor. (Solomon, 2007)

4.1.3 Ciclo del Gas Carbónico

Presentar el ciclo del gas carbónico no es del todo correcto, pero para el efecto que esta investigación busca, resulta valido entenderlo así. Se empieza por decir que este ciclo es en realidad el ciclo del carbono, elemento químico presente en múltiples actividades humanas, (sino en todas), y de este, básicamente se describe como se trasporta entre las actividades humanas y la atmosfera, desde donde no es asume como carbono, sino se reconoce dióxido de carbono CO₂, o gas carbónico.

En su estado de natural, el carbono se encuentra en las rocas, geológicamente. Pero en los demás componentes del entorno se trabaja como CO₂ dióxido de carbono, siendo identificable, fundamentalmente en océanos, como su principal depósito, y los combustibles fósiles, la biomasa terrestre y libre en la atmosfera, las otras fuentes posibles.

El transito del carbono de la atmósfera hacia los seres vivos, se da en el proceso de la fotosíntesis, en el cual plantas, algas y microorganismos capturan el gas carbónico atmosférico y entregan oxígeno al ambiente. En la captura el CO₂ los organismos lo asimilan hacia hidratos de carbono, ácidos nucleicos, lípidos y proteínas, todas identificadas como materia orgánica, que en ciclo alimentario son consumidos por otros seres vivos e integrados a sus organismos.

El proceso inverso, volver el carbono desde los seres vivos hacia la atmósfera, cierra el ciclo, en el proceso de respiración capturan oxígeno y expulsan gas carbónico a la atmósfera o el agua. En la atmósfera se suma a los ya existentes, generando los efectos climáticos antes descritos. En el agua, es capturado geológicamente dando origen a depósitos de combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbono. (McVay, 2005)

Además de los procesos respiratorios, las actividades humanas o naturales como la deforestación, el consumo de combustibles fósiles, las quemas indiscriminadas y la actividad volcánica, son fuentes de gas carbónico que rompen el equilibrio gaseoso de la atmósfera. Estas

fuentes pueden ser controlables y por consiguiente procurar estabilidad en la composición y comportamiento atmosférico.

En busca de entender y gestionar adecuadamente los procesos que conllevan el gas carbónico, los gases efecto invernadero y el cambio climático, el mundo ha consensuado decisiones que buscan intervenir los aspectos ambientalmente degenerativos, para ello, se han tenido tres grandes momentos en la historia mundial reciente: la expedición del protocolo de Kioto 1997, La reunión de Copenhague y la reciente cumbre de cambio climático en Paris Cop2015.

4.1.4 Protocolo de Kyoto

Se estableció en 1997, cuyo objetivo consiste en la reducción del 5% de los GEI, principalmente dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre. (Protocolo de Kyoto, 1997)

El protocolo de Kyoto estableció 3 mecanismos que permiten ayudar a las partes del anexo 1 (países industrializados) y a las partes del no-anexo 1 (países en vía de desarrollo) alcanzar las metas establecidas haciendo un trabajo cooperativo donde ambas partes se benefician, y trabajen en pro del planeta. Uno de los mecanismos es el de desarrollo limpio que permite la venta de reducciones de emisiones certificadas, donde los países del anexo 1 compran el secuestro de carbono a los países que hagan parte del no-anexo 1. (Protocolo de Kyoto, 1997)

El primer mecanismo fue el Comercio Internacional de Emisiones (CIE), permite transferir entre países parte de sus “derechos de emisiones”, este mecanismo podría incurrir en varios problemas, ya que los países más industrializados no se van a preocupar por reducir sus emisiones sino en comprar a países pobres sus derechos de emisión, lo cual podría frenar su desarrollo mientras los industrializados se siguen enriqueciendo y aumentando el impacto negativo que causan al planeta.

El segundo mecanismo es el de la Implementación Conjunta (IC) el cual permite a los países reducir las emisiones en otros países y reclamar crédito por ello, lo cual es excelente ya que todas las partes se benefician, incluyendo el medio ambiente. El tercer mecanismo es el de Desarrollo Limpio (MDL) que permite a los países industrializados ayudar a los países en desarrollo a implementar un desarrollo sostenible mediante proyectos de reducción de emisiones, lo cual permite a estos países seguir con su desarrollo de una manera sana para el medio ambiente, y los industrializados también se benefician ya que les genera “reducciones certificadas de emisiones”. (Protocolo de Kyoto, 1997)

4.1.5 Reunión de Copenhague

La cumbre de Copenhague 2009, fue la estrategia mundial a través de la ONU y el PNUMA, para prever la continuidad de las iniciativas del protocolo de Kioto, el cual estaba planeado hasta 2012. Esta cumbre 2009, es interpretada por los entendidos del tema, como una transición sin mayores resultados y por lo cual le dio significativa relevancia a lo que se pudiese prospectar desde la COP2015 de Paris. (Elbers, 2013)

Esta cumbre fue vista como la sucesión de Kyoto para afrontar los retos de la reducción de los gases de efecto invernadero, la comprensión y previsión de las consecuencias del cambio climático y la financiación y tecnología necesarias para ayudar a los países en desarrollo a limitar el aumento de las emisiones y su adaptación al impacto del cambio climático. (Elbers, 2013)

Se puede decir que de la reunión de Copenhague, se tiene tres grupos de aportes para la atención del cambio climático:

Uno, el redimensionamiento de objetivos a alcanzar, haciéndolos posibles, reinterpretando temas como: 2° centígrados como tope máximo de control; fomentar las energías limpias y

renovables como fuentes a masificar en el mundo; dos, La proposición y validación de herramientas económicas que estimulen la disminución de Gases efecto Invernadero, como por ejemplo reevaluar el mercado mundial de emisiones, haciendo más selectivo la participación, para que los aporte sean representativos y ratificar el cobro por contaminación para desestimular las acciones humanas que generan los gases de efecto invernadero.

Tres, establecer fuentes de financiación para control del calentamiento global, donde básicamente, se aplican dos principios fundamentales de la economía ambiental, el que genera el impacto paga y el que tiene mayores ingresos, mayor posibilidad de pagar. (Elbers, 2013)

4.1.6 COP 21 Cumbre de la Tierra

Esta reunión se llevó en Paris en el año 2015 y aparentemente fue un encuentro altamente productivo, donde los principios de sanción económica para quien contamina, es una dinámica a aplicar.

Como principales conclusiones de la COP21, se han destacado, el consenso mundial de establecer un tope mundial de entre 1,5 máximo 2°C, al finalizar el siglo, como aumento de la temperatura mundial, para ello los países participantes se comprometieron a definir su máximo cupo de emisiones de gases efecto invernadero. (Olaya, 2016)

El acuerdo hace una especial apuesta al desarrollo de programas y estrategias de mitigación del Cambio Climático y la generación de Gases de Efecto Invernadero, para esto se ha aceptado la determinación de Contribuciones Nacionales, como responsabilidad de cada país, es decir, cada nación asume cuál es su nivel de contaminación en respeto a los límites mundiales comprometidos. Aquí es de resaltar que la atención a los sumideros de carbono, tiene una especial figuración, ya

que esta estrategia permite a los países que la trabajen, gestionar de mejor manera su Contribución Nacional. (Olaya, 2016)

En este particular, el manejo de cobertura boscosa en el mundo, busca aumentar la capacidad de captura de carbono. Esta investigación tiene un papel importante en este tema, ya que reconocer las ventajas ecológicas y ambientales de un uso del suelo y resaltar sus ventajas socioeconómicas y hace parte de la visión mundial en la aplicación de estrategias sostenibles que frenen el impacto atmosférico. Describir los alcances de un arreglo forestal, como eficiente sumidero de carbono, responde en múltiples frentes de expectativa mundial: protección y conservación del bosque, la implementación de agricultura sostenible, el equilibrio en el aprovechamiento de los recursos naturales, el control a la deforestación y la degradación de los bosques, promueven alternativas económicas sostenibles para las comunidades, son enfoques de interés mundial a los que esta investigación puede aportar experiencias.

En la parte económica, los acuerdos llegan a reconocer la necesidad de la cooperación económica internacional, para que los países con mejor estabilidad económica, apoyen a aquellos países que ambientalmente son eficientes pero tienen dificultades económicas.

4.1.7 Sistemas agroforestales

La agroforestería es un área interdisciplinaria donde se presentan interacciones entre árboles, personas y agricultura, manejando una serie de sistemas y tecnologías del uso de la tierra en las que se combinan la producción de cultivos con especies forestales y/o animales, de forma tal que sea posible demostrar una influencia ecológica mutua. Sus diferentes componentes interactúan bioeconómicamente en zonas o mezclados, tanto en ecosistemas frágiles como estables, a escala de

campo agrícola, finca o región, usados para subsistencia o comercialización en función del tiempo y el espacio sobre la misma superficie de terreno, ya sea de forma simultánea o secuencial.(Sinclair, 2004)

Los SAF se establecen con el fin de optimizar la producción total por unidad de superficie, aumentando su rendimiento total, basado en la combinación de la producción de egresos múltiples con la protección de la base de recursos, respetando así el principio de rendimiento sostenible y aplicando prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas socioculturales de la población local y que deben servir para mejorar las condiciones de la región. (Iglesias, 1999).

Según lo define la FAO, la agroforestería es un grupo de prácticas y sistemas de producción, donde la siembra de los cultivos y árboles forestales se encuentran secuencialmente y en combinación con la aplicación de prácticas de conservación de suelo. Según sus componentes se pueden clasificar en:

- Sistemas agroforestales secuenciales. En ellos existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos; es decir, que los cultivos anuales y las plantaciones de árboles se suceden en el tiempo. Esta categoría incluye formas de agricultura migratoria con intervención o manejo de barbechos y métodos de establecimiento de plantaciones forestales en los cuales los cultivos anuales se llevan a cabo simultáneamente con las plantaciones de árboles, pero sólo temporalmente, hasta que el follaje de los árboles se encuentre desarrollado.
- Sistemas agroforestales simultáneos. Consiste en la integración simultánea y continua de cultivos anuales o perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple y/o ganadería.

Estos sistemas incluyen asociaciones de árboles con cultivos anuales o perennes, huertos caseros mixtos y sistemas agrosilvopastoriles.

Los sistemas agroforestales se pueden describir estructural y funcionalmente como Agrosilvícolas, Silvopastoriles y Agrosilvopastoriles. En cada uno de ellos la principal característica es lograr un doble resultado: la protección y conservación de ecosistemas y garantizar el acceso a una fuente de recursos económicos para los propietarios de la agroforestería.

Los agrosilvícolas son arreglos de árboles y cultivos temporales, en el que se identifica un bosque combinado con la agricultura, el bosque brinda condiciones ecológicas que fortalecen el cultivo y el propietario se beneficie del cultivo y de los servicios del bosque. Los Silvopastoriles combinan la ganadería con el bosque, la ganadería se desarrolla conservando el bosque, potenciando las condiciones comerciales de la ganadería, pero protegiendo el bosque y aprovechando productos derivados de este ecosistema. Los agrosilvopastoriles son la sinergia de los anteriores, combinan agricultura, pastoreo y bosques, permite la labranza del suelo, la siembra y cosecha periódica, así como el pastoreo dentro del bosque y el cultivo, en todos los casos protegiendo las potencialidades ecológicas y ambientales del sistema y manteniendo vegetación protectora de los suelos.

El sistema o arreglo bosque-café, que trata esta investigación, es un sistema agroforestal agrosilvícola. En este particular CENICAFE, con Farfán (2014) expone los sistemas agroforestales más comunes, clasificándolos y presentando las características de cada sistema. Para ello habla de:

- Árboles asociados con Cultivos perennes, desarrollados con fines de mejorar la productividad de los cultivos y fortalecer las condiciones de los suelos, tanto cultivos como bosques tiene larga longevidad en el sistema.
- Árboles asociados con cultivos anuales. Aquí la agricultura se incorporar en siembras por surcos. Conserva el principio del arreglo anterior, busca potenciar el cultivo anual del sembrado.

- Arreglos Silvopastoriles, además de contar bosque y cultivos, estos incluyen el pastoreo, las capas de suelo generadas por las condiciones del bosque generan forrajes útiles para la actividad agrícola.

- Barreras vivas cortavientos. Estos arreglos buscan protección para los cultivos, para los suelos, la fauna y el paisaje del sistema y la zona. Habitualmente el bosque es limítrofe y/o con surcos truncados en el cultivo, con lo cual se generan zonas de cultivo, para que no sufran impactos naturales, fundamentalmente del viento y en menor medida del agua.

Cuando los árboles son perimetrales los fines son básicamente de delimitación de áreas y generación de maderables, independiente de la producción del cultivo

- Agrobosques o Fincas forestales. Estos arreglos tienen el paisaje general de un bosque, pero dentro de ellos los multiestratos dan cabida para la producción agrícola de cultivos adaptados al sombrero general. Estos arreglos se plantean cuando la producción se espera en periodos extensos y no como alternativa de subsistencia.

Para la FAO un arreglo Agroforestal de mejores resultados es el bosque con cultivos de café y cacao, donde estos últimos se ven altamente beneficiados por la sombra permanente gratuita que la vegetación genera, que propicia mejores resultados del cultivo, dentro de las expectativas comerciales. La agencia internacional presenta como beneficios de los sistemas agroforestales, los siguientes aspectos:

1. Se da un mejor aprovechamiento de los recursos naturales disponibles, dado que se mantienen condiciones propicias para el cultivo y por consiguiente para el bosque, la flora y la fauna, con mayor desagregación de materia orgánica, microclimas específicos y consolidación del suelo, además de brindar la posibilidad de acceder, periódica pero sostenidamente, a cultivos, bien

para el autoconsumo o bien para la comercialización y consiguiente generación de ingresos para los propietarios del sistema.

2. Estos sistemas desarrollan protección natural a agentes, plagas o afectaciones que deterioren los cultivos, la flora y la fauna del bosque se convierte en agentes de control biológico del microsistema que se genera.

3. Rotación de los cultivos. Es sembrar diferentes cultivos en un mismo terreno, durante años sucesivos. Así, mientras un cultivo utiliza ciertos nutrientes, se están regenerando los nutrientes que tomó la cosecha anterior. Esta rotación ayuda también a disminuir las plagas, ya que al año siguiente no encuentran los vegetales que atacan específicamente.

4. Los suelos se ven altamente beneficiados por: Reposición de materia orgánica, lo cual puede ser un proceso natural, cuando se deja descansar el suelo y se espera que crezca nuevamente la vegetación. El suelo también se enriquece con el secuestro de materia orgánica por organismos animales o vegetales para descomposición. La materia orgánica del suelo no sólo lo enriquece de nutrientes, también lo hacen más esponjoso, lo que permite que retenga la humedad y esté mejor aireado.

Asegurar el contenido de materia orgánica en los estratos superficiales del suelo, con el fin de mejorar la retención de nutrientes y del agua. Mantener un sistema de raíces superficiales que contribuyan a conservar la estructura del suelo y a absorber el nutriente que se encuentra en la capa superficial. De esa manera disminuyen las pérdidas de nutrimento por lixiviación.

Minimizar en lo posible la remoción de materia orgánica y nutrimento a través de la cosecha. En este caso se trata de dejar sobre el terreno la mayor cantidad posible de residuos después de la cosecha, de modo que protejan al suelo, además de aportar la materia orgánica y nutrimento.

5. Además se reconocen beneficios como la consolidación de coberturas que van consolidando microsistemas que potencian productividad ecológica y ambiental

4.1.8 Servicios ecosistémicos o ambientales de los sistemas agroforestales

Con el fin de contar con una definición unificada y adecuada, se considera que la planteada por Naciones Unidas, en la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio” (United Nations, 2005), se entienden por servicios ambientales “los beneficios que la sociedad recibe de los ecosistemas”. (Estrategia Nacional del PSA, 2008)

La definición anterior se deriva de otras dos comúnmente referenciadas. La primera de Daily (1997), establece que los servicios ecosistémicos son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que los constituyen, sostienen y satisfacen las necesidades humanas. La segunda de Costanza (1997), define los servicios ecosistémicos como los bienes (por ejemplo, alimento) y servicios (por ejemplo, asimilación de residuos) que recibe la sociedad como producto de las funciones ecosistémicas. (Estrategia Nacional del PSA, 2008)

Según la FAO, Los servicios ecosistémicos hacen posible la vida humana, por ejemplo, al proporcionar alimentos nutritivos y agua limpia; al regular las enfermedades y el clima; al apoyar la polinización de los cultivos y la formación de suelos, y al ofrecer beneficios recreativos, culturales y espirituales. Si bien se estima que estos bienes tienen un valor de 125 billones de USD, no reciben la atención adecuada en las políticas y las normativas económicas, lo que significa que no se invierte lo suficiente en su protección y ordenación.

Son cuatro los grandes grupos que se reconocen como servicios ecosistémicos: Abastecimiento, regulación, apoyo y cultura. En cada uno de ellos es posible identificar como los recursos naturales se disponen al servicio de las necesidades de la humanidad. Estos servicios y recursos pueden ser

aprovechados directamente como los ecosistemas los entregan o pueden requerir transformaciones para adaptarse a las expectativas sociales. Vale decir que cuando un servicio o recurso ecosistémico se transforma para servir a la humanidad toma el carácter de servicio Ambiental, ya que han sido influenciados y condicionados por las expectativas del hombre y sus necesidades. Describiéndolos así:

- **Abastecimiento.** Los ecosistemas son responsables de la dotación de Alimentos, Materia Prima, Agua Dulce y Recursos Medicinales al servicio de la humanidad. En estos abastecimientos, la producción natural ayuda a soportar las necesidades de la humanidad y satisface aspectos fundamentales de vida, bien por recibir mecanismos de protección, con la materia prima, o bien por recibir nutrientes, energía o satisfactores, mediante los alimentos, el agua dulce y los medicinales.
- **Regulación.** Desde los ecosistemas se determina el funcionamiento de situaciones o fenómenos que pueden alterar las condiciones de vida del planeta, que solo se evidencian cuando se deterioran y toman importancia de manera reactiva para recuperar las características de equilibrio que protejan y garanticen la vida humana. Las condiciones climáticas mundiales, aparición de fenómenos naturales, la filtración y recuperación de aguas residuales, el control de la erosión y la protección de las capacidades productivas o fertilidad de los suelos, los procesos ecológicos de polinización que garantizan frutos y semillas, los procesos de control biológico natural por ciclos de vida y con especial interés para esta investigación, la regulación del ciclo del agua, entendiendo su papel en la existencia vital del hombre y el secuestro y almacenamiento de carbono, como control natural para el calentamiento global y consiguiente aprovechamiento de recursos y disfrute de servicios ecosistémicos.

- Apoyo. Este servicio está directamente relacionado con la diversidad y biodiversidad disponible en los ecosistemas. Consolidación de Hábitats que propician gran cantidad de especies, mejorando y fortaleciendo la diversidad biológica que por sinergia plantas y animales se benefician y permiten dinámicas ecológicas. En consecuencia se genera el otro servicio de apoyo, la conservación de la diversidad genética, en la cual se garantiza la subsistencia de las especies y por consiguiente la vida misma en el planeta.

- Apoyo Cultural. Los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas se denominan “servicios culturales”. Estos servicios comprenden la inspiración estética, la identidad cultural, el sentimiento de apego al terruño y la experiencia espiritual relacionada con el entorno natural. Normalmente, en este grupo se incluyen también las oportunidades para el turismo y las actividades recreativas. Los servicios culturales están estrechamente interconectados y a menudo están relacionados con los servicios de abastecimiento y de regulación: la pesca en pequeña escala no solo tiene que ver con los alimentos y los ingresos, sino también con el modo de vida de los pescadores. En muchos casos, los servicios culturales figuran entre los valores más importantes que las personas asocian con la naturaleza; es por ello fundamental comprenderlos.

A partir de lo anterior, puede expresarse los servicios ecosistémicos o ambientales obtenidos de sistemas agroforestales, en este particular, el Departamento de Agricultura y Agroforestería y el Centro de Educación Superior e Investigación sobre Agricultura Tropical (CATIE) de Costa Rica, tiene identificados aspectos concretos en los cuales caracterizarlos:

4.1.8.1 Reducción de la erosión y protección de la fertilidad de los suelos.

El suelo constituye el fundamento más importante de la producción agropecuaria y con ello de la alimentación humana (Benzing 2001). Por lo que es un componente dinámico del agroecosistema, sujeto a alteraciones que pueden degradarlo o manejarlo responsablemente (Gliessman 2002). El suelo, además de la producción de alimentos, cumple con otras funciones en los ecosistemas terrestres, entre lo que destacan la función de hábitat para una enorme diversidad de organismos, regulación del ciclo del agua, carbono y del intercambio de radiación y calor con la atmosfera, teniendo la función de filtro y tapón para agua, ácidos y sustancias tóxicas (Benzing 2001).

Estos aspectos se dan básicamente por las dinámicas que establecen los sistemas agroforestales, para la fijación de nutrientes en el suelo, al propiciar los ciclos biogeoquímicos de elementos como el nitrógeno (Young, 1989; Buresh, R. J., & Tian, G. (1998)), la formación de materia orgánica, retención de nutrientes en el suelo (Beer, 1988; Mathuva, 1998) y el aumento de elementos disponibles como potasio, calcio, fósforo y magnesio en la biomasa.

4.1.8.2 Acumulación de agua en cantidad y calidad.

El servicio ambiental hídrico se refiere a la capacidad que tienen los ecosistemas para captar agua y mantener la oferta hídrica a los individuos y a la sociedad en general (Constanza et ál. 1998); convirtiéndose en un recurso fundamental para toda forma de vida por lo que su conservación y manejo debe constituirse una prioridad a nivel global.

Los sistemas Agroforestales, no son propiamente productores de agua, pero si reúnen condiciones que propician la acumulación de agua y por consiguiente son fuente del líquido vital. Esta capacidad de acumulación se da por doble vía:

Uno, la consolidación de una cobertura vegetal arbórea propicia la atracción de niebla atmosférica, la cual deposita el agua sobre la cobertura vegetal y por simple gravedad esta se decanta hacia los suelos del arreglo productivo. (Montagnini, 2015)

Dos, las condiciones formadoras del suelo, propician la acumulación y filtración natural del agua, en las capas de materia orgánica que cubren los suelos propiamente dicho. Esta capa orgánica retiene el agua, mejorando su disponibilidad y calidad, la transpiración y retención del agua en el suelo, la reducción del escurrimiento y el aumento de la filtración. (Montagnini, 2015)

4.1.8.3 Gestión de la diversidad biológica

La biodiversidad o diversidad biológica se refiere a la variabilidad de todos los organismos vivos y los complejos ecológicos en los que se da (OTA 1992; Pagiola et ál. 1997 citado por Harvey 2001) La biodiversidad se puede determinar en tres niveles: genético, de especies y de ecosistemas y se mide de forma simple bajo esquemas como abundancia, número de especies y su frecuencia relativa (Harvey 2001).

Los arreglos agroforestales, sirven como nichos compensatorios a procesos de deforestación o degradación de los bosques, fundamentalmente facilitan hábitats que evolucionan hacia bosques iniciales, donde las especies animales pueden adaptarse de manera fácil, propiciando nichos de vida que aseguran la existencia de estos seres vivos. No significa que los arreglos agroforestales desplacen o reemplacen los bosques naturales de condiciones ideales de hábitat de flora y fauna, pero si reúnen condiciones que amortigüen su disminución y propicien espacios de readaptación especies, que con evolución geológica permitan rehacer la existencia de áreas boscosas. A pesar de estas limitaciones, ya existe suficiente evidencia de que los SAF ofrecen más esperanza para la

conservación de especies de plantas y animales que los monocultivos y ya se utilizan como herramientas de conservación en los paisajes deforestados y fragmentados (Beer, et al., 2003)

4.18.4 Captura de carbono y reducción de gases efecto invernadero

La fijación y el almacenamiento de carbono es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agrícolas. Este se genera en el proceso de fotosíntesis realizado por hojas, tallos y otras partes verdes de las plantas, con el cual se captura el CO₂ atmosférico para la producción de carbohidratos y azúcares, al tiempo que se libera oxígeno (Beer, et al., 2003). Así se forma la biomasa y la madera de los árboles que capturan el carbono llegando a ser sumideros de carbono (Cuéllar et ál. 1999).

La fijación y el almacenamiento de carbono es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agrícolas (Segura 1997). Este se genera en el proceso de fotosíntesis realizado por hojas, tallos y otras partes verdes de las plantas, con el cual se captura el CO₂ atmosférico para la producción de carbohidratos y azúcares, al tiempo que se libera oxígeno. Así se forma la biomasa y la madera de los árboles que capturan el carbono llegando a ser sumideros de carbono (Cuéllar et ál. 1999).

Este aspecto es de relevancia para la investigación. Según lo documenta el CATIE a los sistemas agroforestales se les reconoce una importante función en la retención de carbono en los suelos y en la biomasa de madera. La cantidad de carbono fijado en los sistemas Silvopastoriles es afectada por las especies árbol/arbusto, la densidad y distribución espacial de los árboles y la tolerancia de sombra de las especies herbáceas (Nyberg y Hogberg, 1995; Jackson y Ash, 1998).

El centro de investigaciones ha consolidado importantes datos sobre los sistemas agroforestales, el carbono y los gases efecto invernadero, se han realizado pocos estudios para determinar el modo

cómo los pagos por el carbono retenido afectarán el ingreso en la finca y los cambios en el uso de la tierra de los establecimientos ganaderos (Ruiz, 2002).

Un análisis mostró que los agricultores pueden aumentar sus ingresos por más del 10% cuando el 20% de la pastura de monocultivo de pasto se transforma en sistemas silvopastoriles (por ejemplo, los bancos de forraje y los árboles dispersos en la pastura) y el bosque secundario. Este análisis económico, realizado en fincas ganaderas de doble propósito, sugirió que el ingreso potencial en bruto generado por el carbono almacenado en los troncos de los árboles era de 253 dólares estadounidenses por año para finca de 70 ha (precio del carbono 7 dólares estadounidenses 7/t) (Ruiz, 2002).

Los incentivos para que los agricultores adopten sistemas silvopastoriles que almacenen más carbono y eviten la degradación de los pastos se están desarrollando y verificando en Colombia, Costa Rica y Nicaragua (un proyecto del Fondo para el Medio Ambiente Mundial [FMAM] coordinado por Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), pero se necesita mucho más trabajo para entender el potencial completo de este enfoque.

4.1.9 Sistemas agroforestales y captura de carbono

En la India, Murthy *et al.*, elaboraron un extenso estudio que revisa el papel de los sistemas agroforestales en la mitigación de carbono, promoción de la biodiversidad y fuente de ingresos adicionales, evaluando su potencial en el marco del Plan de Acción Nacional por el Cambio Climático para la misión Greening India, dirigido a mejorar a través de la agroforestería las tierras agrícolas degradadas, estimadas en 25.36 millones de hectáreas (Murthy et al., 2013).

En México, la especie utilizada *Pinus cembroides subsp. orizabensis* que presenta gran aceptación a condiciones climáticas de temperatura, luz y precipitación muy extremas, para esta especie se determinó la cantidad de carbono que una plantación, es capaz de almacenar y capturar.

Se evaluaron un total de 479 individuos establecidos en quince bloques, se midió el diámetro y la altura de los árboles para determinar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea. Se obtuvo un total de 2126.90 kgC, en una superficie de 2945 m², con un mínimo de 0.0576 kgC, un máximo de 13.252 kgC y una media de 40440 kgC. Concluyendo que en una hectárea se pueden capturar 7.22 ton/ha (Ramírez, et al., 2012).

En México, en el 2003, se investigó sobre la estimación del contenido de carbono almacenado en biomasa aérea, en el bosque de pino del ejido “La Majada” Municipio de Peribán, Michoacán. Sus resultados en el caso del género *Pinus* se tiene un almacén de 22,355 toneladas totales de carbono, para el género *Abies* que en este caso es el que mayor contenido de carbono almacenado tienen presenta 25,304 toneladas de carbono, en el caso del género *Quercus* se obtuvo un total de 1,292 toneladas de carbono y para otras hojosas tenemos que hay 6,379 toneladas de carbono. Se observó que el ejido “La Majada” tiene un total de 55,329 t C. En una superficie de 1,010 Ha. Considerando los cuatro diferentes géneros existentes dentro de esta área. Se concluyó que el contenido de carbono del ejido “La Majada” cuenta con 55,329 toneladas de carbono, pero metodológicamente es necesario estimar el Incremento Corriente Anual en volumen por género y por especie que forman la composición y estructura arbórea, para poder calcular su potencial de captura de carbono (Zamora, 2003).

En Nicaragua, Connolly, R., & Corea, C., realizaron un estudio para determinar la fijación de carbono en cuatro tipos de plantaciones: pino, café ecoforestal, plantaciones con fines energéticos y bosque con manejo de regeneración natural seco en seis comarcas de los municipios de El Jícaro, Jalapa, Jinotega y Diriamba. Se determinó que de estas plantaciones el pino fijó la mayor cantidad de carbono en sus partes con 211.82 tC/ha, y que la fuente suelo representa entre el 76.07 al 87.12% del carbono almacenado en el sistema, seguido de la biomasa aérea, biomasa de la raíz, hojarasca y hierbas (Connolly Wilson & Corea Siu, 2007).

En Lima - Perú en el 2007, La estudiante Diana Palomino Contreras para optar el grado de Magíster en Ciencias Ambientales con mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental de la Universidad Nacional Mayor De San Marcos, realizó una investigación que estimó el servicio ambiental de captura del CO₂ en la flora de los Humedales de Puerto Viejo, las especies predominantes son la “grama salada” *Paspalum vaginatum* Swartz, la “Salicornia” *Salicornia fruticosa* Linneo, la especie de valor artesanal como la “totora” *Schoenoplectus californicus*, y el “junco” *Scirpus americanus*. Se cuantificó el Carbono almacenado para conocer el potencial de captura del CO₂ de las especies características de los Humedales y de esta manera conocer la pérdida de reservas de carbono al quemarlos o cambiarlos de uso para fines agrícolas o urbanos. Esta captura de carbono se da en la biomasa parte aérea, radicular y en el suelo. En cada especie se establecieron al azar 5 muestras donde se tomó las muestras de flora, se establecieron cuadrantes para cuantificar la biomasa herbácea de los Humedales de Puerto Viejo (Contreras & Carranza, 2007).

Por su parte, Callo-Concha, D., Krishnamurthy, L., y Alegre, J., (2002) evaluaron el contenido de carbono de la biomasa arbórea, biomasa herbácea, hojarasca y cuatro estratos del suelo, secuestrado por bosque primario, bosque secundario, café + sombra, silvopastura, pastura y huerto casero en la región amazónica del Perú, en selva alta, media y baja. Los resultados mostraron que el bosque primario retiene 465.8 tC/ha de carbono total, superando en un 58% a los demás, en tanto que el suelo, sumidero estable, retiene más de la mitad del carbono total, a excepción del bosque primario, mostrando una proporcionalidad inversa entre sumideros arbóreos y edáficos (Callo-Concha, Krishnamurthy, & Alegre, 2002).

A nivel nacional podemos encontrar en Bogotá – Colombia en el 2010, un estudio de Gestión Forestal Urbana Como Mecanismo De Captura De Carbono En El Campus De La Pontificia

Universidad Javeriana Sede Bogotá D.C., para identificar el balance de emisiones captura de carbono que tiene la UPJ desde el año 1930 al año 2008, se plantea una propuesta que permita que la universidad esté en equilibrio en términos del contexto emisiones-captura. Existen diversos mecanismos para capturar carbono, en busca de un balance cero se plantea realizar un plan masivo de siembra, se propone que en las construcciones se utilice más la madera como material de construcción, se reduzca la utilización de concreto y metales y se incorpore un proceso de capacitación que busque que la gente no solamente tome conciencia de la necesidad de trabajar con materiales menos contaminantes sino que aprenda a trabajar con otros materiales como es el caso de la madera en las construcciones de la universidad, que además acepten y valoren el establecimiento de árboles como mecanismo de mitigación de la contaminación por CO₂ y que se implementen estrategias de gestión tendientes a reducir las emisiones de CO₂. Se concluye que es necesario adoptar nuevos diseños que permitan una mayor utilización de materiales como la madera para fijar el CO₂ y menos metales y concreto para disminuir las emisiones. A pesar de que se implementen programas con miras a la reducción de las emisiones la única alternativa segura y viable a corto y mediano plazo por parte de la UPJ para capturar emisiones de CO₂ es mediante la plantación de forestales (Quiñónez Collazos, 2010).

CENICAFE, a través de Farfán (2014), argumenta como el agroecosistema cafetero tiene un potencial apreciable para retener el carbono atmosférico, tanto en las partes aéreas de las plantas, como en el sistema radicular y en la materia orgánica del suelo. Si los cafetales se comparan con ecosistemas forestales, tanto perennifolios como estacionales, la cantidad retenida de carbono en los primeros es menor, sin embargo, su productividad es mayor que la de los bosques. Y relacionan (Kurstén y Burschel 1993), calcularon que cerca de 14 a 52 t.ha⁻¹ de carbono (C) son almacenadas en la biomasa de la parte aérea de los árboles de sombra en asocio con plantaciones de café y cacao. Comparados con cultivos anuales, estos sistemas agroforestales almacenan carbono adicional,

entre 10 y 50 t.ha⁻¹, en la capa vegetal y la materia orgánica depositada en el suelo. Ávila et al. (2001), evaluaron el almacenamiento y fijación de carbono (C) en los sistemas agroforestales café (*Coffea arábica*) con *Eucalyptus deglupta* (eucalipto), de 4, 6 y 8 años de edad; café con *Erythrina poeppigiana* (poró), y en monocultivos de café. Más del 89% del C almacenado en los sistemas correspondió al C del suelo, mientras que la fijación de C del componente arbóreo estuvo entre 0,4 y 2,2 t.ha-año⁻¹.

A nivel local, en Santander, la investigación realizada por Castellanos (2009) referente a la determinación preliminar de la captura de carbono por las especies Tibar, Hayuelo, Roble y Duraznillo, nativas del parque ecológico La Poma, llegó a la conclusión que de éstas, el Tibar (*Escallonia paniculada*) presentó el mayor contenido de carbono (77.23 mgC/100g) en los diferentes componentes (hojas, flores, frutos y ramillas), seguido del Duraznillo (*Abatia parviflora*) según el peso seco de la hojarasca, siendo además la especie con mejor adaptación para los ecosistemas de Bosque Alto Andino. En una investigación similar, Peñaranda, estimó el almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales de café en los municipios de Barichara, Curití, Aratoca y San Gil en Santander mediante de biomasa total en árboles y en cafetos, demostrando el enorme potencial de los diferentes tipos de café a la sombra, la diversidad de sombríos y las densidades de café y árboles como sumideros de carbono (Castellanos, 2009).

Todos estos estudios, brindan argumentos de los beneficios recibidos de los bosques. Una fortaleza importante derivada de ello, debe ser el buscar transferir la capacidad ecológica de los bosques para capturar carbono y controlar los GEI, en condiciones de beneficio social que permitan evidenciar a las sociedades, que sus bosques pueden ser fuente de bienestar económico, sin necesidad de caer en procesos deforestadores o explotadores de madera, sino por el contrario, para establecer medidas de control, reforestación y degradación evitada.

4.1.10 Valoración y rentabilidad de arreglos agroforestales café madera

El primer enfoque del cultivador, no solo de café, sino de cualquier cultivo, es sembrar, cosechar y vender para recibir ingresos económicos y repetir el ciclo tantas veces como sea posible. Este enfoque netamente mercantilista funciona mientras las zonas cultivadas mantienen sus niveles de fertilidad. Cuando éste empieza a decaer se buscan métodos antrópicos que refortalezcan la fertilidad, aunque se sacrifique aspectos naturales, en muchos casos, más difíciles de recuperar que la misma capacidad productiva de las zonas de cultivo.

Ante esta situación, los cultivadores han venido desarrollando estrategias que extiendan la fertilidad de los suelos y sus capacidades de autorenovación. En el café, la implementación de bosques para sombrío y la incorporación de cultivos compatibles con el café, ha sido una estrategia que se vale de la naturaleza para fortalecer la cosecha, las posibilidades de comercialización y por consiguiente mejoramiento de los niveles de ingresos económicos. En este proceder, aún se mantiene el enfoque mercantilista, aunque ya con bases ecológicas y ambientales sustentables.

Sin duda estas alternativas de arreglos agroforestales para mejorar las condiciones y características de cultivo y comercialización del café, potencia el acceso del producto a mercados más rentables, pero también más exigentes en las condiciones con que se realiza todo el proceso productivo, desde la siembra hasta el consumo final del producto.

En estas exigencias se presente la eficiencia ambiental del sistema productivo, eficiencia interpretada desde la valoración y prevención de impactos ambientales como por ejemplo: protección de suelos, conservación de fuentes hídricas, recirculación de residuos y utilización de insumos orgánicos; es decir, sobre aspectos evidenciables y tangibles directamente en campo. Pero a esta valoración es importante cuantificarle, la significancia de los servicios ambientales asumidos por el arreglo agroforestal, los cuáles pasan desde la significancia cultural del cultivo hasta la

producción de agua o la protección y conservación atmosférica, y todo mediado por la capacidad natural ecológica que se propicia al trabajar un arreglo agroforestal.

En este sentido, la producción agrícola, y en el caso del arreglo agroforestal café madera, se le debe reconocer una valoración monetaria, por los costos de producción contra los niveles de ingresos económicos de comercialización dependientes de la calidad del producto entregado. Además, debe valorarse los servicios ambientales, uno de ellos, la captura de carbono; y expresar económicamente cuanto puede mejorar la comercialización del producto al incorporar sus beneficios ambientales y cuanto adicional representa para los ingresos económicos de cultivadores, productores y comercializadores del producto.

Esto es, interpretar económicamente la ganancia que genera un arreglo agroforestal café madera, tomando en cuenta: los costos de producción de café, los costos de comercialización del producto del cultivo, los ingresos por comercialización del producto y los ingresos agregados por valoración del servicio ambiental de captura de carbono en el proceso productivo del café.

4.1.10.1 Costos de producción, comercialización e ingresos del café.

Para los fines que persigue esta investigación, no se requiere desglosar insumo por insumo los costos que el cultivo madera café obliga, se trabajarán datos consolidados por promedio generales, el costo que el cultivador promedio asume para la permanencia de su cultivo. En este orden de ideas se analiza, cuánto cuesta producir el café, sin discriminar que variables o insumos influyen en estos costos.

Es importante señalar, por lo menos, los momentos productivos que hacen parte de la cadena del café, para que pueda ser presentado a los mercados y se reconozca el valor económico que permite recursos económicos a los agentes del circuito. FINAGRO, a través de su información sectorial, hace una descripción sucinta de lo que son las fases de producción del café.

En primer lugar, la cadena comprende las actividades agrícolas que se realizan en finca, tales como siembra, recolección, beneficio y secado. En los diferentes momentos de esta última actividad, ya sea que se realice con máquina o al sol, el café es denominado sucesivamente café pergamino mojado, pergamino húmedo y pergamino seco, el cuál es el producto final de esta fase productiva.

En seguida, el café pergamino seco se transporta a la trilladora, donde se procede a pelarlo, es decir, se le extrae por medio de máquinas especializadas, la película o endocarpio que lo cubre, convirtiéndolo en café verde, para después clasificarlo según tamaño y calidad del grano.

El término "verde" no se refiere al grado de madurez del producto, sino al hecho de no ser aún tostado, donde el grano adquiere su color café característico.

En Colombia, este café verde se destina directamente a la exportación. Por otro lado, la producción orientada al consumo interno, llega hasta la etapa final del proceso productivo de la cadena: tostión, molienda y empaclado en el caso del café molido ya sea cafeinado, descafeinado, mezclado con azúcar, etc., o, después de un proceso ampliado que implica la torrefacción, molienda, evaporación y aglomeración, se producen extractos y cafés solubles, cuando el producto final son los concentrados y cafés instantáneos para disolver, bien sea para el consumo directo, o para incorporarlo como esencia en otras bebidas, helados u otros productos alimenticios.

Aun así, es importante señalar que cerca del 70 % de los costos de producción se concentran en tres actividades: recolección, fertilización y gastos administrativos, el otro 30% está representado por procesos asociados a la producción cafetera.

4.1.10.2 Ingresos económicos por el servicio ambiental o ecosistémicos de captura de carbono.

Los esquemas de Pagos por Servicios Ambientales o Ecosistémicos PSE, es un aspecto no consolidado en el país y que no ha sido apropiado socialmente como una fuente posible real de ingresos económicos para toda forma de aprovechamiento productivo, conservación y protección de recursos naturales o de ecosistemas específicos.

Un esquema de pagos por servicios ambientales o ecosistémicos busca fundamentalmente, cuantificar económicamente el beneficio de vida que el ecosistema brinda a la humanidad, para esta investigación no se entra en un esquema de pagos por servicios ambientales, sino que se asume el esquema de pago por bonos de carbono, internacionalmente validado

Como lo presenta la FAO los esquemas de PSE se pueden encontrar en todos los continentes. En su mayor parte giran en torno a tres grupos de servicios ecosistémicos: los relacionados con el agua y el suelo; la estabilización del clima, y la conservación de la biodiversidad. Aunque los planes de pagos por servicios ecosistémicos pueden centrarse en el mejoramiento de uno de los servicios del ecosistema, los beneficios de las intervenciones ecosistémicos son múltiples; así, por ejemplo, la reforestación puede tener como objetivo el secuestro de carbono, pero también tendrá repercusiones favorables en la calidad del agua y la biodiversidad. Es por lo tanto necesario que a la hora de elaborar esquemas PSE, estos múltiples servicios se aborden de manera conjunta.

El mercado de carbono, entra en la filosofía de un PSE, dado que permite la compensación económica, por un beneficio ambiental recibido. El mercado de carbono o de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero surge ante la necesidad de tomar medidas ante la evidencia de que la actividad humana está influenciando un proceso de calentamiento climático global acelerado debido a la concentración de gases de efecto invernadero, con los consecuentes

impactos negativos sobre la salud de los seres humanos, su seguridad alimentaria, la actividad económica, el agua y otros recursos naturales y de infraestructura física (Eguren, 2004)

El mercado de carbono regulado es utilizado por empresas y gobiernos que, por ley, tienen que rendir cuentas de sus emisiones de GEI. Está regulado por regímenes obligatorios de reducción de carbono, ya sean nacionales, regionales o internacionales. En el mercado de carbono voluntario, en cambio, el comercio de créditos se produce sobre una base facultativa. El mercado de carbono es una respuesta al Protocolo de Kioto, en el cual establece niveles de gases de efecto invernadero, sustentables entre todos los participantes del protocolo, y para ello, unos actores se comprometieron a detener y estabilizar sus niveles de contaminación, otros, se comprometieron a que si bien no lograrían bajar sus niveles de emisiones a los niveles comprometidos, si podrían entrar a financiar a aquellos que logran disminuir su contaminación por debajo de los promedios comprometidos y por consiguiente compartir los cupos de contaminación ganados de más. De esta forma el mercado de carbono logra acentuar las responsabilidades compartidas, todos procuran disminuir sus emisiones, de no lograrlo, todos reciben los beneficios económicos de lograr unos niveles medios de contaminación entre todos. (Aguilar et al., 2009)

En el año 2005 la CMNUCC crea el programa Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (R.E.D.D), con el cual se pretende incentivar económicamente a quienes reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de los bosques. Tiempo después el programa R.E.D.D evolucionó a R.E.D.D + (plus), con el fin de incluir la preservación de los secuestros de carbono, el manejo sostenible y la mejora continua de los secuestros de carbono de los bosques. (Angelsen, 2008)

Los países que implemente el programa R.E.D.D. estarán contribuyendo con la reducción de GEI en la atmosfera, y adicionalmente las naciones industrializadas estarán obteniendo

Certificados de Emisiones Reducidas, CERs, y a su vez los países en vía de desarrollo estarán recibiendo beneficios económicos como pago por el servicio ambiental prestado. (Angelsen, 2008)

Colombia es un país en vía de desarrollo donde el 94% de su territorio es rural y el 32% de su población total vive allí, lo que lo hace un país ideal para certificar reducciones de emisiones, sin embargo son pocos los estudios que se han realizado para llevar a cabo programas como R.E.D.D +, MDL, o cualquier tipo de PSA. Este proyecto busca la implementación de estos programas en Colombia, principalmente en Santander, ya que cuenta con amplio territorio rural apto para implementarlos. (Evitada, 2010)

En este último aspecto las estrategias REDD y REDD+, tiene avances altamente significativos en la construcción de valoración económica de la protección de los bosques y de su fortalecimiento y reaprovechamiento dentro de sistemas productivos como la agroforestería.

Para ello, esta estrategia contempla dos procesos fundamentales, la estimación de niveles de carbono, y la identificación de la rentabilidad del sistema forestal, para lo cual plantea que se debe (White & Minang, 2011):

- Determinar niveles de carbono: siguiendo una secuencia de procesos técnicos, Diseñar plan de muestreo; Medir el carbono en varias stocks, como por ejemplo: biomasa de los árboles, biomasa del sotobosque, cultivos, biomasa muerta y hojarasca en el suelo. Estimar el promedio de C en un período de tiempo; además,
- Usar la clasificación de los usos de la tierra: para ello Desarrollar presupuestos de actividades estimando costos e ingresos; Realizar un Análisis multi-año, interpretando la Conversión de usos de la tierra y evaluando las fases producción/establecimiento de cultivos o arreglos potenciales de captura de carbono; y realizar estimaciones de Valor presente neto (VPN), para entender a precios de hoy, los beneficios a recibir en el futuro.

En el entendido que la estimación propuesta en este documento llega al nivel de proyecto, se puede trabajar en proceso puntuales: Estimar el promedio de C en un período de tiempo y evaluar las fases producción/establecimiento de cultivos o arreglos potenciales de captura de carbono. Con estos análisis y estimación, debe llegarse a reconocer cómo influye la capacidad natural de un cultivo, en su valoración económica.

Con lo anterior, se podrá determinar una representatividad económica para el servicio ambiental de arreglo agroforestal. Una vez calculado los niveles de captura de carbono, a través de la cuantificación del mercado de carbono se podrá estimar un posible nivel de ingresos para ese arreglo agroforestal por su servicio ecosistémicos y a posterior, este valor se llevara a cuantificar en la producción comercializable de café y reconocerle su representatividad a favor del productor final. Se espera que esta valoración permita mejorar la balance comercial a favor del cultivador, aumentando el nivel de ingresos económicos percibidos por el proceso agroforestal.

5. Diseño metodológico

5.1. Área de estudio

Como área de estudio se ha delimitado dos fincas caficultoras, con implementación de procesos orgánicos en el cultivo. Se tomaran las fincas: La Pradera del Municipio de Aratoca y La Finca El Prado en el Municipio de Zapatoca. En estas fincas, se presentan sistemas Agroforestales Café-Madera, los cuales cultural y económicamente, tienen una importante aceptación entre los cultivadores.

Para desarrollar la evaluación comparativa propuesta, los dos espacios de estudio, presentan condiciones similares y factores diferenciadores, en los siguientes términos.

- En la finca La Pradera del municipio de Aratoca, se realizara la evaluación en un terreno de aproximadamente 10.000 m² en 14 surcos, de aproximadamente 89 plantas de café cada uno, para un total de 6700 individuos de “*Coffea arabica L*” variedad castilla de 5 años de edad y aproximadamente 460 árboles de sombra de 9 especies (*Albizia carbonaria*, *Brunellia comocladifolia*, *Cassia grandis*, *Erythrina poeppigiana*, *Ochroma pyramidale*, *Cedrella sp.*, *Inga codonantha*, *Ricinus communis* y *Pinus patula*) de la misma edad de siembra.

- En la finca El Prado del municipio de Zapatoca se tomó un lote de aproximadamente de 5.735 m² en 9 surcos, de aproximadamente 40 plantas de café cada uno, para un total de 1280 individuos de “*Coffea arabica L*” variedad castilla de 5 años de edad y aproximadamente 196 árboles de sombra de 10 especies (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Erythrina edulis* Michelide, *Persea americana*, *Cedrella odorata*, *Pithecellobium dulce*, *Inga edulis*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliadora* y *Salix humboldtiana*) la misma edad de siembra.

5.2 Diseño experimental

Las variables a tener en cuenta son la determinación de carbono capturado y valoración económica de la captura de carbono en los sistemas agroforestales.

La capacidad de almacenamiento de carbono en los cultivos agroforestales Café-Maderable, se determinara a partir de la evaluación de las siguientes etapas:

Etapas 1: Carbono en la biomasa en los tipos de café (*Coffea arabica* var. *Castilla*)

Etapla 2: Carbono en la biomasa de las especies forestales.

En la finca La Pradera (*Albizia carbonaria*, *Brunellia comocladifolia*, *Cassia grandis*, *Erythrina poeppigiana*, *Ochroma pyramidale*, *Cedrella sp.*, *Inga codonantha*, *Ricinus communis* y *Pinus patula*), y, en la finca El Prado (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Erythrina edulis* Michelide, *Persea americana*, *Cedrella odorata*, *Pithecellobium dulce*, *Inga edulis*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliadora* y *Salix humboldtiana*)

Etapla 3: Carbono en los sistemas agroforestales. Se entenderá como el carbono en la biomasa de los tipos de café más las especies agroforestales.

Para determinar el carbono en la biomasa se procesan los datos a partir de protocolos ya establecidos por Yepes *et al* (2011), que permita el estimativo de las capacidad del sistema agroforestal. Se tomaran los siguientes datos:

DAP: Diámetro a la Altura del Pecho, variable tomada en campo a 1.30 mts sobre el nivel del suelo, para cada uno de los individuos. Su unidad de medida para la ecuación es (cm).

Densidad ρ = El peso seco de la madera, para cada una de las especies. La unidad en que se emplea para la ecuación es (grs/cm³).

Ecuación Alométrica definida por Yepes *et al.*, dependiendo de la zona de vida a trabajar¹.

Tabla 1 Ecuación alométrica recomendada para el cálculo de biomasa en bosques naturales

Variables independientes: Diámetro (D), densidad de madera (ρ) $\text{Ln}(\text{BA}) = a + b \ln(D) + c (\ln(D))^2 + d (\ln(D))^3 + B1 \ln(\rho)$						
Tipo de bosque	a	b	C	d	B1	R ²
bh-PM	2,421	-1,415	1,237	-0,126	1,068	0,954

Nota: Ecuación alométrica recomendada para el cálculo de biomasa en bosques naturales de todos los árboles con $D \geq 10$ cm. Donde BA es la biomasa aérea de los árboles en Kg; D es el diámetro normal medido a 1,30 de altura desde el suelo en cm, ρ densidad de la madera en g cm³, a, b, c, d y B1 son constantes del modelo, R² es el ajuste del modelo.

Para la variable de la valoración económica de la captura de carbono en los sistemas agroforestales, se establece el siguiente proceso:

Primero, El estudio toma elementos de Investigación correlacionales, ya que la esencia del análisis que se propone busca establecer la relación entre condiciones físico bióticas del sistema Agroforestal, su capacidad de servicios ambientales, su valoración y posible influencia en el valor de comercialización de los productos generados en el cultivo agroforestal.

Se establecerá las condiciones de rentabilidad del cultivo a partir de las condiciones de mercado más su capacidad de captura de carbono, se busca conocer cuál es la rentabilidad agregada que genera el producto por el servicio ambiental generado y no percibidos. Para esto, se hace necesario construir dos herramientas, un análisis de costos de producción y ganancia económica estimada, el

cual se puede obtener por indagación entre los agentes comerciales del producto del sistema agroforestal. Lo anterior deberá permitir inferir una relación entre estimación de carbono y estimación de rentabilidad del cultivo.

6. Resultados y discusión

6.1 Condiciones dasométricas que caracterizan cada cultivo agroforestal seleccionado y soportan su capacidad de productividad

Para realizar el estudio investigativo, se seleccionó en las fincas La pradera ubicada en el municipio de Aratoca y El Prado en el Municipio de Zapátoca, un lote de cultivo de *Coffea arábica* L., variedad Castillo (Figura 1), la cual tiene especial aceptación entre los cultivadores de la región y es recomendada por la Federación Nacional de Cafeteros, por su capacidad de resistencia a la enfermedad roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), (Cenicafé, 2011).

Teniendo en cuenta la edad del cultivo, se determinó trabajar con un lote de 5 años de siembra para ambas fincas, ya que a esta edad se hace visible el punto en el cual la producción promedio es máxima y las plantas de café no han sido sometidas a ningún tipo de renovación.



Figura 1 Sistema agroforestal seleccionado en la finca La Pradera (Izquierda) y sistema agroforestal seleccionado en la finca El Prado (Derecha)

El lote seleccionado para la finca La Pradera tiene una extensión de 10.099 m² de área. Este lote está distribuido en 76 surcos de aproximadamente 88 plantas de café cada uno y aproximadamente 460 árboles de sombra y para la finca El Prado consta de 5.735 m² de área, este lote está distribuido en 32 surcos de aproximadamente 40 plantas de café y aproximadamente 196 árboles de sombra (Figura 2).

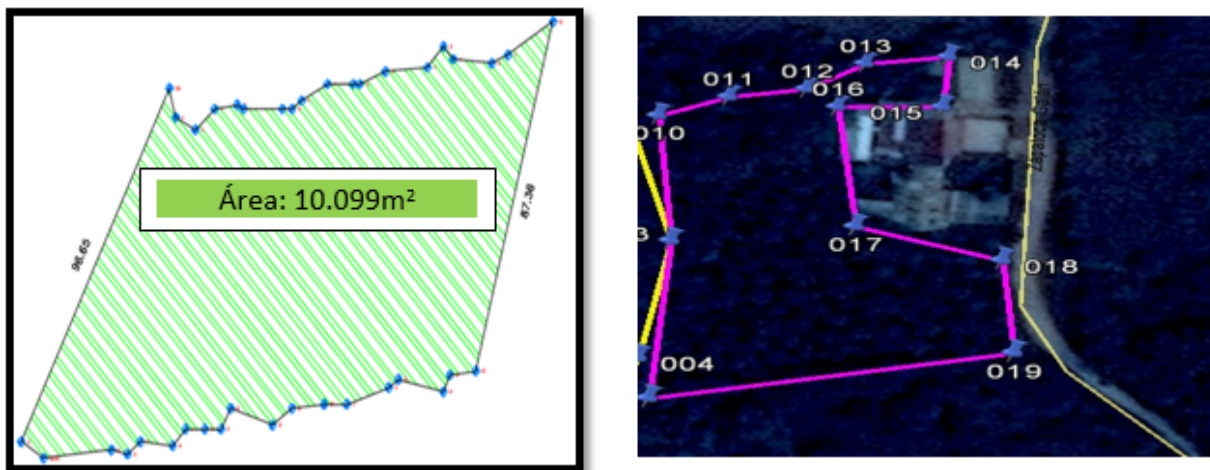


Figura 2 Georreferenciación de los lotes en las fincas de estudio La Pradera (Izquierda) y El Prado (Derecha)

El sistema de medición de las plantas de café se realizó en zig-zag cada 3 surcos, para un total de muestra representativa de 19 surcos equivalente a 1609 datos en la finca La Pradera del municipio de Aratoca y para la finca El Prado 9 surcos equivalentes a 360 datos, incluyendo las ramificaciones de las plantas a menos de 15 cm del suelo, distancia a la cual se les tomó el dato de DAP en centímetros, mediante el uso de un calibrador manual. El total de datos evaluados genera confiabilidad en cuanto a los resultados obtenidos ya que la proporción puede considerarse representativa respecto a los lotes seleccionados.

Se identificaron las especies forestales, usadas como árboles de sombrío en el área de estudio, las cuales fueron muestreadas y tenidas en cuenta en su totalidad, generando un dato de 458 árboles para la finca La pradera y 196 árboles para El Prado. Para la correspondiente medición del CAP en centímetros, se utilizó un decámetro a aproximadamente 1.30 metros, plasmando una circunferencia alrededor del tronco a esta altura. Sólo se registró el dato de aquellos árboles en los cuales su CAP es igual o mayor a 10 cm.

A los datos de CAP tomados en campo de los árboles, se les aplicó el siguiente factor de conversión, para la posterior aplicación de la ecuación alométrica.

$$\mathbf{DAP} = (\mathbf{CAP} / \pi)$$

Para el cálculo de la Biomasa aérea, fue necesario definir previamente, la zona de vida a la cual pertenecen los lugares de estudio seleccionados. A partir de los valores de precipitación, temperatura y altitud, los cuales están comprendidos en los rangos de 1500-2000 mm/año, 19-24 °C y 1800-1900 msnm, para cada variable respectivamente, se logró determinar que son características propias de un bosque húmedo pre montano para los dos lugares (Holdridge, 1987).

Ecuación alométrica del bosque húmedo pre montano, para el cálculo de la biomasa aérea:

$$\ln(\mathbf{BA})= a + b(\ln(\mathbf{D})) + c(\ln(\mathbf{D}))^2 + d(\ln(\mathbf{D}))^3 + B1\ln(\mathbf{p})$$

$$\ln(\mathbf{BA})= 2.226 + (-1.552)(\ln(\mathbf{D})) + (1.237)(\ln(\mathbf{D}))^2 + (-0.126)(\ln(\mathbf{D}))^3 + (1.068)\ln(\mathbf{p})$$

Fuente: (Yepes et al, 2011)

Variables independientes: diámetro (**D**) y densidad de la madera (**p**).

A través de la consulta en diferentes fuentes bibliográficas, se estableció los valores de la densidad de la madera, tanto de la especie *Coffea arábica L.*, como de las especies forestales identificadas en el inventario (Tabla 2).

Tabla 2 Valores de la Densidad de las plantas de Café (*Coffea arábica L. Variedad Castilla*) y Especies Forestales en la Finca La Pradera del Municipio de Aratoca y finca El Prado del Municipio de Zapátoca, Santander.

Finca La Pradera		Finca El Prado	
Especie	Densidad (g/cm ³)	Especie	Densidad (g/cm ³)
<i>Coffea arabica L</i>	0.91	<i>Coffea arabica L</i>	0.91
<i>Albizia carbonaria</i>	0.56	<i>Erythrina poeppigiana</i>	0.40
<i>Brunellia comocladifolia</i>	0.50	<i>Cedrela odorata L.</i>	0.48
<i>Cassia grandis</i>	0.80	<i>Cordia alliodora</i>	0.46

Tabla 2 (Continuación)

<i>Cedrela odorata</i>	0.60	<i>Erythrina edulis</i>	0.22
<i>Erythrina poeppigiana</i>	0.40	<i>Inga edulis</i>	0.54
<i>Inga codonantha</i>	0.50	<i>Leucaena leucocephala</i>	0.59
<i>Ochroma pyramidale</i>	0.30	<i>Persea americana</i>	0.55
<i>Pinus patula</i>	0.43	<i>Pithecellobium dulce</i>	0.64
<i>Ricinus communis</i>	0.43	<i>Salix humboldtiana</i>	0.40
		<i>Tabebuia rosea</i>	0.54

A partir de los resultados obtenidos en un rango de 0.002 t a 0.003 t para la finca La pradera y de 0.002 t a 0.031 t para la finca El Prado en la aplicación de la ecuación alométrica, se logró establecer mediante la utilización de herramientas estadísticas, graficas de correlación con la finalidad de visualizar el comportamiento de los valores biomasa respecto al DAP para las plantas de *Coffea arábica L.* (Figura 3)

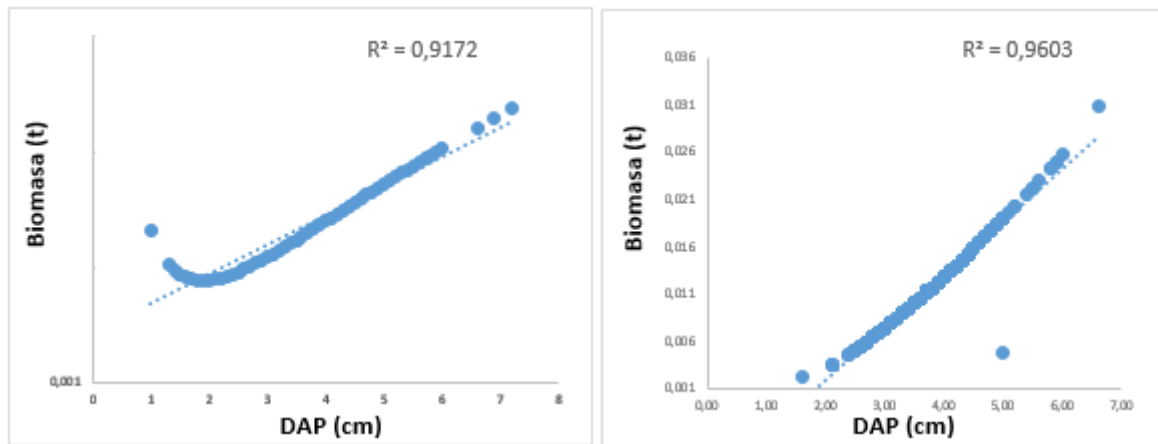


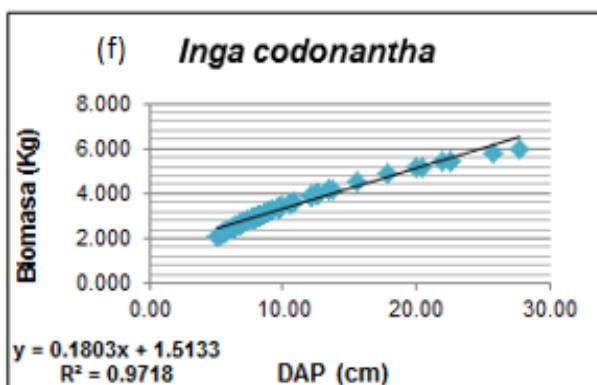
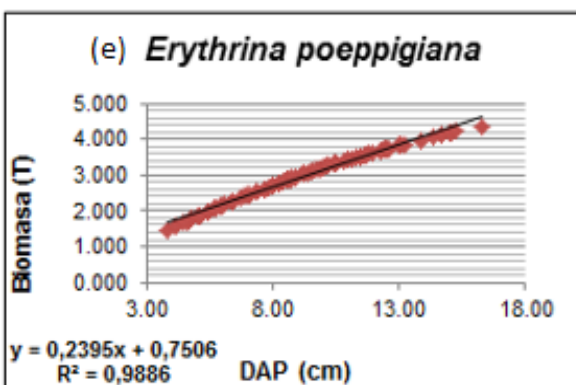
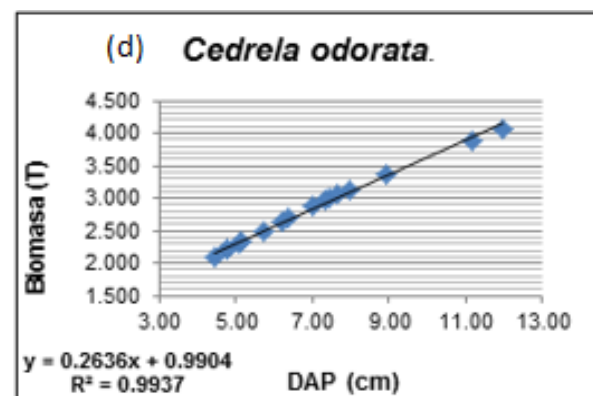
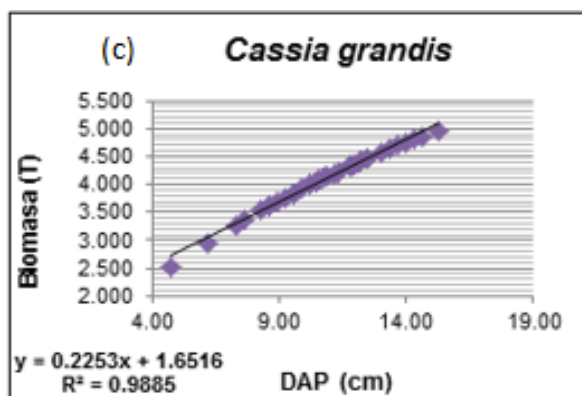
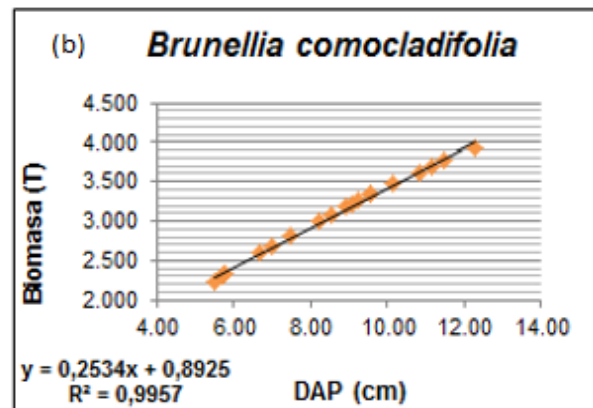
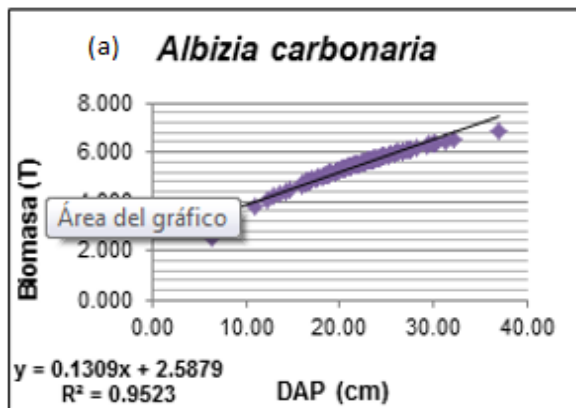
Figura 3 Correlación de DAP vs Biomasa de *Coffea arabica* L. de la finca la Pradera Municipio de Aratoca (Izquierda) y finca El Prado del Municipio de Zapátoca (Derecha), Santander.

La relación estadística entre DAP y biomasa, genera un coeficiente de correlación $R^2 = 0.986$ para la finca La Pradera y $R^2 = 0.9603$ para la finca El Prado, valores que ratifican la existencia de poca variabilidad en los datos obtenidos en los cálculos de cada finca, haciendo confiable los valores de trabajo y análisis. Lo anterior es verificado en la similitud cuantitativa de los datos y las características biológica de los cultivos, ya que para las fincas la pradera y el prado los datos están, DAP entre 1.30 a 7.20 cm y 1.60 a 6.60 cm y biomasa entre 0.002 a 0.003 y 0.002 a 0.031 toneladas respectivamente.

Con un valor igual a 0.986 y 0.9603 de correlación, se puede deducir que existe un vínculo de comportamiento directamente proporcional entre los datos evaluados, pues a mayor diámetro a la altura del pecho, mayor biomasa, sin embargo, es evidente que la tendencia de relación existente entre estas variables, se ve afectada por aquellos datos que están alejados del promedio general.

6.2 Análisis de los resultados de biomasa aérea de las especies forestales

A partir de los resultados obtenidos, en la aplicación de la ecuación alométrica, Se logró establecer mediante la utilización de herramientas estadísticas, gráficas de correlación con la finalidad de visualizar el comportamiento de los valores biomasa respecto al DAP, para las especies forestales.



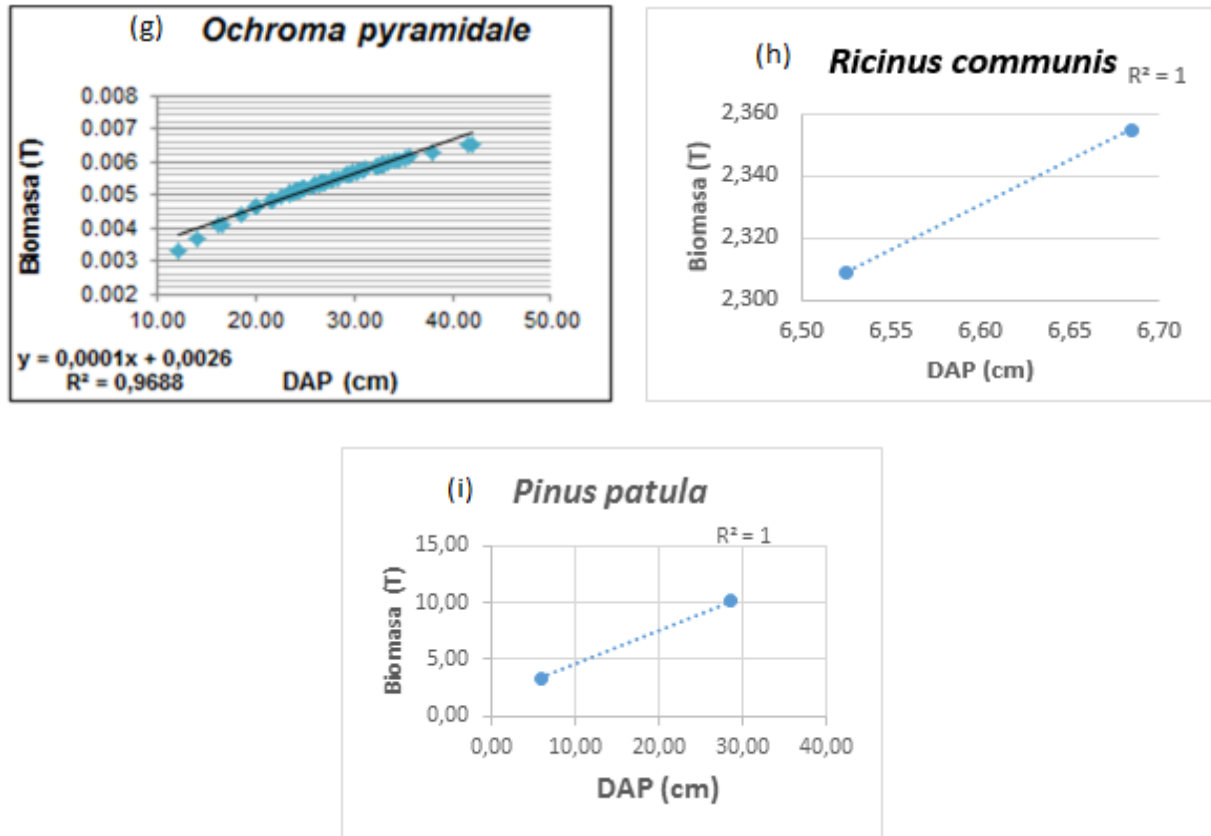


Figura 4 Correlación de DAP vs Biomasa de las especies forestales que se encontraron en la finca la Pradera Municipio de Aratoca, Santander (a) *Albizia Carbonaria* (b) *Brunellia comocladifolia* (c) *Cassia grandis* (d) *Cedrela odorata* (e) *Erythrina poeppigiana* (f) *Inga codonantha* (g) *Ochroma pyramide* (h) *Ricinus communis* (i) *Pinus patula*

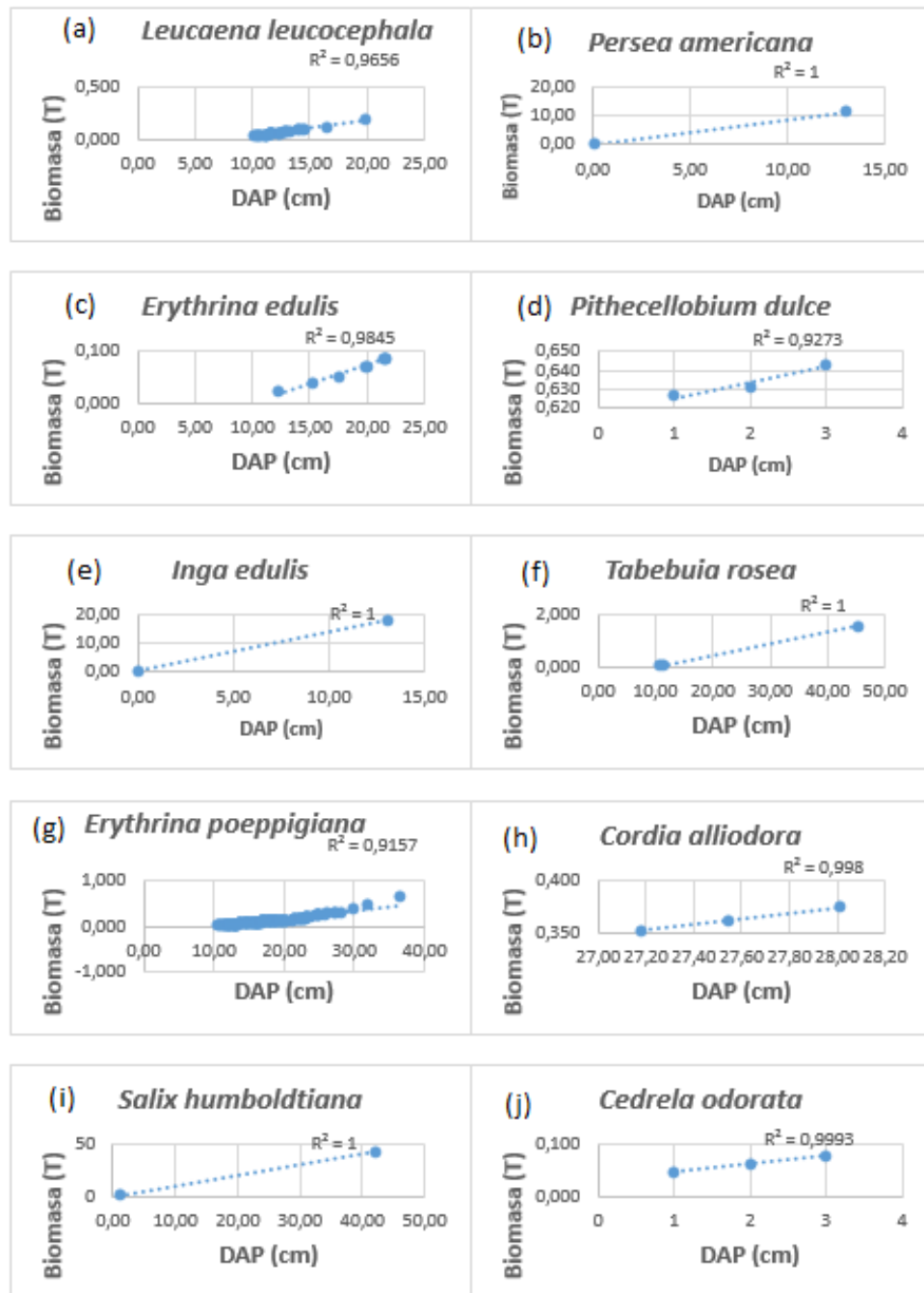


Figura 5 Correlación de DAP vs Biomasa de las especies forestales de la finca El Prado Municipio de Zapátoca, Santander (a) *Leucaena leucocephala* (b) *Persea americana* (c) *Erythrina edulis* (d) *Pithecellobium dulce* (e) *Inga edulis* (f) *Tabebuia rosea* (g) *Erythrina poeppigiana* (h) *Cordia alliodora* (i) *Salix humboldtiana* (j) *Cedrela odorata*

Para la finca La Pradera los valores de correlación existente entre los datos de DAP y biomasa, fue de 0.9523, 0.9957, 0.9885, 0.9937, 0.9886, 0.9718, 0.9688, 1 y 1 para las especies *Albizia carbonaria*, *Brunellia comocladifolia*, *Cassia grandis*, *Cedrela odorata*, *Erythrina poeppigiana*, *Inga codonantha*, *Ochroma pyramidale*, *Pinus patula* y *Ricinus communis* respectivamente, lo que permite deducir un vínculo de relación directamente proporcional entre las variables evaluadas, pues a mayor diámetro a la altura del pecho, mayor biomasa tendrá el individuo, independientemente de la especie forestal (Figura 4).

La especie forestal *Brunellia comocladifolia*, *Ricinus comunis* y *Pinus patual* reflejaron el coeficiente de correlación mayor entre el DAP y la Biomasa con un valor de 0.9957, 1 y 1, respecto a las demás especies evaluadas, debido a que la cantidad de individuos de éstas es baja con solo 19, 2 y 2 ejemplares, los cuales adicionalmente presentan un rango de datos de DAP entre 17 y 38 centímetros, siendo poca la variabilidad de los mismos.

Por el contrario la especie forestal *Albizia carbonaria*, generó el coeficiente de relación más bajo entre las variables anteriormente mencionadas, con un valor igual a 0.9523, a causa precisamente, de la gran proporción de individuos en el terreno de estudio con 132 ejemplares y debido adicionalmente a la alta variabilidad de los datos de DAP entre 34 y 116 centímetros. Aun así, el valor de coeficiente de correlación permite deducir que las variables efectivamente si se relacionan.

Para la finca El Prado los valores de correlación existente entre los datos de DAP y biomasa, fue de 0.9656, 1, 0.9845, 0.9273, 1, 1, 0.9157, 0.998, 1 y 0.9993 respectivamente, deduciendo el vínculo de relación directamente proporcional entre las variables evaluadas, pues a mayor diámetro

a la altura del pecho, mayor biomasa para cada individuo, independientemente de la especie forestal (Figura 5).

La especie forestal *Persea americana*, *Inga edulis*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliodora*, *Salix humboldtiana* y *Cedrela odorata* reflejaron el coeficiente de correlación mayor entre el DAP y la Biomasa con un valor de 1, 1, 0,998, 1 y 0.9993, respecto a las demás especies evaluadas, debido a que la cantidad de individuos de éstas es baja presentándose 2, 2, 3, 3, 2 y 3 respectivamente, los cuales adicionalmente presentan un rango de datos de DAP entre 10, 25 y 45, 20 centímetros, siendo poca la variabilidad de los mismos.

Por el contrario la especie forestal *Erythrina poeppigiana*, generó el coeficiente de relación más bajo entre las variables anteriormente mencionadas, con un valor igual a 0.9157, debido a la gran proporción de individuos en el terreno de estudio con 146 individuos y debido adicionalmente a la alta variabilidad de los datos de DAP entre 10.57 y 36.29 centímetros. Aun así, el valor de coeficiente de correlación permite deducir que las variables efectivamente si se relacionan.

6.3 Caracterización de la capacidad de almacenamiento de carbón orgánico en los sistemas agroforestales en estudio, a partir de la configuración particular de cada cultivo.

En los resultados obtenidos para la finca La Pradera y el Prado se calculó de biomasa aérea, carbono orgánico correspondiente para toda la especie de *Coffea arábica L* (Tabla 3), se trabajó con el valor promedio de DAP de 4 cm de las 1609 plantas de café para la finca La Pradera y de 3,71 cm de las 360 plantas evaluadas para la finca El Prado , con una densidad constante de 0.91 g/m³, el valor obtenido en las variables anteriormente mencionadas se multiplicó por 6700 y 1280 respectivamente, número que hace referencia al total plantas de café en el lote seleccionado para la fincas La Pradera y El Prado.

Respecto a la cantidad de individuos, el orden descendente, de las especies forestales identificadas en el área de estudio, es *Albizia Carbonaria* con 132 ejemplares, *Erythrina poeppigiana* con 124, *Inga codonantha* y *Ochroma pyramidale* con el mismo número de individuos igual a 62, *Cassia grandis* con 39, *Brunellia comocladifolia* con 19, *Cedrela odorata* con 16 individuos respectivamente y finalmente se encuentran las especies *Ricinus communis* y *Pinus patula* con solo 2 ejemplares.

Tabla 3 Datos de biomasa aérea y carbono orgánico de *Coffea arábica L.* para la finca La Pradera del Municipio de Aratoca y la finca El prado para el Municipio de Zapátoca.

Finca	Nombre Científico	Variedad	DAP (cm)	Densidad (g/cm ³)	Cantidad de Plantas	Biomasa Aérea (t)	Carb.Org (t)
LA	<i>Coffea</i>						
PRADERA	<i>arábica L</i>	CASTILLA	4	0,91	6700	16,51	8,26
EL	<i>Coffea</i>						
PRADO	<i>arábica L</i>	CASTILLA	3,71	0,91	1280	2,95	1,48

Los resultados obtenidos a través de este proceso de consolidación estadística para la especie *Coffea arábica L.* fue: biomasa aérea de 16,51 t para la finca La Pradera y 2,95 t para la finca El Prado; carbono orgánico de 8,26 t y 1, 48 t respectivamente.

La cantidad de árboles forestales para la finca La Pradera del Municipio de Aratoca determinada a través del inventario (Tabla 4) y para la finca El Prado del Municipio de Zapátoca (Tabla 5), los resultados obtenidos en la aplicación de la ecuación alométrica para el cálculo de biomasa y

posterior conversión a carbono orgánico, se organizaron de manera consolidada, para cada especie forestal identificada en el área de estudio.

Para la finca La Pradera la especie *Albizia carbonaria*, ocupa el primer lugar en cuanto a valores de cantidad de individuos, biomasa y carbono orgánico, con resultados de 132 individuos, 95,30 t y 47,65 t, respectivamente.

Tabla 4 Cálculos de biomasa y carbono orgánico para los árboles de sombra de la finca La Pradera del Municipio de Aratoca.

<i>NOMBRE CIENTIFICO</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>BIOMASA</i> <i>(t)</i>	<i>CARB.ORG</i> <i>(t)</i>
<i>(T)Albizia carbonaria</i>	132	95,300	47,650
<i>Brunellia</i>			
<i>comocladifolia</i>	19	1,106	0,553
<i>Cassia grandis</i>	39	6,224	3,112
<i>Cedrela odorata</i>	16	0,726	0,363
<i>Erythrina poeppigiana</i>	124	45,736	22,868
<i>Inga codonantha</i>	62	13,183	6,591
<i>Ochroma pyramidale</i>	62	20,607	10,304
<i>Pinus patula</i>	2	0,019	0,009
<i>Ricinus communis</i>	2	0,009	0,005
TOTAL	458	182, 91	91,45

La biomasa, cuantifica el peso en toneladas de los individuos identificados a través del inventario realizado en el área de estudio, durante el presente proyecto de investigación, siendo así

los resultados obtenidos en orden de mayor a menor por especie forestal; la *Albizia Carbonaria* con 95,30 t como especie predominante, seguida de la *Erythrina poeppigiana* con 45,74 t, en tercer lugar la *Ochroma pyramidale* con 20,61 t, posteriormente se encuentra la *Inga codonantha* con un peso de 13,18 t, en quinto lugar la especie *Cassia grandis* con 6,22 t, continua en la lista *Brunellia comocladifolia* con 1,11 t, en sexto lugar se encuentra la especie *Cedrela odorata* con 0,73 t, en el penúltimo lugar se ubica la *Pinus patula* con 0,019 t y finalmente la especie *Ricinus communis* con 0,009 t.

Para la finca El Prado la especie *Erythrina poeppigiana*, ocupa el primer lugar en cuanto a valores de cantidad de individuos 146, pero su valor en biomasa es de 0,111 t pero por la cantidad de individuos no es la mayor, las especies con mayor biomasa son *Salix humboldtiana*, *Pithecellobium dulce* y *Tabebuia rosea* con valores de 0,956, 0,627 y 0,546 t respectivamente, sucede igual con el carbono orgánico para *Erythrina poeppigiana* es de 0,056 t pero las especies con mayor carbono orgánico son *Salix humboldtiana*, *Pithecellobium dulce* y *Tabebuia rosea* con valores de 0,478, 0,313 y 0,273 t respectivamente.

Según la Figura 6 la especie forestal representativa para la finca La Pradera, en cuanto a cantidad de individuos, biomasa y carbono orgánico, fue la *Albizia Carbonaria*: así como observamos en la figura 6a. Así como, la especie forestal representativa para la finca El Prado en biomasa y carbono orgánico fue *Salix humboldtiana*, reflejando así el concepto de que a mayor DAP, mayor capacidad de captura de carbono (Figura 6b).

Tabla 5 Cálculos de biomasa y carbono orgánico los árboles de sombra de la finca El Prado del Municipio de Zapátoca.

NOMBRE CIENTIFICO	CANTIDAD	BIOMASA (t)	CARB.ORG (t)
<i>Leucaena leucocephala</i>	31	0,064	0,032
<i>Persea americana</i>	2	0,056	0,028
<i>Erythrina edulis</i>	8	0,064	0,032
<i>Cedrela odorata</i>	3	0,047	0,023
<i>Pithecellobium dulce</i>	3	0,627	0,313
<i>Inga edulis</i>	2	0,105	0,052
<i>Tabebuia rosea</i>	3	0,546	0,273
<i>Erythrina poeppigiana</i>	146	0,111	0,056
<i>Cordia alliodora</i>	3	0,351	0,176
<i>Salix humboldtiana</i>			
Willd.	2	0,9559	0,478
TOTAL	203	2,926	1,463

Seguidamente se encuentran las especies *Erythrina poeppigiana* y *Ochroma pyramidale* respectivamente, con valores aproximados en cuanto a biomasa y carbono orgánico, sin embargo se puede observar que a pesar de que la cantidad de individuos en esta última especie, refleja casi el 50% menos de la referente, continua siendo el DAP la variable determinante de los resultados obtenidos para la finca La Pradera del municipio de Arátoca.

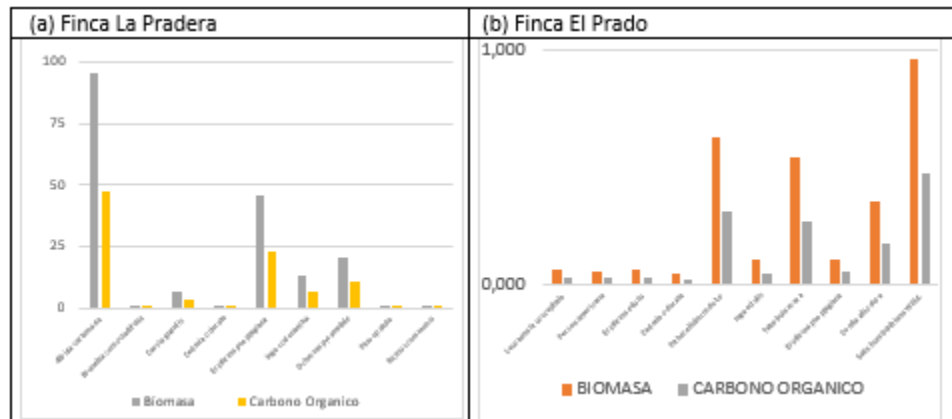


Figura 6. Datos de Biomasa y Carbono orgánico por especie de los árboles de sombra (a) Finca la Pradera (b) Finca el Prado

La especie forestal de menor representatividad presente en la finca La Pradera, en cuanto a las variables evaluadas en la imagen anterior, fue la *Ricinus communis*, debido a la mínima cantidad de individuos, y principalmente a que los datos de DAP con valores muy bajos, respecto a las demás especies, igualmente, se puede observar y comparar la especie *Ricinus communis* con la *Pinus patula*, como otro ejemplo de que los resultados obtenidos dependen netamente de los valores de DAP. (Figura 6a). En cambio en la finca El Prado del Municipio de Zapatoca la especie con menor valor respecto a las variable evaluadas presente en la figura 6b fue *Cedrela odorata* con los valores más bajos pero con la presencia de tres individuos, lo contrario a lo presentado por *Salix humboldtiana* que tiene presente dos individuos con los valores más altos en las variables evaluadas.

Teniendo en cuenta el análisis de la eficiencia del ecosistema agroforestal, la proporción porcentual en captación de carbono que se almacena en el área de estudio, se puede observar que para la finca La Pradera del Municipio de Arátoca la especie *Albizia carbonaria* representa un 52%, duplicando la equivalencia porcentual de la segunda especie, la cual en este caso es la *Erythrina poeppigiana* con un 25%, valor muy cercano al que refleja la especie *Ochroma*

pyramidale con el 11%, posteriormente se encuentra la *Inga codonantha* y la *Cassia grandis* con 7 y 4 %, respectivamente, finalmente la proporción dada por las especies de menor predominancia *Brunellia*, *Cedrela* con 1% por ultimo *Pinus patula* y *Ricinus communis* se al 0%, respectivamente (Figura 7).

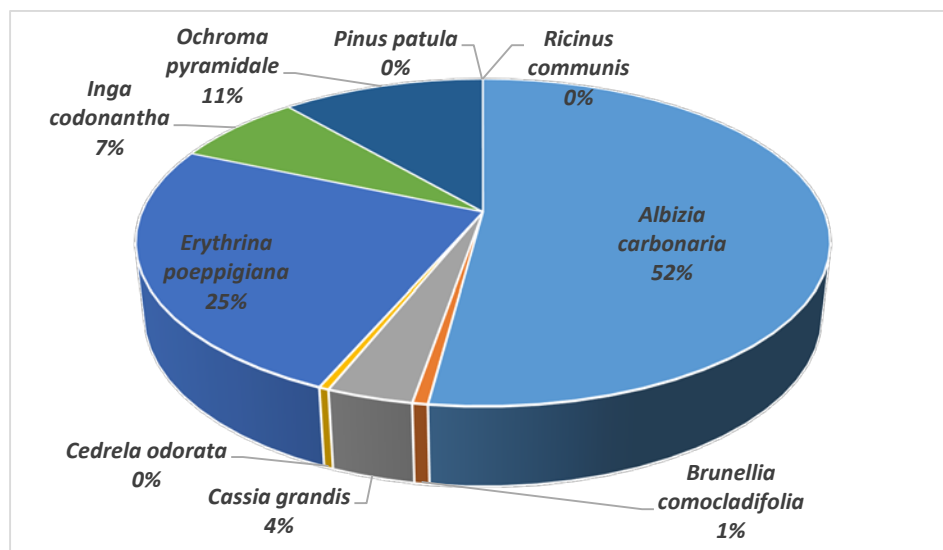


Figura 7 Equivalencia porcentual por especie forestal para la finca La Pradera del Municipios de Arátoca.

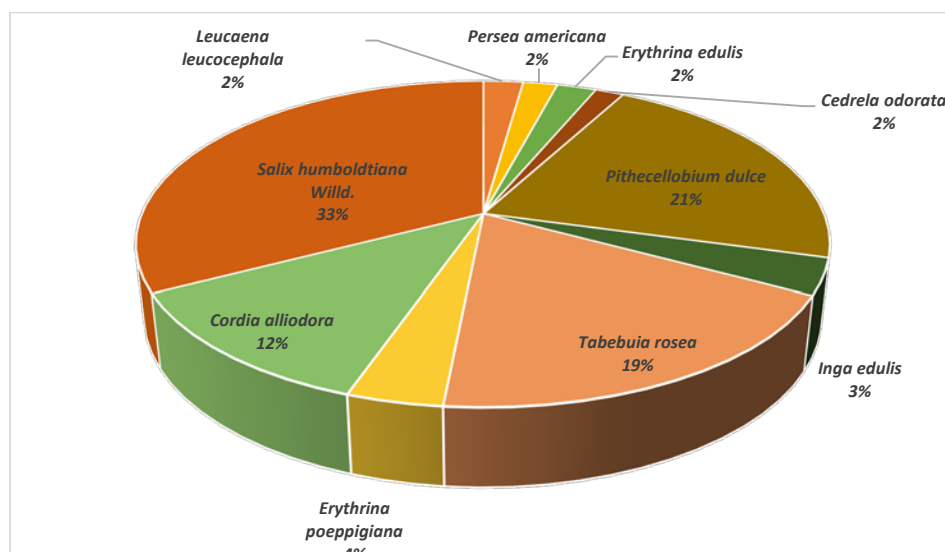


Figura 8 Equivalencia porcentual por especie forestal para la finca El Prado del Municipio de Zapátoca.

Para la finca El Prado el análisis de la eficiencia del ecosistema agroforestal, la proporción porcentual en captación de carbono que se almacena en el área de estudio, se puede observar que la especie *Salix humboldtiana* es del 33%, para las especies *Pithecellobium dulce* y *Tabebuia rosea*, *Cordia alliodora* es de 21, 19 y 12 % respectivamente. Para las especies *Erythrina poeppigiana* e *Inga edullis* es de 4 y 3%, mientras que *Leucaena leucocephala*, *Persea americana*, *Erythrina edulis* y *Cedrela odorata* en cada una de estas especies es del 2% (Figura 8).

Como resultado final carbono orgánico capturado en el sistema agroforestal de *Coffea arabica* L., se realizó mediante la sumatoria de los valores obtenidos en el cálculo de carbono orgánico en toneladas (tabla 5 y 6), tanto de los árboles de sombra como de las plantas de café, el cual se ve reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 5 Sumatoria de los valores obtenidos para la finca La Pradera del Municipio de Arátoca.

NOMBRE	CANTIDAD	BIOMASA (t)	CARB.ORG (t)	PORCENTAJE EQUIVALENTE (%)
Arboles Forestales	458	182,91	91,46	91,72
Plantas de café	6700	16,51	8,26	8,28
TOTAL	7158	199,42	99,72	100,00

Tabla 6 Sumatoria de los valores obtenidos para la finca El Prado del Municipio de Zapátoca

NOMBRE	CANTIDAD	BIOMASA (t)	CARB.ORG (t)	PORCENTAJE EQUIVALENTE
Arboles				
Forestales	203	2,93	1,46	49,66
Plantas de café	1280	2,95	1,48	50,34
TOTAL	1483	5,88	2,94	100

Es decir, que el valor total de captura de carbono a través del SAF evaluado corresponde a 99,72 toneladas por hectárea, del cual el 8,28% corresponde a la captura realizada por las plantas de café y el 91,72% restante a las especies forestales encargadas de proporcionar sombra correspondiente a la finca La Pradera; así como para la finca El Prado el valor total de captura de carbono es 2,94 toneladas por hectárea el cual sería el 50,34% por captura realizada por plantas de café y el 49,66% restante corresponderá a las especies forestales, comparados con los datos obtenidos por Kursten y Burschel (1993), que calcularon cerca de 14 a 52 t.ha-1 de carbono (C) son almacenadas en la biomasa de la parte aérea de los árboles de sombra en asocio con plantaciones de café y cacao, para la finca La Pradera los cálculos estarían muy por encima, pero se relacionaría más con los datos de la finca El Prado.

Ávila et al. (2001), evaluaron el almacenamiento y fijación de carbono (C) en los sistemas agroforestales café (*Coffea arábica*) con *Eucalyptus deglupta*, de 4, 6 y 8 años de edad; café con *Erythrina poeppigiana*, y en monocultivos de café, presentándose una fijación de C del componente arbóreo entre 0,4 y 2,2 t.ha-año-1. Algo muy parecido para la finca el Prado y teniendo especies parecidas de maderables.

6.4 Incidencia de la capacidad de captura de CO₂ sobre la rentabilidad comercial del arreglo agroforestal

En el arreglo agroforestal café-madera en estudio, el análisis final de sus condiciones ecológicas y ambientales, se centra en un fin comercial, para identificar como el aprovechamiento de sus recursos naturales, genera una ganancia económica.

El SAF, debe valorarse económicamente, aquí se propone hacerlo por tres productos comercializables: la producción cafetera, la producción forestal en las especies de sombrío y la comercialización de carbono capturado.

Estos elementos cuentan ya todos con mercados establecidos que permiten conocer sus costos de comercialización, café y madera, tiene mercados tradicionales, el carbono es un mercado relativamente nuevo, a partir de asignación de valoración económica. Entonces, se puede estimar cual deberá ser el ingreso de un arreglo agroforestal, por productos tradicionales y sumar la comercialización de su captura de carbono.

Se toma, el precio de compra y comercialización del café Septiembre de 2016*, teniendo en cuenta promedio general mensual de los datos presentados por el Comité Nacional de Cafeteros. De las bases de datos de Agronet¹, se deduce que la producción promedio de café por hectárea en el departamento de Santander es de 0,85 toneladas,(Agronet 2016) para septiembre de 2016 Santander produjo cerca de 3.969,75 toneladas (Tabla 8), con una estimación de producción de 14.07 sacos de 60 kilos de café por hectárea, u 850 kilos de café por hectárea.

Para estimar el ingreso económico que recibe el productor primario, se asume el precio de venta estimado por la Federación Nacional de Cafeteros, a septiembre de 2016, en un valor promedio de

* Se analizan datos en este mes, para coincidir con la época de toma de datos de campo en el SAF

¹ Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia, liderada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

\$ 862.667,67, por carga de 125 kilos de café². Por consiguiente el ingreso total percibido por un cultivador, asumiendo la producción promedio en 850 kilos por hectárea, se obtiene en \$ 5.866.133,36.

Por otra parte, pero en la cadena del café, los costos de comercialización se asumen como referencia al precio internacional, determinado por la OIC³, el cual consigna en su informe del mercado a Septiembre de 2016, una subida modesta en el precio indicativo compuesto diario de la OIC, ya que se situó por poco tiempo en el nivel más alto en 19 meses de 141,69 centavos, pero consolidando un promedio mensual de 138,22 centavos, un 5,5% más alto que el de agosto y el más alto desde febrero de 2015.

Tabla 7 *Precio indicativo por grupo OIC para el mes de septiembre 2016*

Septiembre 2016 ⁴ precio por Libra	Precio del indicador compuesto OIC	Nueva York	Alemania	Promedio ponderado
Dólar	1,38	1,68	1,70	1,69
Pesos Col	\$ 3.907,63	\$ 4.753,28	\$ 4.798,83	\$ 4.773,53

Los valores están expresados en dólares por libra, al hacer la conversión a pesos colombianos⁵ del precio de la libra a septiembre 2016, se obtiene en \$ 3907.63. Esto llevado a la producción de café promedio por hectárea, muestra que el precio de comercialización internacional puede darse en \$ 6.642.971,00 a septiembre de 2016.

² Valor promedio precio interno del café septiembre 2016, tomado de: https://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

Enlaces: 3. [Precio interno base - mensual desde 1944](#), 4. [Precio interno base - diario desde 2003](#)

³ Organización Internacional del Café

⁴ https://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

Enlace: Exportaciones Colombiana de Café.

⁵ Valor promedio del dólar septiembre 2016, tomado de:

<http://dolar.wilkinsonpc.com.co/dolar-historico/dolar-historico-2016.html>

Así las cosas, la rentabilidad neta de una hectárea de café, puede estar tasada en \$776.837,64 una rentabilidad excesivamente baja para soportar calidad de vida de los agentes de la cadena del café. Y si se entiende que esta rentabilidad se obtiene después de la venta final no es ilógico suponer que esta baja ganancia no llegara al cultivador.

Con las especies forestales se trabaja un valor promedio general de posible ingreso percibido por el cultivador, si aprovechará esta madera. Para esto, se estimó la cantidad de madera de cada especie forestal de sombrero, por mercadeo simple se indago el costo de comercialización de la madera y se consolido un valor total de ingreso económico por la madera existente en el sombrero del SAF. A continuación se listan las especies forestales existentes y se calculan los datos para cada finca en estudio.

Tabla 8 *Valores Comerciales de Ingreso económica para cada especie maderable del SAF, de la Finca La Pradera del Municipio de Arátoca, Santander.*

NOMBRE CIENTIFICO	Abundancia	Volumen Comercial (pies)	Valor Comercial (pesos*pie)	Ingreso económico
<i>Albizia carbonaria</i>	132	0,025	750	18,8
<i>Brunellia comocladifolia</i>	19	0,001	750	0,8
<i>Cassia grandis</i>	39	0,002	750	1,5
<i>Cedrela odorata</i>	16	0,000	800	0,000
<i>Erythrina poeppigiana</i>	124	13,822	750	10366,5
<i>Inga codonantha</i>	62	0,003	850	2,6
<i>Ochroma pyramidale</i>	62	0,019	900	17,1
<i>Pinus patula</i>	2	0,000	1000	0,000
<i>Ricinus communis</i>	2	0,000	750	0,000
TOTAL	458	13,872	-	10407,2

Realizando el estudio de ingreso económico por maderables dentro del SAF de la Finca La Pradera del Municipio de Aratoca, se obtiene un valor de 10.407,2 pesos; presentando el valor más alto *Erythrina poeppigiana* con un valor de 10.366,5 pesos, las especies de *Pinus patula*, *Cedrela odorata* y *Ricinus communis* no tienen valor comercial, esto es debido a que la madera no ha alcanzado en cultivo su tamaño representativo para utilización comercial (Tabla 8).

Tabla 9 Valores Comerciales de Ingreso económica para cada especie maderable del SAF, de la Finca El Prado del Municipio de Zapátoca, Santander.

NOMBRE CIENTIFICO	Abundancia	Volumen Comercial (pie)	Valor Comercial (pie)	Ingreso económico
<i>Leucaena leucocephala</i>	31	0,002	3400	6,8
<i>Persea americana</i>	2	0	850	0
<i>Erythrina edulis</i>	8	0,001	750	0,75
<i>Cedrela odorata</i>	3	0	1700	0
<i>Pithecellobium dulce</i>	3	0,001	900	0,9
<i>Inga edulis</i>	2	0	1100	0
<i>Tabebuia rosea</i>	3	0,001	3800	3,8
<i>Erythrina poeppigiana</i>	146	0,018	750	13,5
<i>Cordia alliodora</i>	3	0,001	1700	1,7
<i>Salix humboldtiana</i>	2	0,001	750	0,75
TOTAL	203	0,025	-	28,2

El ingreso económico por maderables dentro de SAF para la finca El Prado del Municipio de Aratoca, observamos un total de 28,2 pesos; presentando el valor más alto *Erythrina poeppigiana* con un valor de 13,5 pesos, las especies de *Persea americana*, *Cedrela odorata* e *Inga edulis* no tienen valor comercial, esto es debido a que la madera no ha alcanzado en cultivo su tamaño representativo para utilización comercial (Tabla 10).

Dados los volúmenes de maderables en el sombrío del SAF, su representatividad económica no es significativa dentro de las posibilidades de ingresos del cultivador. Aun así, teniendo presente que el cultivo tiene 5 años de siembra, estos maderables podrán tener una significancia económica en la medida en que el cultivo mantenga su productividad.

A continuación se muestran el valor de comercialización de unidad de producción que se estima para cada uno de los tres aspectos a cuantificar en el SAF.

Tabla 10 *Valor de comercialización de unidad de producción que se estimas para cada uno de los tres aspectos cuantificados en el SAF.*

ELEMENTO A VALORAR	UNIDAD DE COMERCIALIZACIÓN	VALOR DE REFERENCIA
Producción Cafetera	Carga (125kg)	\$ 862.667,67 cultivador \$ 976.907,5 comercialización
Producción maderable	Pies	Costo general de cada finca en estudio
Carbono Capturado	Tonelada ⁶	€ ⁷ 5,67 = \$ 18.599,301

A partir de los valores anteriores y teniendo la producción de cada SAF en estudio, podemos determinar el valor de comercialización de estos cultivos

⁶ Referencia estadística a partir del valor medio estimado por diferentes agentes comerciales de bonos de carbono. <http://es.investing.com/> : € 5.67; <http://www.sendeco2.com/es/precios-co2> : € 5.68

⁷ Se toma el precio de referencia del Euro a Septiembre 2016 en 3.280,30 \$/ €

Tabla 11 *Valor de comercialización de unidad de producción que se estimas para cada uno de los tres aspectos cuantificados en el SAF de las fincas La Pradera y El Prado.*

FINCA DE ESTUDIO	ELEMENTO	PRODUCCIÓN	VALOR COMERCIAL
La pradera	Café	25 cargas	\$ 21.566.666,67 cultivador \$ 24.422.687,5 comercializa
	Forestal	Pies	\$ 10.407,2
	Carbono	99,72 t/h	\$ 1'854.722,3
El prado	Café	12 cargas	\$ 10.352.000,0 cultivador \$ 11.722.890,0 comercializa
	Forestal	Pies	\$ 28,2
	Carbono	2,94 t/h	\$ 54.681,95

Entonces, los valores finales, café (cultivador) + madera + carbono, permiten estimar el ingreso económico total del SAF, directos para el productor, para la finca La Pradera: 23'431.796,2 y la para la finca el prado: 10'406.710,2.

Es de señalar que el ingreso por comercialización de la madera, no será percible en cada cosecha, dado que el sombrío es permanente durante todo la vida productiva del cultivo de café, pero estimado al momento de estudio, sí se toma su valor como asociado a la cosecha, además, el valor del carbono debe reconocérsele al cultivador, puesto que es él quien propicia la biomasa que captura el GEI.

Conclusiones

- Los resultados obtenidos a través de este proceso de consolidación estadística para la especie *Coffea arábica L*, fue: biomasa aérea de 16,51 t para la finca La Pradera y 2,95 t ha para la finca El Prado; carbono orgánico de 8,26 t y 1, 48 t ha respectivamente.
- Para la finca La Pradera la especie *Albizia carbonaria*, ocupa el primer lugar en cuanto a valores de cantidad de individuos, biomasa y carbono orgánico, con resultados de 132 individuos, 95,30 t y 47,65 t ha, respectivamente. Para la finca El Prado la especie con mayor biomasa son *Salix humboldtiana* con valores de 0,956 t y con valor de carbono orgánico de 0,478 t ha.
- El valor total de captura de carbono a través del SAF evaluado corresponde a 99,72 toneladas por hectárea, del cual el 8,28% corresponde a la captura realizada por las plantas de café y el 91,72% restante a las especies forestales encargadas de proporcionar sombra correspondiente a la finca La Pradera; así como para la finca El Prado el valor total de captura de carbono es 2,94 toneladas por hectárea el cual sería el 50,34% por captura realizada por plantas de café y el 49,66% restante corresponderá a las especies forestales.
- Dados los volúmenes de maderables en el sombrío del SAF, su representatividad económica no es significativa dentro de las posibilidades de ingresos del cultivador. Aun así, teniendo presente que el cultivo tiene 5 años de siembra, estos maderables podrán tener una significancia económica en la medida en que el cultivo mantenga su productividad.
- Un Importante mecanismo para la conservación de los recursos naturales, lo constituye la valoración económica de estos, el mercado de los productos extraídos, es un indicador de los medios de bienestar económico, que la correcta protección y aprovechamiento de estos, puede generar. En el proyecto se analiza el ingreso económico de un SAF, identificado tres variables: producción de café + madera de sombrío + captura de carbono en la biomasa, esta suma permite

representar al cultivador el bienestar económico a obtener por el aprovechamiento integral de su cultivo. Los ingresos generados por el café, son fácilmente tasables, puesto que el conceso mundial ha estimado el mercado del café. Para la madera de sombrío, se estiman los precios de venta de cada especie de madera presente, en el SAF analizado, la cobertura de maderables, no aporta significativamente a sus ingresos económicos, no porque estos maderables no tengan potencial comercial, sino porque a la edad de siembra del cultivo, cinco años, los maderables aún no tienen una constitución física de la cual extraer madera de usos comerciales. Esta madera podrá valorarse en la medida en que el tiempo de siembra del cultivo avance y los maderables de sombra se constituyan en arboles con madera efectivamente comercializable. Por su parte, la captura de carbono en la biomasa del SAF, tiene una posibilidad económica que debe ser reconocida al cultivador, la reconversión de gas carbónico, por oxígeno, es un proceso vital para el hombre y las condiciones atmosféricas del globo, al mostrar este beneficio en ingresos económicos, se debe lograr que los cultivadores se motiven para potenciar las características de su cultivo, si bien en el cultivo estudiado, la ganancia puede pensarse baja, este ingreso adquiere significancia al ser un adicional no pretendido por el cultivador, pero si ganado a través de la calidad de los procesos agrícolas aplicados para la producción del café. Por consiguiente, el ingreso económico posible para un cultivador de café en técnica de sombrío, lo debe constituir, el ingreso económico por venta del café, más el ingreso económico posible de la comercialización de la madera de sombrío, más la posibilidad económica de comercialización de carbono capturado en la biomasa total del SAF

- La captura de carbono en la biomasa de un SAF debe valorarse económicamente para lograr una representatividad social de este servicio ambiental. Para esto, debe cuantificarse la captura de carbono en biomasa de café y en la biomasa en sombríos, asignando toda esta captura, como

generada por el café, dado que el material de sombrío, existe con la intención de potenciar la producción cafetera, por esto, así como se conoce que el café en sombrío tiene características diferentes a las del café en exposición solar, la valoración económica de las potencialidades o capacidades del sombrío, deben reconocérsele al café. En cuanto a la captura de carbono, se debe llevar a mercados internacionales, el total de captura del arreglo agroforestal, sin discriminar la clase de biomasa que capture, así el cultivador obtiene una mayor retribución económica, ya que no solo depende de la protección y buen manejo que dé al café específicamente, sino que también verá reflejado su dedicación al material forestal de sombrío, en los beneficios económicos que perciba.

- Al analizar los maderables de sombrío, se evidencia que la especie con mejor eficiencia para captura de carbono es *Tabebuia rosea*, además de tener un buen precio de comercialización como madera. Resultaría importante que los cultivadores cafeteros aumentaran la presencia de estas especies en su SAF, para que sus ingresos percibidos a futuro puedan tener una mayor valoración, dado que se tendría mayores niveles de toneladas de carbono por hectárea a comercializar y por consiguiente mayor ingreso económico percibible. Por su parte, especies como *Erythrina poeppigiana*, poco aportan en los servicios ambientales del SAF, dado que no tiene niveles apreciables de captura de carbono y los precios de comercialización de su madera tampoco son significativos, estas especies pueden omitirse del cultivo y ser reemplazadas por otras, que manteniendo la condición de sombrío, generen mejores valoraciones de captura de carbono y comercialización de la madera.

Divulgación de los resultados

Los resultados serán divulgados a través de un artículo publicado en una revista indexada en Publindex.

Bibliografía

- Acosta Mireles, M. (2003). Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México.
- Aguilar, J. S., Castillo, E. M., & Guerrero, G. A. O. (2009). Procesos de certificación de proyectos de captura de gases de efecto invernadero (GEI) En los Mercados Internacionales de Carbono. *Gestión y Ambiente*, 12(3), 07-20.
- Albrecht, A. & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ*, 99, 15-27.
- Ambiente, V., & de Análisis Económico, G. (2008). Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales.
- Angelsen, A. (Ed.). (2008). Moving ahead with REDD: issues, options and implications. Cifor.
- Ávila, G., Jiménez Otárola, F., Ibrahim, M., & Beer, J. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica.
- Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba Chávez, E. & Jiménez Otárola, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales.
- Benzing, A., Bullón Amés, J., Soto, L., Rosalem, C. A., Machado, J. R., Michan, M. M. & Daghlán, C. (2001). *Agricultura orgánica-fundamentos para la región andina* (No. F08-11)
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental pollution*, 116, 363-372.

Callo-Concha, D., Krishnamurthy, L. & Alegre, J. (2002). Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos. *Revista Chapingo: Ciencias Forestales y Medio Ambiente*, 8, 101-106.

Camino, E. R., Ruggeroni, J. R. & Hernández, F. H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Tiempo y Clima*

Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J. & Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17, 133-143.

Castellanos, N. M. (2009). Monitoreo y evaluación de captura de CO₂ en especies nativos de Bosque Andino - caso parque ecológico La Poma, Universidad Industrial de Santander. *Universidad Industrial de Santander*

Centro de Educación Superior e Investigación sobre Agricultura Tropical de Costa Rica. (2002) Centro de Estudios e Investigaciones del Café, Colombia

Ciesla, W. M. (1996). Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. *Food & Agriculture Org*, 126

Connolly Wilson, R. Y., & Corea Siu, C. A. (2007). Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA).

Contreras, D. P., & Carranza, C. C. (2007). Estimación del servicio ambiental de captura del CO₂ en la flora de los humedales de Puerto Viejo. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 10(20), 49-59.

- Convención sobre el cambio climático. (1998). Secretaría del Cambio Climático por la Oficina de Información del PNUMA sobre las Convenciones. *Bonn, Alemania*.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B. & Raskin, R. G. (1998). The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological economics*, 25(1), 67-72.
- Dixon, R. (1995). Agroforestry systems: sources of sinks of greenhouse gases? *Agrofor. Syst.* 31, 99-116.
- Echarri Prim, L. (1998). Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. *España, Ed. Teide. Argentina*.
- Eguren, L. (2004). El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. *United Nations Publications*, 83
- Elbers, J. (2013). La Cumbre Climática de Copenhague versus el cambio climático real. Letras Verdes. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (6), 16-18.
- Escobar, D. (2015). Comunicar el cambio climático en España: breve análisis de algunas campañas y propuesta creativa de acción publicitaria online.
- Esquivel, E. (2005). Uso de suelo y almacenamiento de carbono en dos comunidades del municipio de Marqués de Comillas, Chiapas
- Evitada, D. Una Guía REDD+ Colombia. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*.
- Farfán, V. (2014). Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café. Manizales, Caldas (Colombia)

Gleissman, S. R. (2002). Agroecología: Procesos ecológicos en la agricultura sostenible. *CATIE*.

San José, Costa Rica.

<http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/culturalservices/es/>

Iglesias, J. M. (1999). Sistemas de producción agroforestales. Conceptos generales y definiciones.

Pastos y Forrajes, 22(4).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.

Instituto de la Potasa y el Fósforo, Quito (Ecuador)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). Climate change 2014: mitigation of climate change. *Cambridge University Press*, 4.

Isaza, C. (2014). Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas.

Jackson, J., & Ash, A. J. (1998). Tree-grass relationships in open eucalypt woodlands of northeastern Australia: influence of trees on pasture productivity, forage quality and species distribution. *Agroforestry systems*, 40(2), 159-176.

Kotto-Same, J., Woomer, P. L., Appolinaire, M. & Louis, Z. (1997). Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agric. , Ecosyst. Environ*, 65, 245-256.

Krishnamurthy L., Uribe Gómez M., eds. Tecnologías Agroforestales para el Desarrollo Rural Sostenible. México: PNUMASEMARNAT, 159-182.

Kürsten, E., & Burschel, P. (1993). CO₂-mitigation by agroforestry. In Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes Quantification of Sinks and Sources of CO₂. *Springer Netherlands*, 533-544

Lafferriere, R. (2008). *El mecanismo de desarrollo limpio del Protocolo de Kyoto*; Lulu. com

Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología aplicada*, 3, 35-44.

McVay, K., & Rice, C. W. (2005). El carbono orgánico del suelo y el ciclo global del carbono. Conociendo el suelo. *Revista técnica de la AAPRESID*, 5-8.

Medina, B., López, E. & Alvarado, J. (1998). Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agro ecosistema Café en Guatemala.

Mena, V. E., Castañeda, H. J. A., & Delgado, J. M. (2013). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Revista Agroforestería Neotropical*, 1(1).

Montagnini, F. (2015). Función de los sistemas agroforestales en la. *Sistemas agroforestales*, 269.

Montagnini, F. P. (2004). Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agrofor. Syst*, 61, 281-295.

Murthy, I. K., Gupta, M., Tomar, S., Munsu, M., Hegde, R. T. G. & Ravindranath, N. (2013). Carbon sequestration potential of agroforestry systems in India. *Journal of Earth Science & Climatic Change*

Nair, P. R., Nair, V. D., Kumar, B. M. & Haile, S. G. (2009). Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ. Sci. & Policy*, 12, 1099-1111.

- Nyberg, G., & Högborg, P. (1995). Effects of young agroforestry trees on soils in on-farm situations in western Kenya. *Agroforestry systems*, 32(1), 45-52.
- Oelbermann, M. & Voroney, R. P. (2007). Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecol. Eng.*, 29, 342-349.
- Olaya Peláez, Á. (2016). La Cumbre de la Tierra París 2015-COP21. Un reto ineludible. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 34(1).
- Pandey, D. N. (2002). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate policy*, 2, 367-377.
- Pico, J. (2011). Evaluación de servicios ambientales en sistemas agroforestales con café en fincas bajo diferentes tipos de certificaciones en turrialba, costa rica. *Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza escuela de posgrado*. Turrialba, Costa Rica.
- Protocolo de Kyoto, de la Convención, P. D. K. (1997). Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. 1997. *Recuperado de: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>*.
- Quiñónez Collazos, L. Y. (2010). Gestión forestal urbana como mecanismo de captura de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá DC.
- Ramírez, N. F. F., del Carmen Mendizábal-Hernández, L. & Alba-Landa, J. (2012). Potencial de Captura y Almacenamiento de CO₂ en el Valle de Perote. Estudio de caso: *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis* DK Bailey. *Foresta Veracruzana*, 14, 17-22.

- Reichle, D., Houghton, J., Kane, B., Ekmann, J., Benson, S., Clarke, J., Dahlman, R., Hendrey, G., Herzog, H. & Huntercevera, J. (1999). Carbon sequestration: State of the science: US Department of Energy. *Offices of Science and Fossil Energy*
- Ruíz García, A. (2002). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua
- Sainz de Murieta, E., Neumann, M. B., & Markandya, A. (2014). Quinto informe de evaluación (AR5) del GT-II del IPPC: aumentando el espacio de las soluciones para la adaptación
- Sampieri, R. H., Collado, C. F. & Lucio, P. B. (1996). Metodología de la investigación. *Edición McGraw-Hill*
- Schoeneberger, M. M. (2009). Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agrofor. Syst.*, 75, 27-37.
- Sinclair, F. L. (2004). Agroforestry. *Encyclopedia of forest sciences*
- Solomon, S. (Ed.). (2007). Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. *Cambridge University Press*, 4
- White, D. & Minang, P. (2011). Estimación de los costos de oportunidad de REDD Manual de capacitación.
- Yepes, A., Navarrete, D., Duque, A., Phillips, J., Cabrera, K., Álvarez, E., García, M. & Ordoñez, M. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia. *Bogotá DC, Colombia*, 162.

Zamora, J. C. (2003). Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido “La majada” municipio de Peribán de Ramos, Michoacán. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México