

**Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas**

**Carlos Hernando Isaza Ramírez**  
**Ingeniero Agronomo.**

**Universidad de Manizales**

**Manizales**

**2014**



**Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas**

**Carlos Hernando Isaza Ramírez**

**Ingeniero Agronomo.**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.**

**Francisco Javier Bustamante Gañan**

**Ingeniero Agrónomo. Magister en Administración Económica y Financiera**

**Asesor de trabajo de Grado**

**Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente**

**Universidad de Manizales**

**Manizales**

**2014**



## TABLA DE CONTENIDO

Paj.

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	CONTEXTO DEL PROBLEMA .....	13
3.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	15
4.	OBJETIVOS.....	16
5.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	17
5.1	CAMBIO CLIMÁTICO Y CARBONO: GENERALIDADES .....	17
5.2	CAMBIO CLIMÁTICO: CONSECUENCIAS EN LA AGRICULTURA Y LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ .....	20
5.3	MEDIDAS DE MITIGACIÓN POSIBLES Y ALTERNATIVAS DE MANEJO .....	24
5.4	CICLO DE CARBONO .....	27
5.5	DEPÓSITOS DE CARBONO.....	29
5.6	FACTORES QUE AFECTAN LA DINÁMICA DEL CARBONO EN EL SUELO.....	31
5.7	SECUESTRO Y FIJACIÓN DE CARBONO .....	33
	Fijación basada en el proceso natural de la fotosíntesis y la conversión de dióxido de carbono atmosférico en biomasa, materia orgánica del suelo o humus y otros componentes de la biosfera terrestre. ....	34
5.8	LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN CAFÉ .....	36
	Beneficios de los sistemas agroforestales. ....	38
5.9	BALANCE DE CARBONO EN CAFÉ .....	41
	Estudios de comparaciones entre diferentes sistemas de producción .....	45
5.10	PRINCIPALES FUENTES DE EMISIONES DE CARBONO EN CAFÉ.....	50
5.11	HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN DE CARBONO .....	52
	Cool Farm Tool® (CFT).....	55
	Componentes de la CFT y estructura .....	56
6.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	57

6.1	LOCALIZACIÓN.....	57
6.2	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE MEDICIÓN DE GEI .....	58
6.3	CONSTRUCCIÓN DE GUÍA DE APOYO PARA FACILITAR LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN FINCA.....	59
6.4	VISITAS A FINCA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	60
6.5	PROYECCIÓN DE OPCIONES DE GESTIÓN DEL CARBONO .....	60
7.	RESULTADOS .....	62
7.1	BALANCE DE CARBONO EN EL SISTEMA ANALIZADO .....	62
7.2	EMISIONES EN ETAPA DE CULTIVO .....	63
7.2.1	Emisiones por unidad de área.....	63
7.2.2	Emisiones por producto cosechado .....	64
7.3	EMISIONES DE CARBONO DEL PROCESAMIENTO Y MANEJO DE ENERGÍA.....	65
7.3.1	Emisiones por unidad de área.....	65
7.3.2	Emisiones por producto cosechado (Toneladas) .....	65
7.4	CAMBIOS EN LAS RESERVAS DE CARBONO .....	65
7.5	ESCENARIO PARA MEJORAR EL BALANCE DE CARBONO DE LA FINCA .....	66
8.	CONCLUSIONES .....	69
9.	RECOMENDACIONES.....	72
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
11.	ABREVIATURAS USADAS .....	80
12.	ANEXOS .....	81
	Anexo 1 Herramienta Cool Farm Tool®.....	81
	Anexo 2 Guia de apoyo para diligenciar la ficha para levantamiento de datos de campo (Cool Farm Tool) .....	81

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Practicas de manejo agrícolas para favorecer el secuestro de carbono en el suelo .....	25
Ilustración 2: ciclo global del carbono .....	28
Ilustración 3: Estrategias de secuestro de carbono .....	34

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Emisiones de GEI .....	19
Tabla 2: Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y Bosque secundario en Costa Rica.....	42
Tabla 3 Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y monocultivos en Costa Rica .....	46
Tabla 4: Fijación de carbono del componente arbóreo en SAF y pastos en Costa Rica .....	46
Tabla 5: Carbono almacenado en los diferentes sustratos en los SAF en Mexico .....	47
Tabla 6: Carbono almacenado en difernetes SAF en Mexico.....	48
Tabla 7: Contenido de carbono en diferentes tipologías de cafeto .....	49
Tabla 8 Fuente de emisionos de carbono en café.....	52
Tabla 9 Lista de calculadoras existentes para medicion de carbono en agricultura .....	53
Tabla 10: Valoración del servicio ambiental del almacenamiento de carbono en los árboles y el cultivo asociado en sistemas agroforestales en Costa Rica .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 11: Promedio de carbono almacenado y su valor económico por tipologías de estudio	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 12 Estructura de lotes de café finca la Unión.....	58
Tabla 13: Balance en las diferentes etapas de producción .....	62
Tabla 14 Emisiones en diferentes procesos y etapas de producción .....	63
Tabla 15 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento .....	64
Tabla 16 Almacenamiento de carbono .....	66
Tabla 17 Balance de carbono incorporando árboles .....	67



## RESUMEN

En el cultivo del café, el tema de emisiones de gases de efecto invernadero -GEI- representan un reto y oportunidad en la medida que es posible desarrollar sistemas productivos amigables con el ambiente, que contribuyan a mitigar el problema de emisiones de GEI. La investigación se desarrolló en la finca la Unión de la vereda La Cabaña en el municipio de Manizales con el objetivo de identificar el balance de carbono que se presenta en el sistema de producción. Para hacer la evaluación, se utilizó la herramienta *Cool Farm Tool*®. La herramienta fue desarrollada por Sustainable Food Lab (Laboratorio de Alimentos Sostenibles), Universidad de Aberdeen, Unilever plc. El sistema a libre exposición solar evaluado genera emisiones de 41.869,74 kg CO<sub>2</sub>eq. El 93,7 % de las emisiones proviene del uso de fertilizantes (118.265,14 kg CO<sub>2</sub>eq), las emisiones inducidas por la producción del fertilizante usado (27.157,14 kg CO<sub>2</sub>eq), el transporte del producto fuera de la finca (41.602,11 kg CO<sub>2</sub>eq) y el manejo de los residuos del cultivo (30.910,89 kg CO<sub>2</sub>eq). La única reserva de carbono es el mismo cultivo de café con un valor de -190.717,98 kg CO<sub>2</sub>eq. La principal practica para mejorar el balance de carbono y pasar en un año, de tener emisiones, a generar almacenamiento, es la incorporación de árboles en el sistema de producción. Incorporando 70 árboles de guamo (*Inga* spp.) por hectárea se tiene un almacenamiento de 33.075,38 kg CO<sub>2</sub>eq, después de 1 año de sembrados los árboles.

Palabras claves: GASES DE EFECTO INVERNADERO – GEI -, *COFFEA ARABICA*, EMISIONES DE CARBONO, CAPTURAS DE CARBONO, COOL FARM TOOL®.

## SUMMARY

The greenhouse gases emissions –GHG from coffee growing represent a challenge and an opportunity to the extent that it is possible to develop friendly environment production systems that help to mitigate the problem of greenhouse gases emissions. The present research has been developed in La Union farm (village of La Cabaña), municipality of Manizales, in order to identify the carbon balance that occurs in the production system. *The Cool Farm Tool*® was used to make the evaluation. The tool was developed by Sustainable Food Lab, Aberdeen University and Unilever plc. In this study we have found that the open sun exposure system generates emissions of 41.869,74 kg CO<sub>2</sub>eq. 93.7 % of emissions come from the use of fertilizers (118,265.14 kg CO<sub>2</sub>eq), induced emissions by production of the fertilizer (27,157.14 kg CO<sub>2</sub>eq) and the transportation of the product outside the farm (41,602.11 kg CO<sub>2</sub>eq). The carbon stock of this farm is the same coffee plantation with a value of -193,103.38 kg CO<sub>2</sub>eq. The main activity to improve the Carbon balance is to plant trees in the production system. It's possible to storage 33.075,38 kg CO<sub>2</sub>eq one year later, by planting 70 trees per hectare.

Keywords: GREENHOUSE GASES – GHG -, COFFEE, CARBON EMISSIONS, CARBON SEQUESTRATION, COOL FARM TOOL®.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático tiene impactos negativos en la producción de los cultivos, en el desarrollo de plagas y enfermedades, en el abastecimiento de agua, entre otros. A su vez, la agricultura es también responsable por el 14 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), y cuando la deforestación para establecer nuevos cultivos es incluida, se estima que la agricultura puede contribuir con el 30 % del total de emisiones de GEI (Rikxoort, 2011).

En el caso del cultivo del café, las emisiones de GEI representan un reto y oportunidad en la medida que es posible desarrollar sistemas productivos amigables con el ambiente que contribuyan a mitigar el problema de emisiones. Sin embargo, para emprender acciones, es importante tener como punto de partida una medición real del impacto que se genera en finca por efecto de las prácticas implementadas para producir. Para hacer esta medición se debe contar con herramientas útiles y de fácil aplicación que permitan medir el balance de carbono generado en finca. Una herramienta de fácil uso es el *Cool Farm Tool*®, desarrollada por Sustainable Food Lab, University of Aberdeen y Unilever plc. Con ella se puede evaluar la huella de carbono de una finca (Unilever, 2010).

La huella de carbono se utiliza para definir la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a lo largo de las cadenas de suministro, y es el primer paso hacia la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. El tema de huella de carbono se ha traducido en nuevos requerimientos del mercado en los países desarrollados, para los productores agroalimentarios, articularse a estos requerimientos puede llegar a ser una ventaja comparativa. En el sector del café existe poca literatura y datos sobre la huella de carbono en los diferentes sistemas de producción. Es por esto que se propuso el siguiente trabajo de investigación donde se aplica la herramienta *Cool Farm Tool*®. La utilidad de la investigación radica en:

- Se obtienen datos del balance de carbono para el cultivo del café en las condiciones específicas de producción, analizadas.
- Se determinan las etapas, prácticas de manejo o proceso de la producción donde mayor cantidad de

emisiones se generan, igualmente las etapas, prácticas de manejo o procesos donde existen capturas considerables.

- Se evalúa las posibilidades y pertinencia de uso de la herramienta *Cool Farm Tool*® en el cultivo de café.

Esta información que entrega la investigación resulta especialmente útil para:

- Proponer alternativas de manejo del cultivo donde se pueden reducir las emisiones e incrementar las posibilidades de captura.
- Establecer una metodología confiable que mida las capturas del cultivo de cara a hacer una valoración real de los posibles servicios ambientales derivados de la producción de café.
- Las posibilidades de captar valor para los caficultores, están condicionadas a que inicialmente se pueda entregar información objetiva sobre su aporte real a la reducción de las emisiones.

## 2. CONTEXTO DEL PROBLEMA

La creciente preocupación sobre los efectos potencialmente desastrosos del calentamiento global en varias regiones del mundo se está enfrentando con la incapacidad de muchos países de reducir sus emisiones netas de gases de invernadero en la medida y en la extensión requeridas por el Protocolo de Kioto. Desde la época preindustrial, las emisiones invernadero han aumentado considerablemente, habiéndose observado un incremento del 70% entre los años 1970 y 2004, Si analizamos las emisiones de dióxido de carbono generadas por el hombre en los últimos 100 años (duración de la efectividad del dióxido de carbono) es muy claro que los principales causantes son los países industrializados. De hecho, casi el 60% de las emisiones son generadas en Europa y en los Estados Unidos, mientras que la totalidad de los países en vías de desarrollo son responsables del 21% (GTZ, 2010).

Muchos informes reportan que probablemente las poblaciones más afectadas por efecto del cambio climático sean las poblaciones de los países en vías de desarrollo, desde ya vulnerables y presas de la inseguridad alimentaria. En 2005, casi la mitad de la población económicamente activa de los países en vías de desarrollo (dos mil quinientos millones de personas) dependía de la agricultura para asegurar sus medios de vida. A la fecha, el 75% de los pobres del mundo viven en áreas rurales (Gerald C & al, 2009).

El cambio climático global se atribuye generalmente a la concentración en la atmósfera de los llamados “gases de efecto invernadero” (GEI). Se estima que el incremento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ) en la atmósfera producirá un aumento en la temperatura media global entre 3 y 5°C, y afectará fuertemente los patrones de precipitación actuales (IPCC, 2007). Debido a su abundancia, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas de efecto invernadero más importante producido por las actividades humanas. En los últimos 150 años, el nivel de concentraciones ha tenido un aumento significativo de dióxido de carbono pasando de 280 ppm en la época pre-industrial a 379 en 2005; cerca de un 20% de las emisiones de este gas resultan de la eliminación y degradación y transformación de los ecosistemas como los bosques (Manson R.H., et al, 2008).

Una de las mejores estrategias para reducir el impacto y solucionar el problema de calentamiento del planeta lo constituye la gestión eficiente del carbono en la agricultura. Al respecto existen gran variedad de opciones para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante un buen manejo de los cultivos y la implementación de prácticas como el buen uso de fertilizantes, mejores métodos de labranza, asociación de especies forestales, ente otras. Las opciones de mitigación de GEI en agricultura han sido consideradas competitivas en costo, en relación con opciones diferentes a la agricultura (por ejemplo energía, transporte). Modelos de largo plazo construidos sugieren que sistemas de producción agrícola y modelos de ganadería eficientes en el balance de dióxido de carbono podrían contribuir de manera eficiente en términos de costos (Precios inferiores a 20 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>-equivalente) a disminuir los GEI presentes en la atmosfera (IPCC, 2007). Se han desarrollado algunos estudios que muestran los beneficios de asociar especies forestales con cultivos, como estrategia de manejo eficiente del carbono. Estimaciones realizadas en sistemas agroforestales tropicales han mostrado la posibilidad de secuestro de carbono entre 12 y 228 TM ha<sup>-1</sup> con un valor promedio de 95 TM ha<sup>-1</sup> (Alain & Kadji, 2003). Como puede verse el análisis y los trabajos de investigación relacionados con la gestión eficiente del carbono en la agricultura en países tropicales debe ser asumido como prioridad inmediata.

Al analizar cultivos en los que se podría trabajar el tema de Balance de carbono en Colombia, encontramos que el café es un cultivo estratégico. El café es un cultivo que impacta en gran medida en la economía y el desarrollo social no solo de las zonas rurales sino también de las ciudades. En reportes de la Federación Nacional de Cafeteros, en la actualidad, 553.000 familias producen café, y cerca de cuatro millones de colombianos dependen de este cultivo. El 95% de las familias cafeteras cultivan el grano en pequeñas fincas o parcelas, cuyos cultivos de café, en promedio, no superan las dos hectáreas. Las fincas dedicadas a la producción de café se encuentran ubicadas en 588 de los 1.102 municipios del país. En términos económicos, la producción de café, que asciende a un promedio anual de 11 millones de sacos de 60 kg., representa el 16% del PIB agrícola nacional (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2011).

Son muy pocos los estudios realizados en Colombia con relación al tema de captura de carbono y su relación con la producción de café, en el informe anual de CENICAFE, 2011 se reporta:

“Como complemento a las investigaciones en carbono, se ha venido desarrollando un trabajo conjunto para evaluar el balance en tres sistemas de producción cafeteros: café - guamo, café - plátano y café a libre exposición. Hasta la fecha se han realizado las cubicaciones de las diferentes especies involucradas en los tres sistemas de producción cafeteros, basándose en la metodología de modelos de crecimiento y captura de carbono de especies en el trópico (CREFT), donde se han obtenido las curvas de crecimiento para la especie

plátano. Además, se encuentran en análisis de laboratorio las cantidades de carbono presentes en cada uno de los órganos de las especies en estudio” (Cenicafe, 2011).

Cada vez es más relevante la posibilidad de desarrollar modelos de caficultura eficientes en el uso del carbono que en el futuro puedan recibir beneficios económicos por concepto de servicios ambientales. El punto de partida es realizar mediciones de emisiones y capturas e identificar este balance en diferentes etapas del proceso de producción. Este tipo de evaluaciones son insumo para generar alternativas y modelos de producción que permitan hacer una gestión eficiente del carbono. Aunque en la actualidad no existen restricciones y requerimientos en torno a disminuir la huella de carbono, producto de la producción de café, en el escenario futuro muy seguramente el componente “Huella de carbono” tendrá un peso importante y muy seguramente se generarán posibilidades de mercado, a quienes de manera responsable y voluntaria, emprendan acciones al respecto. Este proyecto de investigación se realizó en un sistema de producción de café representativo de la zona central cafetera del departamento de Caldas.

### **3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

Usando la herramienta *Cool Farm Tool*® para evaluar el balance de emisiones y captura de carbono en sistemas de producción de café, identificar y cuantificar: ¿Que procesos del sistema de producción de café intervienen positivamente o negativamente en el balance de carbono?

## **4. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Analizar el balance de carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas.

### **Objetivos específicos**

- Medir la cantidad de emisiones y captura de carbono (GEI) que se generan en los diferentes procesos de la producción de café en una finca productora en la zona central del departamento de Caldas,
- Identificar oportunidades actuales y potenciales de la finca evaluada, de cara al desarrollo de un modelo de producción con gestión eficiente de carbono.

## **5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **5.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y CARBONO: GENERALIDADES**

Desde sus inicios el desarrollo de la agricultura ha sido un proceso de adaptación al clima. El diseño y uso de irrigación y de técnicas para manejar las irregularidades en la disponibilidad de agua en las culturas de Mesopotamia y de la América precolombina se cuentan entre los ejemplos conocidos, más antiguos, de adaptación de la agricultura a los cambios en el clima. El cambio climático de origen antropogénico, sin embargo, presenta grandes retos para el desarrollo de la agricultura tal como la conocemos en la actualidad. Ya no se trata de adaptarse a la variabilidad originada en procesos naturales internos al sistema climático (variabilidad interna), que generalmente se da dentro de rangos manejables, se manifiesta de forma paulatina y es predecible con algún grado de certeza. Ahora se trata de cambios que pueden intensificar no solo las condiciones climáticas medias normales dentro de las que históricamente se ha dado el desarrollo de la agricultura, sino también la frecuencia y la magnitud de las variaciones extremas, limitando las posibilidades de adaptación (CEPAL, 2011)

En este sentido podemos afirmar que el cambio climático es uno de los retos más importantes que afronta la agricultura y la humanidad. Existe gran evidencia científica de que la concentración de GEI en la atmósfera se ha venido incrementando de manera drástica en los últimos 50 años. El cambio climático es susceptible de previsión, y por eso, tantos científicos están razonablemente convencidos de que un ascenso del nivel del dióxido de carbono a 500 ppm, ascenso que ya es inevitable, irá acompañado de un profundo cambio climático. Ese convencimiento procede del conocimiento de la historia pasada y de los muchos periodos glaciales e interglaciares de los últimos dos millones de años. El registro obtenido del análisis de las capas de hielo antártico muestra una estrecha correlación entre temperatura global y nivel de dióxido de carbono y metano (Lovelock, 2008).

Comprender el fenómeno del cambio climático, sus causas, los factores que determinan la temperatura del ambiente y las posibles consecuencias, es el punto de partida para hacer un análisis objetivo y detallado de esta realidad. Para hablar de la temperatura del planeta debemos entender la composición de la atmósfera y cómo los gases que la conforman afectan esta temperatura. La atmósfera de la Tierra se compone, naturalmente, de capas de gases que le permiten a los rayos del sol (energía) penetrar y calentar el planeta, gracias a esta condición el planeta tierra es habitable. De la radiación solar entrante, aproximadamente el 30% es reflejada nuevamente al espacio por las nubes y la superficie de la tierra, 25% es absorbida por la atmósfera e irradiada de vuelta al espacio y el 45% restante es absorbida por la tierra y el agua (Houghton, 1997). La energía que llega a la superficie es esencial para favorecer procesos vitales de la Tierra, como la fotosíntesis y la evaporación del agua.

Dado el tamaño del planeta, la temperatura de la superficie debe ser más baja de lo que realmente es, sin embargo, debido a la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluyendo el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el vapor de agua, la radiación que rebota de nuevo a la atmósfera se intercepta y se absorbe, lo que resulta en un calentamiento natural de la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior. Por lo tanto, la cantidad de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera está directamente relacionada con la cantidad de calor retenido, factor que determina la naturaleza del clima en la Tierra. Sin la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la superficie del planeta sería aproximadamente de  $15^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$  más fría que la temperatura promedio de  $15^\circ\text{C}$  (Houghton, 1997).

Este efecto invernadero natural es esencial para el mantenimiento de un planeta habitable y para las condiciones de la Tierra tal como la conocemos. Sin embargo, las actividades humanas, principalmente después de la revolución industrial han afectado esta condición natural, lo que ha resultado en un mayor efecto invernadero. Veamos como ha ocurrido esta situación. El dióxido de carbono (77 %), el óxido nitroso (8 %), y el metano (14 %) son los tres principales gases de efecto invernadero que atrapan la radiación infrarroja y contribuyen al cambio climático. Los cambios en el uso del suelo contribuyen a la liberación de estos tres gases de efecto invernadero. De las emisiones totales de GEI antropogénicas anuales en 2004 (49 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente), aproximadamente 15 mil millones de toneladas (el 31%) provenían del uso del suelo (

Tabla 1: Emisiones de GEI). En comparación, la quema de combustibles fósiles representa 27,7 mil millones de toneladas de emisiones equivalentes de  $\text{CO}_2$  al año.

**Tabla 1: Emisiones de GEI.**

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Emisiones anuales (millones de Ton CO<sub>2</sub> equivalente)</b>	<b>GEI emitido</b>
<b>Agricultura</b>	<b>6.500</b>	
Fertilización del suelo (fertilizantes inorgánicos y aplicación de materia orgánica)	2.100	Óxido nitroso *
Gases de digestión del ganado (fermentación en rumen)	1.800	Metano*
Quema de biomasa	700	Metano, óxido nitroso*
Producción de arroz bajo inundación (descomposición anaeróbica)	600	Metano*
Estiércol del ganado	400	Metano, óxido nitroso*
Otros (por ejemplo suministro de agua para riego)	900	Dióxido de carbono y óxido nitroso*
<b>Deforestación</b>	<b>8.500</b>	
Suelo usado posteriormente para agricultura y ganadería	5.900	Dióxido de carbono
<b>Total</b>	<b>15.000</b>	

\* El impacto de GEI de 1 unidad de óxido nitroso es equivalente a 298 unidades de dióxido de carbono; 1 unidad de metano es equivalente a 25 unidades de dióxido de carbono.

Fuente: WORLDWATCH REPORT 179, Mitigating Climate Change (2009).

La deforestación y la pérdida de vegetación liberan carbono de dos maneras. En primer lugar la tumba de plantas libera carbono al darse el proceso de descomposición de la materia orgánica. En segundo lugar, el suelo expuesto a la lluvia y el viento es más propenso a la erosión. El posterior uso del suelo en actividades como la agricultura y la ganadería genera liberaciones adicionales por efecto de la erosión del suelo y la exposición. La atmósfera oxida el carbono del suelo, liberando más dióxido de carbono a la atmósfera. La aplicación de fertilizantes nitrogenados conduce a la liberación de óxido nitroso. El metano es liberado del rumen de animales (vacas, cabras y ovejas) y del estiércol. También los incendios de bosques y pastizales contribuyen de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero. En el fenómeno del Niño de los años 1997 a 1998, los incendios representaron 2,1 millones de toneladas de emisiones de carbono. Debido a la imprevisibilidad de estos acontecimientos, las emisiones anuales de esta fuente varían de año en año (Scherr & Sthapit, 2009).

## **5.2 CAMBIO CLIMÁTICO: CONSECUENCIAS EN LA AGRICULTURA Y LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ**

Las tierras de cultivo, los pastos y los bosques, que ocupan el 60 % de la superficie terrestre se ven progresivamente expuestos a las amenazas derivadas de la variabilidad climática y del cambio climático. Por su parte el cambio climático amenaza con menoscabar los logros del desarrollo y disminuir el progreso para lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), en especial, aquellos relacionados con el hambre, la reducción de la pobreza y la garantía de la sostenibilidad ambiental (FAO, 2013).

La evidencia científica apunta a que las zonas más afectadas por efectos del cambio climático, se localizan en regiones tropicales y subtropicales, en donde se ubica la mayoría de países en desarrollo y cuyas economías son más dependientes de la agricultura y de otras actividades primarias. Además, allí reside la mayor parte de la población mundial que vive en condiciones de pobreza, sufre el flagelo de la inseguridad alimentaria y presenta una mayor vulnerabilidad a fenómenos naturales cuya frecuencia e intensidad se incrementarán con el cambio climático (CEPAL, 2011). Puesto que la agricultura depende en gran medida de la temperatura y de la disponibilidad de agua, el clima es de fundamental importancia para la seguridad alimentaria. Gran parte de los pobres en los países de desarrollo viven directamente de la agricultura, de manera que serán ellos los más afectados por el cambio climático (GTZ, 2010). Los cambios en temperatura y precipitaciones estacionales tienen consecuencias para las condiciones agroclimáticas, los períodos de crecimiento de la vegetación y las épocas de siembra y cosecha pueden sufrir variaciones. De igual manera, habrá efectos en cuanto a la disponibilidad de agua, la propagación de enfermedades y de malezas. Cambian la evapotranspiración y el rendimiento fotosintético así como la producción de biomasa. Asimismo, puede haber cambios en el uso de las tierras (GTZ, 2010).

A pesar de que Colombia contribuye sólo con el 0,37% de la contaminación de GEI, es altamente vulnerable a los efectos de cambio climático y ya se han evidenciado sus consecuencias. Al respecto, en Colombia se espera un aumento en la temperatura de 1 a 2°C, un porcentaje de reducción de la precipitación del 15% (para el 2050) en la zona andina y un aumento de las precipitaciones en las costas pacífica y atlántica; ocasionando inundaciones y deslizamientos, entre otros daños ambientales. Asimismo, en diferentes zonas y latitudes del país, el cambio climático puede ocasionar precipitaciones o sequías concentradas. La periodicidad del régimen de lluvias puede variar y superar los promedios usuales. Se aumentará el riesgo por incendios forestales y habrá

mayor impacto sobre las comunidades locales, por reducción de la oferta hídrica (Ministerio de Ambiente, et al, 2010).

Aunque el cambio climático es sólo uno de los factores que pueden afectar la producción mundial de café, es probable que sea uno de los factores más importantes. Aún existe un grado alto de incertidumbre con respecto a la forma como se verán afectadas regiones específicas productoras del grano, y cómo el cambio climático afectará a la producción global de café. Sin embargo, los expertos coinciden en que efectivamente se presentaran cambios que afectarán la producción, y éstos podrían ser más significativos en algunas regiones. El impacto potencial no sólo varía entre países sino también dentro de las zonas de producción de cada país, por ejemplo, el impacto en diferentes altitudes y zonas bioclimáticas.

Para tratar de definir los impactos, se han construido y sugerido modelos que simplifican ciertos parámetros para facilitar el análisis. En general, la incertidumbre se hace más grande entre más proyecciones futuras se hacen. Además, hay una escala de diferencia sustancial entre los modelos climáticos globales a gran escala (que generalmente tienen una resolución de más de 100 km) y la pequeña escala de la mayoría de los sistemas de cultivo (generalmente menos de 10 km).

La mayoría de los estudios de modelado, relacionadas con los cultivos agrícolas incluyen proyecciones de (International Trade Centre, 2010):

- Cambios en los rendimientos debido a los cambios en los climas estacionales.
- Los cambios en el potencial de producción en relación con factores tales como el rendimiento, la disponibilidad de suelo y la duración del ciclo de cultivo.
- La respuesta del cultivo a los cambios en las condiciones atmosféricas.
- Los cambios en los precios y la estructura del comercio, debido al cambio climático.
- Cambios en la seguridad alimentaria, es decir, el número de personas en riesgo de hambre.
- El agua de escorrentía y el estrés relacionado con el agua.

Los impactos del cambio climático para la producción de café son muy específicos para cada región geográfica. Se puede generalizar diciendo que con respecto a los impactos, en un futuro no tan lejano, se encontrarán las situaciones siguientes: áreas que ya no serán disponibles para la producción cafetalera; áreas todavía disponibles en las cuales se recomienda la adaptación técnica de la producción y áreas nuevas apropiadas donde se podría empezar el cultivo de café comercial.

Los impactos más severos en las cosechas de café serán causados por los aumentos de temperatura y los cambios de los modelos de precipitación (GTZ, Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, y Café Direct, 2010).

Las condiciones de temperatura y las precipitaciones, son algunos de los principales factores climáticos relacionados con la producción. En este sentido, las dos especies principales, arábica y robusta que en conjunto representan alrededor del 99% de la producción mundial, tienen diferentes requerimientos para estos factores. El café arábica ha evolucionado en el ambiente fresco y sombreado de las tierras altas de los bosques de Etiopía, donde hay una sola estación seca que coincide con los meses de invierno. El rango óptimo de temperatura para su crecimiento está entre 15°C y 24°C. Temperaturas más altas tienden a tener un impacto negativo en el rendimiento y la calidad del grano. Los requerimientos de lluvia están entre 1.500 y 2.000 mm por año, a pesar de que la utilización de riego permite que se cultive café en zonas con deficiencia hídrica, sin embargo, es importante destacar que los costos de producción también se incrementan por efecto de la práctica de riego. Los café Robusta han evolucionado en las tierras bajas de África Ecuatorial, crecen en Uganda, en particular en los bosques de la cuenca del río Congo y alrededor del Lago Victoria. Crece mejor en áreas con abundantes precipitaciones de alrededor de 2.000 mm al año, en altitudes que van desde el nivel del mar a unos 800 metros. Las precipitaciones deben ser bien distribuidas la mayor parte del año debido a que el árbol tiene una raíz robusta con un sistema de raíces relativamente poco profundo. La temperatura óptima varía entre 22°C a 26°C y la especie es menos tolerante a las temperaturas muy bajas o muy altas (International Trade Centre, 2010).

El aumento de la temperatura tiene las siguientes implicaciones:

- Obliga a plantar los cafetos antes, y adelanta la maduración de las cosechas de café, reduciendo la duración de crecimiento y disminuyendo generalmente los rendimientos: A medida que aumenta la temperatura, el café madura más rápido, afectándose la calidad del grano. Esta afirmación se apoya en el hecho de que cuando se cultiva café arábica en zonas tropicales con temperaturas más altas, el café producido muestra menos "calidad" en la taza, en comparación con el mismo café cultivado a mayor altitud. Los granos son más "flojos" y la almendra es de menor tamaño (International Trade Centre, 2010).
- En las áreas montañosas, cambiarán las zonas adecuadas para el crecimiento del café hacia zonas de mayor altitud: En este sentido, el Dr. Peter Baker, del CAB International, estima que si a finales de este siglo las temperaturas aumentan en unos 3°C (algunos expertos creen que un aumento de hasta 5°C es posible), entonces la menor altitud límite para el crecimiento de café arábica de buena calidad puede aumentar en alrededor de 4,5 metros por año, es decir, que con el tiempo las áreas que son actualmente demasiado frías

para el café, podrían ser adecuadas (International Trade Centre, 2010). Este cambio de zonas tiene implicaciones económicas y sociales que aún no han sido estimadas en detalle, al igual que su impacto en los agricultores de las zonas que pierden su vocación cafetera.

- Incremento del ataque de ciertas plagas y enfermedades. Temperaturas más altas no sólo favorecerán la proliferación de ciertas plagas y enfermedades, sino que también dará lugar a la difusión de estos, a las regiones donde no estaban normalmente presentes. La investigación sugiere que la incidencia de plagas y enfermedades como la broca del café, minador de la hoja, los nematodos, la roya del café y otros, aumentará a medida que aumentan las temperaturas. La consecuente necesidad de un mayor control hace que la producción de café sea a la vez más complicada y más costosa.
- Los cambios en la época lluviosa, su distribución e intensidad, afectan el crecimiento de la planta de café. El café requiere más de 150 mm de lluvia por mes en promedio, durante la floración y maduración, seguidos por un período seco. Las fuertes lluvias durante el período seco o durante la estación lluviosa rompen el proceso de floración. Diversas investigaciones muestran cómo se afecta el rendimiento, si los eventos climáticos, por ejemplo, altas temperaturas se presentan durante periodos sensibles del ciclo de vida de la planta, o durante la floración o fructificación. En estas condiciones los rendimientos se verán afectados negativamente, sobre todo si se acompaña de disminución de las precipitaciones.
- En Huatusco, Veracruz, México se llevó a cabo un estudio para precisar los impactos potenciales del cambio climático sobre la floración y el desarrollo del fruto de la planta del café bajo sombra, encontrándose que ante las condiciones de cambio climático propuestas en el estudio, con base en modelos de simulación climática, se observa que el inicio de la floración del café puede verse afectado, reduciéndose esta hasta la mitad; también se pueden ver afectados procesos como el llenado de grano y la maduración (Villers, Arizpe, Orellana, Conde, & Hernandez, 2009).
- Las lluvias serán más intensas pero menos frecuentes. Esto demandará el uso de sistemas de irrigación adecuados en algunas regiones. Áreas que actualmente no necesitan riego, a futuro pueden necesitarlo debido al aumento de la evaporación que reduce el contenido de humedad del suelo. Otras áreas pueden experimentar aumentos tanto en la precipitación como la variabilidad e intensidad de esta.

Otros impactos del aumento de la temperatura son:

- Los cambios en la estación lluviosa resultarán en algunas regiones, en problemas graves en cuanto al proceso de secado del café de manera natural. Lluvias imprevistas durante el secado afectarán la calidad

del café y así el precio final de venta del producto.

- Las lluvias fuertes pueden causar inundaciones y deslizamientos, mientras las sequías pueden causar derrumbes y suelos inutilizables.
- Eventos extremos como los huracanes destruirán la tierra, las parcelas y las plantas.
- Las fuertes lluvias causarán inundaciones y destruirán la infraestructura de transporte y por ende la comercialización.

Todos los impactos mencionados afectarán finalmente de manera negativa la cantidad y calidad del café, reduciendo así los ingresos de los pequeños productores (GTZ, Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, y Café Direct, 2010). Por otro lado se requiere más investigación sobre la adaptación de la agricultura tropical, que enfatice aspectos relativos a las relaciones entre cambio climático, variabilidad climática y eventos extremos; sobre la incidencia de pestes y patógenos, tanto en cultivos en campo como en el almacenamiento del producto; sobre el impacto de las mayores concentraciones de dióxido de carbono; sobre los impactos y la adaptación de pequeños agricultores, la agricultura de subsistencia y sistemas agrícolas tradicionales; sobre aspectos territoriales, incluyendo consideraciones socioculturales y ecológicas; sobre las lecciones del pasado y el rol de los conocimientos tradicionales; sobre la percepción del riesgo entre los agricultores y sus implicaciones para la adaptación y mitigación, por ejemplo (CEPAL, 2011).

Finalmente es importante indicar que esta situación de cambio climático puede llevar a redefinir la vocación de uso de muchas regiones cafeteras del país. Esto tiene implicaciones sociales y económicas que deben valorarse en detalle para que las comunidades rurales no terminen siendo las principales afectadas y altamente impactadas de manera negativa.

### **5.3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN POSIBLES Y ALTERNATIVAS DE MANEJO**

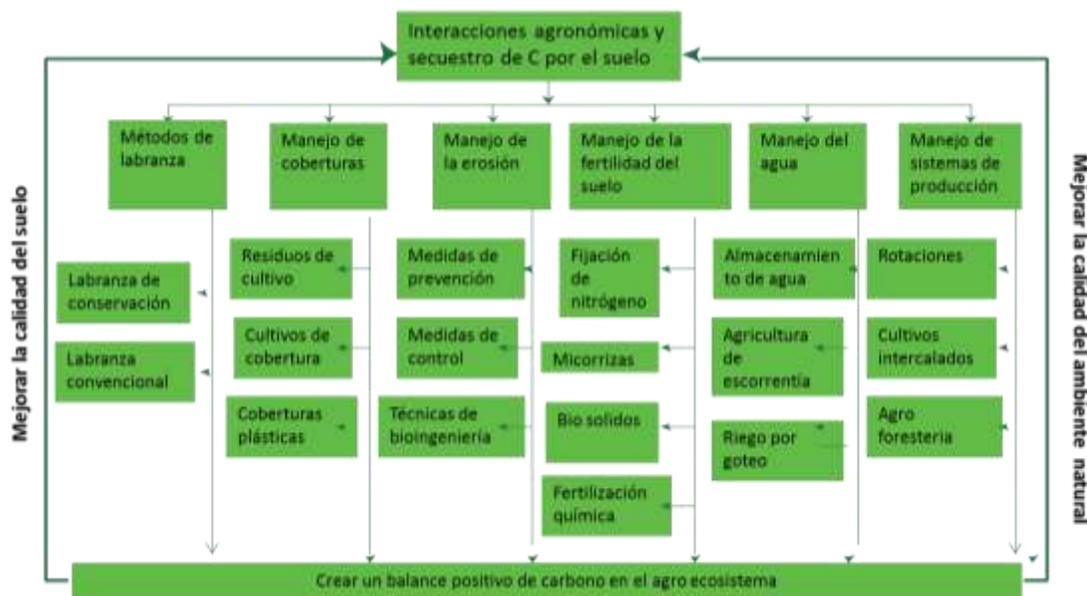
La remoción de carbono atmosférico y el almacenamiento en la biosfera terrestre, es una de las opciones que se ha propuesto para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero. Las tierras destinadas a la agricultura tienen gran potencial como sumideros y pueden absorber gran cantidad de carbono si se introducen árboles a estos sistemas y se les hace un buen manejo junto con los cultivos y/o los animales (Albrecht & Kandji, 2003).

Las negociaciones dentro del protocolo de Kioto han mostrado una tendencia a la ampliación de las opciones reconocidas para la compensación de las emisiones de gases de invernadero (FAO, 2002). La agricultura de los países en desarrollo debe emprender una transformación significativa para responder a los retos que la vinculan con la seguridad alimentaria y el cambio climático. Ya existen prácticas “climáticamente

inteligentes” que podrían implementarse en los sistemas agrícolas de países en desarrollo. Adoptar un enfoque de ecosistema, trabajar a escala de paisaje y asegurar la coordinación y la cooperación intersectorial resulta crucial para lograr respuestas eficaces al cambio climático. Se necesita una inversión considerable para cubrir las brechas de datos y conocimiento, así como de la investigación y desarrollo de tecnologías y metodologías, además de la conservación y producción de variedades y especies apropiadas (FAO, 2010).

El potencial de secuestro en el suelo, mediante prácticas de manejo agrícola que transfieran el carbono atmosférico a otros depósitos (sumideros) implica numerosas interacciones agronómicas (Ilustración 1 Practicas de manejo agrícolas para favorecer el secuestro de carbono en el suelo).

**Ilustración 1** Prácticas de manejo agrícolas para favorecer el secuestro de carbono en el suelo.



Fuente: Adaptado de (FAO, 2011)

Hay un gran potencial para almacenar carbono en los suelos agrícolas tropicales mediante la gestión de prácticas que, en las circunstancias adecuadas, también puede aumentar la productividad. La agroforestería puede ofrecer particularmente grandes ganancias de carbono, aunque puede aumentar la demanda de agua.

En el sector agrícola, si las mejores prácticas de gestión se adoptan de manera amplia, se estima que 5,5-6 Gt de CO<sub>2</sub> equivalente puede ser secuestrado al año para 2030, lo que es comparable a las emisiones de ese sector. Alrededor del 90% de este potencial podría lograrse a través de mejora de los sumideros de carbono y alrededor del 10% reduciendo las emisiones.

La mayoría del potencial (70%) se puede lograr en los países en desarrollo. El mayor potencial de mitigación está en la gestión de las tierras de cultivo, la gestión de pastizales y la restauración de suelos orgánicos cultivados y tierras degradadas (UNEP, 2009).

Las principales técnicas agronómicas que permiten una gestión eficiente de carbono en sistemas agrícolas incluyen:

- Reducción o eliminación de labranza mecánica y la adopción de sistemas de siembra directa o labranza mínima.
- El uso de residuos de cultivos o materiales sintéticos como mulch, junto con la incorporación de cultivos de cobertura en el ciclo de rotación.
- La adopción de medidas de conservación efectivas y prácticas de bioingeniería para minimizar las pérdidas de suelo y agua por la escorrentía superficial; la mejora de la fertilidad del suelo a través de la gestión integrada de los nutrientes, que combina las prácticas para mejorar la gestión de la materia orgánica (in situ), la mejora de los procesos biológicos del suelo que implica la fijación biológica de nitrógeno y las micorrizas, y adiciones de residuos orgánicos (biosólidos, lodos) y fertilizantes sintéticos.
- Las prácticas de conservación de agua en la zona de la raíz para aumentar el componente de agua verde mediante la reducción de las pérdidas a través de la escorrentía y la evaporación, y el aumento de la eficiencia del uso a través de aplicación de técnicas de riego/fertirriego por goteo.
- Mejoramiento de los sistemas de pastoreo, mejorando la dieta de los animales y reduciendo sus emisiones entéricas.
- Una mejor implementación de diferentes sistemas de producción, incluyendo técnicas de rotación de cultivos, cultivos intercalados y sistemas agroforestales mixtos que utilicen eficientemente los recursos, mejoren la biodiversidad e imiten los ecosistemas naturales.

El objetivo de estas interacciones agronómicas (Ilustración 1 Prácticas de manejo agrícolas para favorecer el secuestro de carbono en el suelo) es crear un presupuesto positivo de carbono, y mejorar la calidad y la productividad de los recursos naturales. El objetivo general de la gestión sostenible de los suelos, el agua y los recursos biológicos es fortalecer y favorecer los ciclos del agua, el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre. El fortalecimiento de estos ciclos interrelacionados mejora los servicios de los ecosistemas, producidos por el aumento del almacenamiento de carbono del suelo, la mejora de la actividad biológica del suelo, el aumento de la productividad primaria neta (PPN), la disminución de las pérdidas por erosión y lixiviación, y el aumento de la eficiencia de humificación (FAO, 2011).

## 5.4 CICLO DE CARBONO

Uno de los procesos más importantes en la naturaleza, corresponde al movimiento del carbono a través del aire, la tierra y el agua; este proceso es conocido como el ciclo del carbono. Los seres humanos participamos en él constantemente por la inhalación de oxígeno, la quema del carbono ingerido a través de alimentos y exhalando a la atmósfera dióxido de carbono. Mediante este mecanismo los seres humanos recibimos la energía que necesitamos para la supervivencia, al igual que otros animales. Entender el ciclo del carbono es clave para definir acciones tendientes a hacer una gestión eficiente de este, en el manejo de los sistemas productivos agrícolas.

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida. El carbono, en su unión molecular con el oxígeno, constituye el dióxido de carbono, gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Martinez & Fernandez, 2004).

El carbono se almacena en la atmósfera, los océanos y la biosfera. Su ciclo es cerrado, ya que la cantidad de carbono existente en la tierra es fija. La única entrada que tiene el carbono a la biosfera es mediante las plantas, que obtienen el dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis (Amézquita, Murgueitio, Cuartas, & Gómez, 2004). Existen dos mecanismos generales que operan de manera conjunta, en escalas diferentes de tiempo para regular la concentración de carbono en la atmósfera.

En el largo plazo (cientos de millones de años), el ciclo de un químico del carbono-silicato opera como regulador de dicha concentración. En este ciclo, el carbono atmosférico se disuelve en el agua de lluvia y forma ácido carbónico que reacciona con los minerales expuestos sobre la superficie terrestre, generando lo que se conoce como intemperismo de largo plazo. Los ríos acarrear los productos disueltos al océano. En el océano se forma el carbonato de calcio; éste se deposita en los sedimentos marinos que por el proceso de subducción entra a la corteza baja de la tierra. En este proceso se reincorporan elementos a los minerales primarios de las rocas y el carbono regresa a la atmósfera como dióxido de carbono por las emisiones volcánicas e hidrotermales. Este ciclo geoquímico ha ayudado a mantener la concentración de dióxido de carbono atmosférico por debajo de 1 % durante los últimos 100 millones de años; sin embargo los flujos de carbono anuales son relativamente pequeños (Martinez & Fernandez, 2004)].

La aparición de la vida sobrepuso al ciclo geoquímico un ciclo bio geoquímico de corto plazo. En este, dominan dos grandes transferencias anuales de carbono: el flujo de dióxido de carbono de la atmósfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis, y el regreso de carbono a la atmósfera como resultado de la descomposición de la materia orgánica. En los periodos de la historia de la tierra en los que la producción de materia orgánica ha excedido a su descomposición, el carbono orgánico se ha acumulado en los sedimentos geológicos.

Otro componente natural del ciclo del carbono lo constituye el metano. Este gas es, después del dióxido de carbono, el compuesto de carbono más abundante en la atmósfera. Se produce por la fermentación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, tal como ocurre, por ejemplo, en los humedales, los sedimentos lacustres y en el aparato digestivo de los rumiantes y las termitas (Martinez & Fernandez, 2004). El metano, como veremos más adelante, es importante en las emisiones de carbono en café, en la etapa de beneficio, producto del proceso de descomposición de las aguas mieles. En la

Ilustración 2: Ciclo global del carbono.

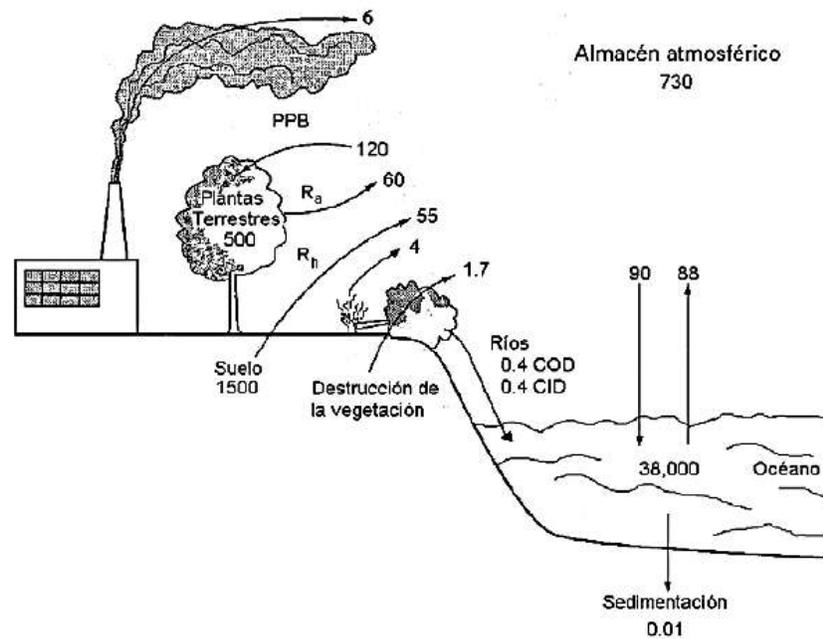


Figura 1. El ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en Pg C y los flujos en Pg C/año. PPB = producción primaria bruta;  $R_a$  = respiración autótrofa;  $R_n$  = respiración heterótrofa; COD = carbono orgánico disuelto; CID = carbono inorgánico disuelto. Fuente: Esquema modificado de Schlesinger 1997, y actualizado con información de IPCC 2001.

Fuente: (Manson R.H., et al, 2008)

## 5.5 DEPÓSITOS DE CARBONO

Existen cinco depósitos de carbono, de los cuales el más grande es la reserva en los océanos (38000 Pg); el segundo en abundancia corresponde a las reservas geológicas que comprende los combustibles fósiles, y ha sido estimado en 4.130 Pg, de los cuales el 85 % es carbón, 5,5 % es petróleo y 3,3 % es gas. El tercer reservorio importante es el suelo, estimado en 2.500 Pg a un metro de profundidad. Este reservorio cuenta con dos componentes distintos: carbono orgánico del suelo que se estima en 1.550 Pg y el carbono inorgánico del suelo estimado en 950 Pg. El carbono orgánico del suelo incluye humus activo y carbón de leña. (FAO, 2011).

Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos medios de residencia variando de uno a pocos años, dependiendo de la composición bioquímica, por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa, a décadas o a más de 1.000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas. Para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o química o captura: protección física significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por los macro o microagregados del suelo, protección química se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo (coloides o arcillas), pero más a menudo contiene compuestos orgánicos del suelo muy estables (FAO, 2002).

El cuarto grupo más grande es el reservorio atmosférico que comprende 800 Pg, y está aumentando a un ritmo de 4,2 Pg C/año o un 0,54 %/año. El más pequeño es el reservorio biótico, que se estima a 620 Pg, que comprende 560 Pg de biomasa viva y 60 Pg de material de detritus (FAO, 2011).

El reservorio biótico y el reservorio del suelo son de especial interés en la agricultura, pues son los reservorios donde se puede hacer aportes significativos dependiendo del manejo que se dé al cultivo, en este caso, al café. El reservorio biótico incluye el carbono del suelo de los primeros perfiles, el contenido en las raíces de árboles y del cultivo perenne, y la hojarasca muerta en el primer horizonte del suelo. Dentro del reservorio biótico la cantidad de carbono contenido se llama stock de carbono, y el total de "stock" en el agro-ecosistema es la suma de "stocks" de los diferentes componentes. El stock de carbono es comúnmente expresado en Toneladas de Carbono por hectárea (t C ha<sup>-1</sup>) (Polzot, 2004).

Los depósitos de carbono terrestre y atmosférico interactúan fuertemente entre sí a través de la fotosíntesis y respiración. Las plantas superiores adquieren el dióxido de carbono atmosférico por difusión a través de los

estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de dióxido de carbono regresa a la atmósfera, la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). Ésta se ha estimado globalmente en 120 Pg C/año. (1 Pg [Petagramo] =1.015g). La mitad de la PPB (60 Pg C/año) se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñosos, y la otra mitad regresa a la atmósfera como dióxido de carbono debido a la respiración autotrófica (respiración de los tejidos vegetales, Ra). El crecimiento anual de las plantas es el resultado de la diferencia entre carbono fijado y el respirado. Se le conoce como producción primaria neta (PPN) y en el nivel global se ha estimado en 60 Pg C/año. Eventualmente, en el transcurso de pocos o muchos años, casi todo el carbono fijado por vía de la PPN regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: la respiración heterotrófica, que incluye a los descomponedores de la materia orgánica (bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros; y por la combustión de los fuegos naturales o antropogénicos. Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es respirada a diferentes velocidades, dependiendo de sus características químicas. Se producen así almacenes de carbono en el suelo que lo regresan a la atmósfera en diferentes periodos, la diferencia entre la fijación de carbono por la PPN y las pérdidas por respiración heterótrofa, en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (por ejemplo quema de material vegetal), se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE). En algún momento, la mayor parte de la biomasa (PNE) contenida en el material vegetal vivo se transfiere a depósitos de materia orgánica muerta (MOM). Parte de la MOM se descompone rápidamente y devuelve el carbono a la atmósfera, pero hay una parte retenida durante meses, hasta años o décadas. El uso y el manejo de las tierras repercuten sobre las existencias de carbono en la materia orgánica muerta al tener su efecto sobre la velocidad de descomposición y sobre el ingreso de detrito fresco. Las pérdidas debidas al quemado de materia orgánica muerta incluyen emisiones de dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, entre otros (IPCC, 2006).

Cuando todas las pérdidas de carbono se contabilizan, tales como el fuego, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el carbono que acumula efectivamente la biosfera a nivel global, y que se conoce como la producción neta del bioma (PNB) (Martinez & Fernandez, 2004).

Como se ha indicado anteriormente los administradores del suelo pueden emplear el fuego como herramienta de manejo de pastizales y bosques o puede haber incendios arrasadores que queman tierras gestionadas, particularmente forestales, lo que conduce a pérdidas significativas de carbono de la biomasa. (IPCC, 2006).

A medida que se fragmenta y se descompone, la materia orgánica muerta se transforma en materia orgánica del suelo (MOS). Sin embargo, parte del carbono orgánico del suelo se convierte en compuestos recalcitrantes (p. ej. complejos órgano minerales) que se descomponen muy lentamente y que, por ende, pueden permanecer en

el suelo durante décadas, siglos, o más tiempo. Después de los incendios, se producen pequeñas cantidades del llamado "carbono negro", que constituyen una fracción de carbono casi inerte con tiempos de rotación que pueden extenderse hasta milenios.

## **5.6 FACTORES QUE AFECTAN LA DINÁMICA DEL CARBONO EN EL SUELO**

Las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y sola una pequeña fracción (1%) del que ingresa (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año) (FAO, 2002).

La latitud afecta la dinámica de los materiales orgánicos del suelo, esta afecta las condiciones de temperatura, precipitación y radiación solar; factores que inciden en la dinámica del carbono y el crecimiento de las plantas (Burbano Orjuela, 1989). Los contenidos de carbono en el suelo dependen de los principales factores a largo plazo, relacionados con la formación del suelo pero pueden ser fuertemente modificados, degradados o mejorados por los cambios en el uso y el manejo de la tierra (FAO, 2002)

El material parental también tiene un impacto en la dinámica del carbono. La mineralización del carbono parece seguir un comportamiento diferente en los suelos derivados de cenizas volcánicas, en parte, a génesis de estos suelos, a su ubicación de altura en ciertas ocasiones y a las condiciones de humedad. Hace algunos años se propuso la hipótesis según la cual, la baja tasa de mineralización de la materia orgánica en suelos de ceniza volcánica se debía a una falta de fuentes de carbono y energía para el crecimiento microbiano, ya que el carbono de estos suelos por estar absorbido por las arcillas amorfas no estaría disponible para satisfacer los requerimientos de los microorganismos. Como consecuencia de esto, se esperaría un aumento en la mineralización de la materia orgánica al agregar fuentes de carbono o energía de alta disponibilidad a estos suelos (Burbano Orjuela, 1989).

Los residuos vegetales constituyen una de las principales formas de transferir materiales y energía para el mantenimiento de los procesos que se desarrollan en un ecosistema. De forma más o menos continuo, al suelo van a parar los residuos de las plantas y de los animales que, justamente, sirven como fuente de alimento y energía para los organismos heterotróficos del suelo (Burbano Orjuela, 1989). Del manejo que se da a estos residuos, en gran medida depende el flujo de carbono y la eficiencia en el proceso de captura.

Hay ciertas prácticas en el manejo del suelo que tienen un impacto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero que va más allá de un simple cambio en las existencias de carbono. Por ejemplo, el encalado se emplea para reducir la acidez del suelo y mejorar la productividad de las plantas, pero es también una fuente

directa de emisiones de dióxido de carbono. Específicamente, el encalado transfiere carbono de la corteza de la tierra a la atmósfera, cuando se elimina el carbonato de calcio de los depósitos de piedra caliza y de dolomita y se aplica a los suelos en los que el ión carbonato evoluciona a dióxido de carbono.

El agregado de nitrógeno es práctica común para incrementar la NPP y los rendimientos de los cultivos, incluidos la aplicación de fertilizantes sintéticos de nitrógeno y abono orgánico (p. ej. estiércol), particularmente en tierras de cultivo y pastizales. Este incremento en la disponibilidad de nitrógeno del suelo, aumenta las emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos como subproducto de la nitrificación y la desnitrificación (IPCC, 2006). El incremento de la biomasa de los cultivos puede aumentar el ingreso de materia orgánica en el suelo, el que puede ocurrir, por ejemplo, por medio de la introducción de nuevas variedades o del manejo agronómico, como en el caso de los nutrientes (especialmente nitrógeno) y de la rotación de cultivos (FAO, 2002).

Aparte de los factores climáticos, principalmente la temperatura, los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo, son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo. La erosión del suelo, tanto hídrico como eólico, representa la forma más importante del proceso de degradación del suelo y afecta a más de 1.000 millones de hectáreas en todo el planeta. La pérdida de suelo varía, por lo general, entre 1 y 10 t/ha/año, llegando en algunos casos hasta 50 toneladas (FAO, 2002).

De manera similar, los cambios de uso de la tierra incrementan las emisiones de óxido nitroso, si están asociados con una elevada descomposición de la materia orgánica del suelo y con la subsiguiente desmineralización del nitrógeno, como sucede cuando se inician cultivos en humedales, bosques o pastizales (IPCC, 2006).

El manejo de los residuos de los cultivos es otro método importante para capturar carbono en el suelo y aumentar su contenido de materia orgánica. La quema de los residuos tiene consecuencias negativas, si bien algunas veces, estas son mitigadas por la gran estabilidad del carbono mineral que se forma. Los efectos positivos del uso de los residuos de los cultivos para inducir la captura de carbono fueron estimados por Lal (1997) en 0,2 Pg C/año con una transformación de 15 % del total del carbono (globalmente, 1,5 Pg C). Por lo general, hay una relación lineal entre la materia orgánica en los primeros 15 cm de suelo y la cantidad de residuos de cultivos aplicados. (FAO, 2002)

Los abonos verdes y los cultivos de cobertura pueden proporcionar una importante contribución al carbono del suelo como demuestran las experiencias en América Latina. En América Central hay cerca de 45.000 agricultores que han adoptado sistemas basados en la mucuna por medio de los cuales se pueden fijar cerca de

150 kg/ha/N/año y pueden ser añadidas al suelo 35-50 t/ha/año de biomasa. Esto representa una gran captura de carbono. (FAO, 2002)

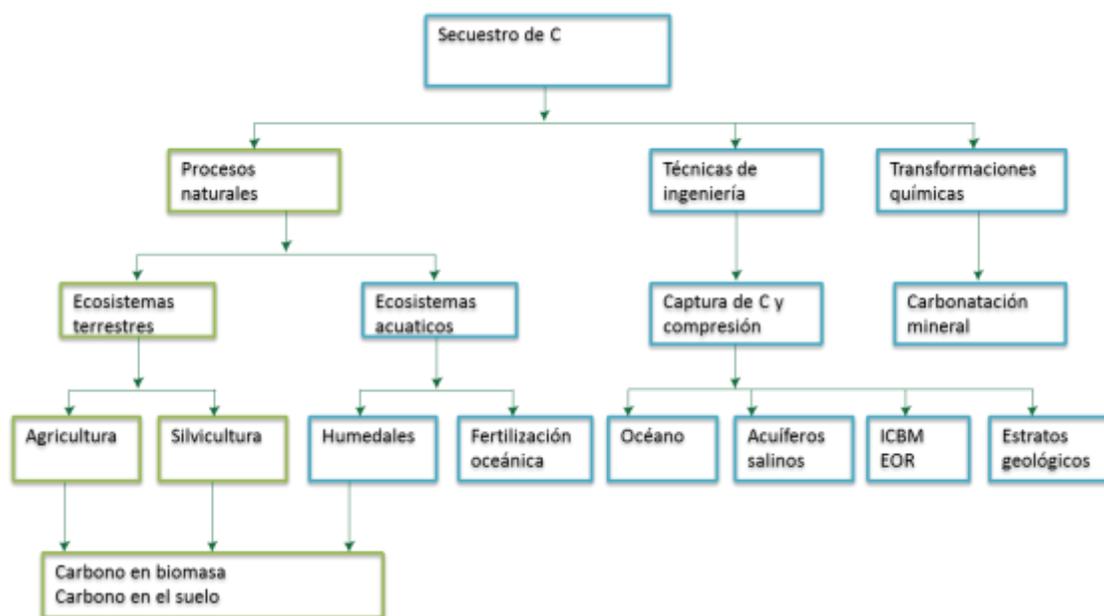
## 5.7 SECUESTRO Y FIJACIÓN DE CARBONO

El aporte de GEI a la atmosfera puede ser regulado, ya sea reduciendo las emisiones antropogénicas o secuestrando carbono en la biomasa de las plantas o el suelo. La transferencia de dióxido de carbono atmosférico en otros depósitos con un mayor tiempo promedio de residencia (MRT: *Mean Residence Time*), de tal manera que no es re-emitida a la atmósfera en un futuro próximo, se llama secuestro (FAO, 2011). Dependiendo de los procesos y las innovaciones tecnológicas, hay tres tipos principales de secuestro de carbono (Ilustración 3: Estrategias de secuestro de carbono):

- Los basados en el proceso natural de la fotosíntesis y la conversión de dióxido de carbono atmosférico en biomasa, materia orgánica del suelo o humus y otros componentes de la biosfera terrestre.
- Los que implican técnicas de ingeniería.
- Los que implican transformaciones químicas.

Por otro lado, la fijación se refiere al proceso de remoción de carbono gaseoso de la atmosfera para posteriormente fijarlo en el suelo o en el material leñoso de un forestal. Esta medida es una tasa del flujo de carbono que relaciona cantidades por área y en unidad de tiempo. La fijación es más frecuentemente expresada en toneladas de carbono por hectárea en un año ( $t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ ) (Avila Vargas, Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol, 2000). Las medidas de fijación de carbono no expresan la cantidad total de carbono almacenado en un sumidero determinado, solo dan una indicación de la tasa a la que el sumidero se incrementa. Dado que el proceso y la velocidad de flujo de carbono se pueden producir en cualquier dirección, un sistema que secuestra el carbono de la atmósfera se conoce como reservorio y un sistema que emite carbono se conoce como una fuente (Polzot, 2004).

**Ilustración 3: Estrategias de secuestro de carbono.**



La tasa de enriquecimiento de dióxido de carbono a la atmósfera se puede reducir y controlar mediante su transferencia a otros depósitos mediante opciones de mitigación y adaptación. Las estrategias de mitigación implican opciones que, o bien reducen la cantidad de emisiones, u opciones que secuestran carbono. La reducción de emisiones incluye las tecnologías que mejoran la eficiencia en el uso de energía, e involucran fuentes de combustible de bajo carbono o no carbono. En general, los procesos naturales de secuestro (retención) de carbono en ecosistemas terrestre y acuáticos son más rentables y tienen numerosos beneficios colaterales, como la mejora de los servicios ecosistémicos, en comparación con las técnicas de ingeniería y la conversión de dióxido de carbono en carbonatos (FAO, 2011).

**Fijación basada en el proceso natural de la fotosíntesis y la conversión de dióxido de carbono atmosférico en biomasa, materia orgánica del suelo o humus y otros componentes de la biosfera terrestre.**

En el proceso de fijación natural, es clave, la biomasa que produce un sistema. Entender el proceso de formación de biomasa, es clave para definir alternativas de fijación de carbono a través de la fotosíntesis. La biomasa de una comunidad de plantas se define como su masa seca total, considerándose dentro de esta, a la biomasa aérea como el compartimiento más importante en los proyectos de captura de carbono, tanto en peso como en su tasa de cambio. Su acumulación se produce cuando la cantidad de dióxido de carbono fijado en el proceso de fotosíntesis, es exactamente igual a la cantidad de energía liberada durante la respiración (punto de compensación de la luz) y va hasta un límite en el cual un aumento en la intensidad de la luz, no ocasiona un aumento en la tasa fotosintética (punto de saturación lumínica). Ambos puntos dependen de la especie, el tipo de follaje del árbol, condiciones ambientales, nivel de nutrientes disponibles y potencial hídrico (Brown, 1997).

Los procesos naturales de la captura de carbono en los ecosistemas terrestres y acuáticos (por ejemplo, suelos, vegetación, humedales) contribuyen a un aumento de la biomasa, la mejora de la salud del suelo y su funcionamiento, incluyendo el ciclo de nutrientes, la infiltración del agua, la retención de la humedad del suelo, así como la filtración de agua y amortiguación en los humedales. De esta manera estos procesos mejoran la resistencia de los ecosistemas y la adaptación de estos sistemas a las alteraciones climáticas con los consiguientes cambios en la temperatura, la precipitación y la frecuencia e intensidad de los eventos extremos.

La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa total del ecosistema, considerando todos sus componentes (componente leñoso, raíces, hojarasca y suelo). Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 de la biomasa total en peso seco, por lo tanto, la densidad de almacenamiento de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) se calcula sumando la biomasa de todos los componentes leñosas por unidad de superficie, y se multiplica por 0,5 (IPCC, 2006).

Dos factores dominantes que afectan la densidad de almacenamiento de carbono, son la densidad de árboles (árboles/ha) y la distribución del diámetro. Más específicamente, el almacenamiento de carbono por hectárea, por lo general tienden a aumentar con la densidad de los árboles y/o aumento de la proporción de árboles de gran diámetro (Polzot, 2004).

Los bosques tropicales cubren grandes áreas que representan más de 2.000 millones de hectáreas y son fundamentales para la captura de carbono y otro sin número de servicios ambientales. Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos que contienen cerca del 40 % del total del carbono son de importancia primaria, cuando se considera el manejo de los bosques. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación o la reforestación, ese equilibrio es afectado. Actualmente, se estima que cada año son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas, sobre todo en los trópicos (FAO, 1993) y que muy a

menudo parte del carbono orgánico se pierde dando lugar a una considerable emisión de dióxido de carbono. Por lo tanto, donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto para minimizar las pérdidas de carbono. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo (FAO, 2002).

## **5.8 LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN CAFÉ**

La agroforestería es el nombre genérico utilizado para describir un sistema de uso de la tierra antiguo y ampliamente practicado, en el que los árboles se combinan espacial y/o temporalmente con animales y/o cultivos agrícolas. Esta combina elementos de agricultura con elementos de forestería en sistemas de producción sustentables en la misma unidad de tierra (Altieri, 1999).

La remoción de emisiones de gases de efecto invernadero por acumulación en biomasa y/o suelo en ecosistemas terrestres es una forma de mitigar el cambio climático. Los sistemas agroforestales (SAF) bien diseñados y bien manejados son tecnologías “ganar-ganar”, ya que incrementan la producción y generan servicios ambientales (Mena, Andrade, & Navarro, 2011).

El uso de árboles y arbustos en los sistemas agrícolas ayuda a afrontar el triple reto de garantizar la seguridad alimentaria, mitigar y reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático y aumentar la adaptabilidad de los sistemas agrícolas al mismo tiempo. La presencia de árboles en sistemas agrícolas puede reportar mayores ingresos y ayudar a diversificar la producción, reduciendo así el riesgo relacionado con la producción agrícola y la caída de los mercados. Esto será cada vez más importante a medida que los impactos del cambio climático se hagan más pronunciados. Los árboles y los arbustos pueden reducir los efectos de los fenómenos climáticos extremos, como las fuertes lluvias, sequías y huracanes. Evitan la erosión, estabilizan los suelos, aumentan los índices de infiltración y detienen la degradación de la tierra. Pueden enriquecer la biodiversidad en el paisaje y aumentar la estabilidad del ecosistema. Los árboles pueden mejorar la fertilidad del suelo y la humedad del mismo, al aumentar la presencia de materia orgánica. Los árboles y arbustos leguminosos nitrificantes pueden ser especialmente importantes para la fertilidad del suelo, allí donde el acceso a fertilizantes minerales es limitado. Una mejor fertilidad del suelo tiende a aumentar la productividad agrícola y podría permitir una mayor flexibilidad en los tipos de cultivos que pueden realizarse. Los sistemas agroforestales tienden a secuestrar mayores cantidades de carbono que los sistemas agrícolas sin árboles. La plantación de árboles en tierras agrícolas es relativamente eficiente y rentable, comparada con otras estrategias de mitigación, y aporta una serie

de beneficios colaterales importantes para lograr mejores medios de vida entre las familias rurales y una mejor adaptación al clima (FAO, 2010).

La importancia de la agroforestería como un sistema de uso de la tierra está recibiendo amplio reconocimiento no sólo en términos de la sostenibilidad de la agricultura, sino también en cuestiones relacionadas con el cambio climático. El potencial de secuestro de carbono de los sistemas agroforestales se estima entre 12 y 228 Mg ha<sup>-1</sup>, con un valor medio de 95 Mg ha<sup>-1</sup>.

Con base en el área de la tierra, 1,1 a 2,2 Pg C podría ser almacenado en los ecosistemas terrestres en los próximos 50 años. Sistemas de rotación de largo plazo como sistemas agroforestales, huertos familiares y plantaciones de contorno pueden secuestrar cantidades considerables de carbono en la biomasa vegetal y en productos de madera duraderos. Así, la captura de carbono del suelo constituye una opción realista alcanzable en muchos sistemas agroforestales (Albrecht & Kandji, 2003).

La agroforestería incorpora cuatro características (Altieri, 1999):

**Estructura.** A diferencia de la agricultura y la actividad forestal modernas, la agroforestería combina árboles, cultivos y animales. En el pasado, los agricultores rara vez consideraban útiles a los árboles en el terreno para el cultivo, mientras que los forestales han tomado los bosques simplemente como reservas para el crecimiento de árboles (Nair 1983). Aun así, durante siglos los agricultores tradicionales han proporcionado sus necesidades básicas al sembrar cultivos alimenticios, árboles y animales en forma conjunta.

**Sustentabilidad.** La agroforestería optimiza los efectos beneficiosos de las interacciones entre las especies boscosas y los cultivos o animales. Al utilizar los ecosistemas naturales como modelos y al aplicar sus características ecológicas al sistema agrícola, se espera que la productividad a largo plazo pueda mantenerse sin degradar la tierra. Esto resulta particularmente importante si se considera la aplicación actual de la agroforestería en zonas de calidad marginal de la tierra y baja disponibilidad de los insumos.

**Incremento en la productividad.** Al mejorar las relaciones complementarias entre los componentes del predio, con condiciones mejoradas de crecimiento y un uso eficaz de los recursos naturales (espacio, suelo, agua, luz), se espera que la producción sea mayor en los sistemas agroforestales que en los sistemas convencionales de uso de la tierra.

**Adaptabilidad cultural/socioeconómica.** A pesar de que la agroforestería es apropiada para una amplia gama de predios de diversos tamaños y de condiciones socioeconómicas, su potencial ha sido particularmente reconocido para los pequeños agricultores en áreas marginales y pobres de las zonas tropicales y subtropicales. Si se considera que los campesinos generalmente no son capaces de adoptar tecnologías muy costosas y modernas,

que han sido pasados por alto por la investigación agrícola y que no tienen poder social o político de discernimiento, la agroforestería se adapta particularmente a las realidades de los pequeños agricultores.

### **Beneficios de los sistemas agroforestales.**

Existe gran cantidad de literatura que reporta los beneficios de incorporar árboles en los sistemas de producción de café (Rivera Posada & Aristizabal Gómez, 1992); (Beer, Muschler, & Kass, 1997); (Altieri, 1999) ; (Beer, y otros, 2003); (Arcila P, Farfán V., Moreno B., Salazar G., & Hincapié G., 2007); (DaMatta & Rodríguez, 2007); entre otros.

Algunos de los beneficios de emplear árboles de sombra en la producción de café son:

Incremento de la materia orgánica y la fauna del suelo: la materia orgánica del suelo aumenta con el tiempo bajo agroecosistemas de café (Beer, y otros, 2003). Beer et al, citado por (Polzot, 2004) reportan de que en un período de diez años después de la conversión de los campos de caña de azúcar en plantaciones de café con sombra de *Erythrina poeppigiana* y *Cordia alliodora*, la materia orgánica del suelo aumentó en un 21% y 9%. La actividad de microorganismos tiende a aumentar debajo de los árboles, debido a que la materia orgánica es incrementada (un abastecimiento de alimentos mejorado) y al ambiente de crecimiento (temperatura y humedad del suelo) (Altieri, 1999).

Fijación de nitrógeno: El uso de especies leguminosas de sombra, como *Erythrina poeppigiana*, *Inga sp.*, y *Gliricidia sepium*, tiene un efecto sobre las tasas de fijación de nitrógeno. Fassbender (1987) reportado por (Polzot, 2004) informa que 60 kg N año<sup>-1</sup> pueden ser fijados por *Erythrina poeppigiana* en asociación con café.

Los árboles de sombra pueden producir hasta 14 Ton/ha/año de hojarasca y restos de poda, que pueden producir hasta 340 kg N/ha/año. Sin embargo, la fijación de nitrógeno por la sombra de los árboles de leguminosas cultivadas a una densidad de 100 a 300 árboles/ha no excede los 60 kg N/ha/año (Beer, Muschler, & Kass, 1997).

El reciclaje de nutrientes: Los árboles pueden afectar el nivel de nutrientes del suelo al explotar las reservas minerales más profundas de la roca parental y recuperar los lixiviados y depositarlos sobre la superficie como humus. Esta materia orgánica aumenta el contenido de humus del suelo, el cual a su vez aumenta su capacidad de intercambio de cationes y disminuye las pérdidas de nutrientes (Altieri, 1999).

Mejora de las propiedades físicas del suelo: Los árboles también pueden mejorar las propiedades físicas del suelo, siendo la estructura del suelo la más importante. La estructura mejora como resultado del incremento de materia orgánica (hojas y raíces), de la acción disociadora de las raíces de los árboles y la actividad de los microorganismos, todos los cuales ayudan a desarrollar agregados del suelo más estables (Altieri, 1999).

Prevención de la erosión del suelo: la hojarasca Natural y la aplicación de residuos de poda de los cafetales contribuye a la reducción de la erosión del suelo y la pérdida de suelo en las plantaciones con sombra. La mayoría de los árboles de sombrero producen hojarasca abundante ("mulch") que protege el suelo del impacto de las gotas de lluvia, favorece el almacenamiento y la regulación del agua y disminuye su escurrimiento. Entre los árboles más apropiados para el sombrero están: guamos (*Inga spp*), nogales (*Cordia alliodora*), chachafrutos (*Erythrina edulis*), caucho (*Hevea brasiliensis*), macadamia (*Macadamia integrifolia*), leucaena (*Leucaena leucocephala*), matarratón (*Gliricidia sepium*) y frutales, entre otros, cuyos sistemas radicales muy profundos (mayores de 1,5 m) permiten un anclaje vertical y lateral mayor que el café, amarrando los suelos para evitar su movimiento ladera abajo (Rivera Posada & Aristizabal Gómez, 1992).

Regulación de la temperatura y la velocidad del viento: Los árboles moderan los cambios de temperatura, dando como resultado temperaturas máximas más bajas y mínimas más altas bajo los árboles, en comparación con las áreas abiertas. La disminución de temperatura y la reducción de los movimientos del aire debido al dosel de los árboles, reducen el promedio de evaporación. También se puede encontrar mayor humedad relativa bajo los árboles en comparación con los sitios abiertos (Altieri, 1999). Los árboles de sombra reducen el estrés de café mejorando las condiciones climáticas adversas. Por ejemplo, los árboles de sombra amortiguan temperaturas extremas altas y bajas hasta 5°C (Beer, Muschler, & Kass, 1997) .

Regulación de las arvenses: El sombrero brindado por los árboles contribuye a la reducción en el número y el porcentaje de cobertura de arvenses (Arcila P, Farfán V., Moreno B., Salazar G., & Hincapié G., 2007). Miguel Altieri reporta que es común el uso de cultivos de cobertura, tales como *Centrosoma pubescens*, *Perania phaseoloides*, *P. javanica* y *Calopo-gonium mucunoide*, en café para reprimir el crecimiento de malezas (Akobundu, 1987) citado por (Altieri, 1999). El sombrero puede sustituir la composición de las especies invasoras permitiendo la propagación de especies menos agresivas (arvenses de hojas anchas), lo que reporta un cambio económico de considerable importancia, aunque la producción total de biomasa por esas invasoras sea constante (DaMatta & Rodríguez, 2007).

Reducción de plagas y enfermedades: La combinación de árboles y cultivos reduce la presión de plagas y enfermedades, y facilita el establecimiento de controladores biológicos. Aunque el aumento de la humedad, debido al aumento de sombra, pueden favorecer la incidencia de algunas enfermedades fúngicas, como *Mycena citricolor* en el café, la sombra tiene incidencia en la reducción de otras enfermedades fúngicas, tales como

*Cercospora coffeicola*, que es más común en las plantaciones de sol. Además, los árboles de sombra en agroecosistemas cafetaleros pueden proporcionar hábitat para controladores biológicos, reduciendo de esta manera la incidencia de enfermedad y la dependencia de plaguicidas (Beer, y otros, 2003). Otro ejemplo es la reducción de la incidencia de chasparria o cercosporiosis (*Cercospora coffeicola*), del minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) y de malezas, especialmente gramíneas (DaMatta & Rodríguez, 2007).

Fuente de productos que los agricultores pueden usar: Los árboles producen gran cantidad de productos importantes para los humanos y los animales. Además del forraje y alimentos proporcionan productos madereros, subproductos como aceites y taninos y productos médicos. Por ejemplo, la acacia negra (*Robinia pseudoacacia*) es una productora de miel importante, fija nitrógeno y es productora de postes para cercos muy durables. *Leucaena spp.*, otra leguminosa que fija nitrógeno, es valiosa como alimento de ganado y de aves en los trópicos, debido a su alto contenido de vitaminas y proteínas. También es una fuente primaria de leña (NAS 1977). Los cultivos de árboles, también pueden complementar la producción de granos. Especies como el castaño (*Castanea sp.*), el algarrobo (*Ceratonia sp.*) y la acacia honey (*Gleditsia sp.*) tienen un valor alimenticio en proteínas, carbohidratos y grasas, mayor que granos convencionales creciendo en tierras marginales sin labranza (Smith 1953), citado por (Altieri, 1999).

En Costa Rica, Somarriba y Beer (1987) citados por (DaMatta & Rodríguez, 2007), estimaron que la producción de madera a partir de 100 árboles de *Cordia alliodora*, en asocio con la plantaciones de café, oscilaba entre 4 y 6 m<sup>3</sup>· ha<sup>-1</sup>· año<sup>-1</sup>. El valor agregado derivado de esta producción “accesoria” de madera podría compensar la reducción en la productividad de la plantación de café (causada por el sombrío y/o por la reducción en el número de plantas de café por hectárea) en más del 17%; ese porcentaje aumenta al 33% cuando los precios del café en el mercado se sitúan en valores intermedios (Somarriba y Beer, 1987; citado por DaMatta & Rodríguez, 2007).

Conservación de biodiversidad: Los SAF proveen hábitat y recursos para especies de plantas y animales, mantienen la conectividad en el paisaje (y de esta manera facilitan el movimiento de animales, semillas y polen), hacen que el paisaje sea menos severo para las especies forestales al reducir la frecuencia e intensidad de incendios, disminuyen los efectos de bordes en los fragmentos forestales remanentes y amortiguan áreas protegidas (Beer, y otros, 2003).

Calidad y cantidad de agua disponible para el cultivo: Los árboles en los SAF influyen en el ciclo del agua al incrementar la intercepción de la lluvia y de nubes (goteo debido a la condensación al chocar las nubes con la vegetación) y al modificar la transpiración y la retención del agua en el suelo, reduciendo así la escorrentía e incrementando la infiltración (Beer, y otros, 2003).

Estudios en Costa Rica han ilustrado los efectos de los SAF sobre el ciclo hidrológico. Por ejemplo, la intercepción de lluvia fue de 16 y 7,5% en plantaciones de café asociadas con *Erythrina poeppigiana* podada periódicamente (555 árboles ha<sup>-1</sup>) o *Cordia alliodora* sin podar (135 árboles ha<sup>-1</sup>), respectivamente (Jiménez 1986), citado por (Beer, y otros, 2003). En áreas de producción de café donde se aplican grandes cantidades de nitrógeno en los fertilizantes químicos, las pérdidas de nitratos por lixiviación fueron más altas en plantaciones de café sin sombra que en cafetales con árboles de sombra (Babbar y Zak 1995), probablemente debido a las mayores tasas de transpiración en los cafetales con árboles (Ávila, 2003; citado por Beer y otros, 2003).

## 5.9 BALANCE DE CARBONO EN CAFÉ

Tradicionalmente, el café se cultiva bajo la sombra del dosel del bosque natural no alterado, donde la composición y estructura del bosque permanece intacto. Sin embargo, debido a la expansión y la intensificación agrícola, gran parte del café establecido hoy en día se produce en forma de monocultivos que, a pesar de inconvenientes físicos y sociales, dan lugar a una mayor producción y los rendimientos (Polzot, 2004).

Varios estudios se han desarrollado, principalmente en Centroamérica y África para evaluar el balance de carbono en sistemas agroforestales, donde se tiene asociado el café con diferentes especies arbóreas.

Todos los sistemas agroforestales son capaces de capturar carbono, a pesar de que en la gran mayoría de estudios se reporta los bosques primarios y secundarios como los principales sistemas naturales de captura. Varios estudios han realizado comparaciones encontrando resultados que en muchos de los casos arrojan resultados diferentes.

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 pisos altitudinales del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca. En este estudio se encontró que el carbono almacenado en la biomasa total fue en promedio de 69,4 Mg C ha<sup>-1</sup>, con una variabilidad entre 9,9 y 208,6 Mg C ha<sup>-1</sup>. El piso altitudinal inferior 600 m de altitud, presentó el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (93,7 Mg C ha<sup>-1</sup>). También se encontró que los bosques secundarios mostraron el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (158,7 Mg C ha<sup>-1</sup>). Se encontraron diferencias significativas ( $p=0,0036$ ) en el carbono almacenado en la biomasa total entre los pisos altitudinales inferior 600, medio 800 y superior 1.300 m de altitud (93,7; 79,6 y 34,8 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Asimismo, se encontraron diferencias significativas ( $p<0,0001$ ) entre el bosque secundario y el SAF laurel-café y poró-café (158,7; 28,3 y 21,0 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente). El carbono total almacenado fue en promedio 171,3 Mg C ha<sup>-1</sup>. Se encontró que el suelo a los

30 cm superficiales fue el mayor reservorio de carbono (102,0 Mg C ha<sup>-1</sup>; 59,5%), similar a los valores reportados por otros autores. La biomasa total almacenada fue 69,3 Mg C ha<sup>-1</sup>, siendo la biomasa aérea la de mayor contribución, con 53,7 Mg C ha<sup>-1</sup>. El carbono total almacenado en los bosques secundarios fue en promedio de 271,7 Mg C ha<sup>-1</sup>, distribuidos en 124,8 Mg C ha<sup>-1</sup> en biomasa aérea total, 113,1 Mg C ha<sup>-1</sup> de carbono orgánico en el suelo, 24,3 Mg C ha<sup>-1</sup> en raíces, 9,6 Mg C ha<sup>-1</sup> en la necromasa (Mena, Andrade, & Navarro, 2011). Estos resultados se pueden ver agrupados en la Tabla 2: Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y Bosque secundario en Costa Rica.

**Tabla 2: Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y Bosque secundario en Costa Rica.**

Localidad	Sistema de uso de la tierra	Carbono en (t C ha <sup>-1</sup> )					
		Aéreo	Raíces	Necromasa	Biomasa	Suelo	TOTAL
AQUIARES	BOSQUE	57,95	12,17	6,87	76,99	167,82	<b>244,81</b>
	SAF (Laurel-café)	12,36	3,06	2,11	17,53	89,46	<b>107</b>
	SAF (Poro-café)	6,15	1,65	2,1	9,91	153,21	<b>163,12</b>
ATIRRO	BOSQUE	161,35	31,95	15,26	208,57	70,11	<b>278,67</b>
	SAF (Laurel-café)	14,17	3,44	1,4	19,01	84,24	<b>103,25</b>
	SAF (Poro-café)	7,07	1,86	2,27	11,2	81,25	<b>92,45</b>
JARDÍN BOTANICO	BOSQUE	154,99	28,74	6,72	190,45	101,27	<b>291,72</b>
	SAF (Laurel-café)	37,55	8,05	2,88	48,48	80,84	<b>129,32</b>
	SAF (Poro-café)	32,06	7,29	2,66	42,01	89,67	131,68

Fuente: Mena y Andrade 2011

Similares estudios conducidos en Costa Rica muestran los beneficios de los SAF café. Un estudio realizado por Luis Fournier en 1996 en Ciudad Colón, encontró que un SAF utilizando *Erythrina poeppigiana* como árboles de sombra contiene 198 t C ha<sup>-1</sup> (Polzot, 2004).

Otro importante trabajo fue realizado en el año 2000 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) junto con la Unión Nicaragüense de Cafetaleros (UNICAFE), la Universidad Nacional Agraria (UNA), el Instituto Nicaragüense de Tecnología agropecuaria (INTA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto del Café en Costa Rica (ICAFE). Se realizaron dos ensayos, el primero situado en Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica y el segundo en Masatepe, municipio de Carazo, Nicaragua. En estos ensayos, se establecieron sistemas agroforestales con diferentes especies arbóreas de asocio y manejados bajo niveles de insumos orgánico y convencional (alto convencional, medio convencional, orgánico intensivo y bajo orgánico). En este estudio se resalta: Los valores promedios de carbono acumulado en la biomasa aérea por subparcela

muestran que en Masatepe el tratamiento SAF *Simarouba glauca* + *Tabebuia rosea* es el SAF que capturo más carbono, con valores entre 20,8 y 25,3 t ha<sup>-1</sup> diferente del SAF *Samanea saman* + *Inga laurina* que reporta entre 15,7 y 21,3 t ha<sup>-1</sup>. El tratamiento control (Pleno Sol) presenta valores promedios entre 1,6 y 1,9 t ha<sup>-1</sup> estadísticamente diferente de los demás tratamientos (Salgado Vásquez, Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua, 2010).

En otro estudio realizado en Perú se determinó la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de la tierra en la región de San Martín, con la finalidad de conocer el potencial de captura de carbono. Los sistemas de uso de la tierra evaluados fueron: Bosque primario, Bosque secundario de diferentes edades, sistemas agrícolas locales maíz (*Zea mays*), arroz (*Oryza Sativa*), pastos (*Brachiaria sp*) y sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) bajo sombra y cacao (*Cacao sp.*). En este estudio se encontró: Con relación a las reservas de carbono los sistemas permanentes y con mayor crecimiento presentan los valores más altos. El Bosque primario contiene un promedio de 485 tm C ha<sup>-1</sup> (100%), valor que se reduce drásticamente si éste bosque se deforesta y quema para plantar cultivos anuales en las mismas áreas llegando a valores muy bajos de menos de 5 Tm C ha<sup>-1</sup> (1%). El sistema de café-guaba, es un sistema de cuatro años y el sistema de cacao con especies forestales de 15 años, ambos sistemas agroforestales presentan valores de 19 Tm C ha<sup>-1</sup>/ha y 47 Tm C ha<sup>-1</sup> respectivamente. Estos valores están por encima de los valores que presentan los sistemas puramente agrícolas de corta duración, lo cual nos demuestra la importancia del establecimiento de éstos sistemas para la recuperación del potencial de captura de carbono en áreas anteriormente perturbadas por tumba y quema y usados para agricultura. Los sistemas agroforestales pueden recuperar ambientalmente áreas perturbadas y tener un sistema productivo cíclico a corto y mediano plazo, con un adecuado y mejor manejo de las tierras de aptitud forestal.

El flujo de carbono en el sistema de bosque secundario de 20 años (3,10 tm C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) fue menor en comparación con el del bosque secundario de 50 años (4,69 tm C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), y esto se debe a las características de éste sistema, el cual fue perturbado y descremado, y presenta especies forestales con DAP (diámetro a la altura del pecho) menores a 30 cm, y con 2,5 m<sup>2</sup> de área basal /ha, mientras que en el bosque secundario de 50 años se observa mayor biodiversidad de especies forestales con DAP mayores a los 30 cm totalizando 20 m<sup>2</sup> de área basal /ha. De este trabajo se puede concluir: El nivel de reservas de carbono en la biomasa de hojarasca de los sistemas boscosos, no es significativo al compararlo con el total de las reservas de carbono de la biomasa aérea; sin embargo si es significativo para sistemas agroforestales. Los sistemas agroforestales secuestraron entre 19 a 47 tm C ha<sup>-1</sup>, dependiendo de la cantidad de especies forestales, tipo de cultivo, edad y tipo de suelo y recuperan el potencial de captura en forma productiva. Los sistemas agrícolas

capturaron poco carbono ( $5 \text{ tm C ha}^{-1}$ ), además generan fugas de gases efecto invernadero cuando se usan agroquímicos y quema de rastrojos, entre otros (Lapeyre, Alegre, & Arévalo, 2004).

En Nicaragua se llevó a cabo otro estudio donde se cuantificó el carbono almacenado en cinco tipos de SAF de café de la comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Los SAF bajo estudio fueron: Café Joven con Sombra Diversificada (CJSD), Café Productivo con Sombra Diversificada (CPSD), Café Productivo con *Inga spp* (CPI), Café Productivo con Especies Maderables (CPEM) y Café Productivo en Abandono (CPAB). Estos fueron a la vez, sub clasificados por rangos de altura de los árboles de sombra (<5, 5-10 y >10 m). En este estudio se encontró que el carbono de la biomasa aérea en árboles de sombra y plantas de café de los SAF representa el 49 y 46%, respectivamente. El carbono total almacenado en los SAF a diferentes rangos de altura oscila entre 143.6 (CJSD >10 m) y 194,7 tC ha<sup>-1</sup> (CJSD <5); mientras que por tipo de SAF es de 144,7 (CPAB) – 166.7 tC ha<sup>-1</sup> (CJSD). El suelo es la fuente con mayor potencial de almacenamiento dentro de los SAF, el cual aporta entre el 75 y el 97% al carbono total.

En los sistemas productivos, los árboles representan la segunda fuente importante, almacenando entre el 5,6 y 13,8%; mientras que la hojarasca y el cultivo de café almacenan del 2,3 al 3,9% y 0,1 al 1,5%, respectivamente. El cultivo de café es la fuente con menor potencial de almacenamiento (Suarés Pascua, 2002).

Otro estudio realizado en Ecuador cuantificó el carbono fijado y almacenado en los sistema silvoagrícolas: *Coffea arabica* + *Inga edulis*, *Coffea arabica* + *Schizolobium parahyba*, *Coffea arabica*+*Cordia alliodora*, *Theobroma cacao*+*Cordia alliodora*, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. En este estudio los SAF seleccionados fueron de 6,5 años de edad; los contenidos de carbono se evaluaron en los componentes del sistema: suelo (0-30 cm. de profundidad); y la hojarasca (necromasa); la biomasa aérea de las plantas de café y cacao y de los árboles asociados guaba, pachaco y laurel. Los resultados fueron los siguientes: 1) Los suelos de Caluma presentaron una mayor capacidad de almacenamiento de carbono (92,8 t/ha), en comparación a los suelos de Pichilingue (55,4 t/ha); 2) En Pichilingue se determinó una mayor capacidad de captura de carbono a nivel de la biomasa aérea de los SAF con café y cacao; 3) Los suelos de los sistemas agroforestales con café y cacao son depósitos importantes de carbono; 4) A nivel de la biomasa aérea se determinó un contenido de 4,12 t C/ha, mientras que en los arbustos de cacao fue de 1,80 t C/ha; 5).

La asociación de especies forestales de rápido crecimiento como el pachaco con los cultivos de café y cacao permite incrementar los contenidos de carbono a nivel de la biomasa; 6) Los SAF de café y cacao tienen una capacidad de captura y almacenamiento de carbono de 115 y 121 t/ha, respectivamente; 7). Los SAF en el café

tienen potencial de fijación de carbono de 187,5 t C/ha a los 6,5 años, en el caso del cacao 196,7 t C/ha a la misma edad (Corral Castillo, 2006).

### **Estudios de comparaciones entre diferentes sistemas de producción**

Son pocos los estudios que se han desarrollado comparando el balance de carbono entre diferentes sistemas de producción. Tener estos estudios es un paso fundamental para proponer acciones que armonicen la producción con las necesidades del planeta, los requerimientos del mercado y los mandatos del protocolo de Kioto.

Todos los sistemas de producción de café son capaces de secuestrar carbono en la biomasa, los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas sin sombra. Si bien las plantaciones de café sin sombra secuestran carbono, los árboles de sombra incrementan la posibilidad de secuestro (Rikxoort, 2011).

La capacidad de almacenamiento de carbono de las fincas cafeteras es directamente proporcional a la cantidad de biomasa leñosa presente. El tipo de cultivo que incorpora un mayor número de árboles y por consiguiente, de capacidad potencial de almacenar carbono, es el que se conoce como “Rústico” (42.4 TC/ha), seguido por los “Policultivos” (promedio: 16.1 TC/ha). En cambio, el cultivo denominado “Monocultivos” tiene una menor capacidad potencial de almacenar carbono (4.5 TC/ha), debido a que hay un menor número de árboles presentes en esa clase de fincas (Manson R.H., et al, 2008).

En una tesis realizada por Gabriela Ávila en Costa Rica se cuantificó el carbono fijado y almacenado en los sistemas agroforestales café (*Coffea arabica*) + eucalipto (*Eucalyptus deglupta*) de cuatro, seis u ocho años de edad, café + poró (*Erythrina poeppigiana*), pasto brachiaria (*Brachiaria brizantha*) + mangium (*Acacia mangium*) y pasto brachiaria + eucalipto; y en los monocultivos de café y pasto brachiaria o pasto ratana (*Ischaemum indicum*) a pleno sol. Los resultados obtenidos mostraron que en promedio los sistemas agroforestales café - eucalipto almacenaron 40% más de carbono que los sistemas silvopastoriles. El sistema de café que almacenó más carbono fue café-poró con un total de 195 t ha<sup>-1</sup>; el de menor almacenamiento fue café-eucalipto de 8 años con 121 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 3 Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y monocultivos en Costa Rica).

Estos resultados dependen de las condiciones de cada sitio (clima, suelo, manejo). Los resultados de esta investigación fueron semejantes a los reportados en la literatura respecto a sistemas agroforestales con café en varios lugares de América Central. La mayor parte del carbono estuvo almacenado en el suelo, aun sin incluir las raíces de más de 2 mm de diámetro. El almacenamiento en este componente fue mayor en el sistema café -poro

(184 t ha<sup>-1</sup>) y menor en café-eucalipto de ocho años (109 t ha<sup>-1</sup>). En los sistemas con pastos, el carbono almacenado fue mayor en los sistemas silvopastoriles (95 t ha<sup>-1</sup>), con respecto a las pasturas en monocultivo (68 para brachiaria y 84 t ha<sup>-1</sup> para ratana).

**Tabla 3 Almacenamiento de carbono en diferentes SAF y monocultivos en Costa Rica.**

Sistema agroforestal	Arriba del suelo	Orgánico del suelo	Total
		(0-25 cm)	
Café-eucalipto* (4 años)	12.5 (4.2)**	139.1 (23.3)	151.6
Café-eucalipto (6 años)	7.7 (2.5)	161.0 (54.4)	168.7
Café-eucalipto (8 años)	12.3 (5.9)	108.6 (15.4)	120.9
Café-poró (más de 10 años)	10.6 (4.0)	184.4 (13.8)	195.0
Brachiaria-mangium (3 años)	8.9 (0.1)	86.6 (17.5)	95.5
Brachiaria-eucalipto (3 años)	7.5 (0.2)	87.3 (0.4)	94.8
Monocultivo			
Café a pleno sol	10.4 (3.5)	153.9 (37.0)	164.3
Pasto brachiaria a pleno sol	2.0 (0.1)	66.2 (16.4)	68.2
Pasto ratana a pleno sol	0.12 (0.0)	84.2 (11.1)	84.3

\*Café (*Coffea arabica*); eucalipto (*Eucalyptus deglupta*); brachiaria (*Brachiaria brizantha*), mangium (*Acacia mangium*), ratana (*Ischaemum indicum*). \*\*El valor en paréntesis corresponde a la desviación estándar entre unidades de muestreo en el mismo sitio.

Fuente: (Avila Vargas, Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol, 2000)

Por otro lado Las tasas de fijación de carbono del componente arbóreo de los SAF con café y pastos variaron entre 0.3, para poro en asocio con café y 2.2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para pasto mangium asociado con brachiaria (Avila Vargas, Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol, 2000). Como puede verse en la Tabla 4: Fijación de carbono del componente arbóreo en SAF y pastos en Costa Rica, el número de árboles por unidad de área es de gran importancia al momento de la fijación.

**Tabla 4: Fijación de carbono del componente arbóreo en SAF y pastos en Costa Rica.**

Sistema agroforestal	Densidad	Tasa de fijación
	(árboles ha <sup>-1</sup> )	(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Café-eucalipto* (4 años)	277	1.1
Café-eucalipto (6 años)	156	0.4
Café-eucalipto (8 años)	156	0.4
Café-poró (más de 10 años)	156	0.3
Brachiaria-eucalipto (3 años)	370	1.8
Brachiaria-mangium (3 años)	370	2.2

\*Café (*Coffea arabica*); eucalipto (*Eucalyptus deglupta*); brachiaria (*Brachiaria brizantha*), mangium (*Acacia mangium*).

Fuente: (Avila Vargas, Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol, 2000)

En México en el estado de Veracruz se realizó un estudio con el objetivo de estimar el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales (SAF) con base en café. Para ello, se estimaron los reservorios de carbono en biomasa vegetal y la materia orgánica edáfica existente en sistemas agroforestales de café-plátano, café-macadamia, café-cedro rosado, café-ganado ovino y café-chalahuite, y como referencia de una condición no agroforestal se incluyeron un bosque primario y un potrero con pradera natural. En el bosque primario (BoP) se encontró la mayor cantidad de carbono, con 266 Mg C·ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 5: Carbono almacenado en los diferentes sustratos en los SAF en México**

Sistema agroforestal	Carbono almacenado (Mg C·ha <sup>-1</sup> )			
	Arbóreo	Herbáceo	hojarasca	Total
<i>Silvopastoril</i> (Sp)	2	0.6	1.2	3
<i>Bosque caducifolio</i> (BoP)	266	0.6	1.9	269
Café + Chalahuite (Ca+Ch)	29	0.0	1.9	31
Café + Macadamia (Ca+Ma)	34	0.0	0.9	35
Café + Cedro Rosado (Ca + Ce)	114	0.1	0.3	115
Café + Plátano (Cs + Pl)	27	0.0	1.0	28
Potrero (P)	0	1.8	0.0	2
Arbóreo (árboles vivos y muertos), Herbáceo (arbustos y hierbas)				

Fuente: (Espinoza Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez Alarcón, & Torres Rivera, 2012)

El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, fue el tratamiento café + cedro rosado (Ca + Ce) con 114 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Los tratamientos BoP y Ca + Ch presentaron la mayor cantidad de carbono en hojarasca, con 1.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>. El chalahuite es una especie muy utilizada en los SAF tradicionales, debido a la incorporación de materia orgánica, característica que resalta en lo obtenido en esta evaluación, al tener una producción de hojarasca similar en el bosque. El mayor valor obtenido del carbono total de la biomasa aérea fue el del tratamiento BoP, con 269 Mg C·ha<sup>-1</sup>; por tratarse de un bosque primario conservado, era de esperarse ese valor. En los sistemas agroforestales evaluados, el tratamiento Ca + Ce con 115 Mg C·ha<sup>-1</sup> representó el sistema con mayor valor de carbono acumulado.

De acuerdo con los resultados, el tratamiento Ca + PI fue el que presentó mayor contenido de carbono en el suelo, con 73 Mg C ha<sup>-1</sup>. El bosque primario representó el sistema que mayor cantidad de carbono almacenó, con un total de 86 Mg·C ha<sup>-1</sup>, representando 24 % del total que tiene el sistema.

Como se puede observar en

Tabla 5: Carbono almacenado en los diferentes sustratos en los SAF en y Tabla 6: Carbono almacenado en diferentes SAF en , la ganancia de carbono en los sistemas agroforestales es evidente. A excepción del sistema silvopastoril, el combinar dos o más especies en un sistema contribuye a que haya mayor cantidad de carbono, lo cual se confirma en esta evaluación (Espinoza Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez Alarcón, & Torres Rivera, 2012).

**Tabla 6: Carbono almacenado en diferentes SAF en México**

Sistema (Tratamientos)	C aéreo	C suelo	C total
	(Mg·ha <sup>-1</sup> )		
Silvopastoril (Sp)	3	62	65
Bosque caducifolio (BoP)	269	86	355
Café + Chalahuite (Ca + Ch)	31	54	85
Café + Macadamia (Ca + Ma)	35	50	85
Café + Cedro rosado (Ca + Ce)	114	58	172
Café + Plátano (Ca + PI)	28	73	101
Potrero (P)	2	50	52

Fuente: (Espinoza Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez Alarcón, & Torres Rivera, 2012)

En otro estudio ejecutado en el Departamento de Jinotega en Nicaragua (Medina Benavides, Calero González, Hurtado, & Vivas Soto, 2009) se seleccionaron tres tipologías de cafeto, de acuerdo a la densidad y edad para cuantificar carbono orgánico almacenado en sistema de café. Tipología 1: Café Pacamara (plantado a 1.41\*1.73 m), combinado con cinco especies arbóreas (*Inga vera*, *Erythrina fusca* Lour, *Erythrina poeppigiana* (Walp) O.F. Cook, *Croton shiediumun* H.B.K. , *Solanum* sp), de una edad promedio entre 3 y 4 años (6 x 7 m). Tipología 2: Café Catimor variedad Icafé 90 (plantada a 1.0\*1.66 m), asociado con guaba (*Inga vera*), de 8 y 9 años de edad. Tipología 3: Café Catuai (plantado a 0.93\*1.75 m) más guaba (*Inga vera*), de 9 a 10 años de edad. Los mayores valores de carbono se encontraron en la tipología 2, con 15.23 tMC ha<sup>-1</sup>, siguiéndole la tipología 3 con 6.66 tMC ha<sup>-1</sup> y por último la tipología 1 con 4.7 tMC ha<sup>-1</sup> (Tabla 7: Contenido de carbono en diferentes tipologías de cafeto).

El alto contenido de carbono en la biomasa aérea en la tipología 2, es debido a la edad y la cantidad de árboles por hectáreas, mientras que la tipología 1 muestra menor cantidad de carbono en su biomasa aérea, aun teniendo la mayor densidad, diversidad de especies, menor edad (3-4 años) y los menores diámetro de fuste a la altura del pecho. La tipología tres, fue la segunda con mayor valor de almacenamiento de carbono. Esta contiene dos especies arbóreas y se diferencian por una densidad menor, aunque tenga los mayores diámetros y edad.

Esto evidencia que existe una relación directa entre la edad, la densidad y la especie. Lo que pone de manifiesto que conforme aumenta la edad hay un aumento del grosor y altura del árbol, aunque los árboles de sombra se mantienen podados a una altura límite de cinco metros excepto las especies nativas como el nogal. Los árboles de sombra, presentan la segunda fuente de almacenamiento de carbono después del suelo, en los sistemas agroforestales de café. Esta fuente, aporta entre 5.5 y 14.50 % al carbono total del sistema. Las tipología con árboles de 8-9 años y densidad de 176 árboles por hectáreas, aportaron mayor cantidad de carbono.

En el sistema, los árboles que menos carbono aportaron fueron los de 3-4 años, una densidad de 552 árboles por hectáreas, compuesta por cinco especies de sombra. Esta fuente contribuyó con 4.7 %, bastante cercano a la obtenida en el sistema de 9 -10 años de edad y con densidad de 155 árboles por hectáreas, (5.75 % de contribución al carbono total). Esto indica que la densidad de árboles y la edad están ligadas a la cantidad de carbono almacenado en término de área.

Con relación al contenido de carbono en plantas de cafeto se encontró que existen variaciones en el contenido de carbono en las diferentes tipologías de cafeto. La tipología dos, perteneciente a la variedad de café Catimor, registró el mayor contenido de carbono con 4.62 tMC ha<sup>-1</sup>, siguiéndole, la variedad Catuai con 4.46 tMC ha<sup>-1</sup> (tipología 3) y por último la variedad Pacamara con 0.8 tMCha<sup>-1</sup> (tipología uno). Esta última obtuvo los valores más bajo, debido a su establecimiento reciente, menos de cuatro años, por lo que no han desarrollado suficiente biomasa como el resto de sistemas.

**Tabla 7: Contenido de carbono en diferentes tipologías de cafeto**

Componente	Tipología 1		Tipología 2		Tipología 3		Media	%
	tMC ha <sup>-1</sup>	%	tMC ha <sup>-1</sup>	%	tMC ha <sup>-1</sup>	%		
Árbol	4.7	85.5	15.2	76.7	6.7	59.9	8.9	59.9 – 15.2
Café	0.8	14.6	4.6	23.3	4.5	40.1	3.3	14.6 – 40.1
Totales	5.5	100.0	19.9	100.0	11.1	100.0	12.2	100.0

Fuente: (Medina Benavides, Calero González, Hurtado, & Vivas Soto, 2009)

El contenido de carbono en cafeto Catimor, supera a las plantaciones de Catuai, aún teniendo esta la mayor densidad de plantas, razones que podrían atribuirse al manejo del cultivo, como es la aplicación de la poda de las plantas de café, que evita que tenga un desarrollo normal, conlleva menor biomasa y por ende menor carbono acumulado. A esto hay que agregar unido el efecto de auto sombreado del cultivo, lo cual, es la causa principal de la disminución fotosintética del cafeto y por lo tanto, de su crecimiento (Medina Benavides, Calero González, Hurtado, & Vivas Soto, 2009). Este tipo de conclusiones deben analizarse con detenimiento pues no se puede comprometer la productividad del cultivo a expensas de capturar más carbono a excepción de que los pagos ambientales compensen el sacrificio en productividad.

Muchos de los resultados han llegado a conclusiones y valores parecidos de captura de carbono, en su tesis de grado Henk van Rikxoort realizó mediciones en diferentes sistemas de producción encontrando bajas emisiones de carbono para policultivos tradicionales (5,4 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por kg de producto) y policultivos comerciales (4,9 kg CO<sub>2</sub>-e/kg); en comparación con mayores emisiones de monocultivos con sombra (7,8 kg CO<sub>2</sub> -e/kg) y monocultivos a libre exposición solar (8 kg CO<sub>2</sub> -e/kg) (Rikxoort, 2011).

La misma tendencia se pudo observar al revisar la información relacionada por unidad de área: Policultivos, 81,2 t CO<sub>2</sub> -e/ha-1, versus monocultivos. 27 t CO<sub>2</sub> -e/ha-1).

En nuestro país pocos estudios han estado dirigidos a nuevas especies en asocio, por esto es importante determinar los beneficios tanto ambientales como económicos de estos sistemas, es decir, estimar la capacidad que posee cada sistema agroforestal de fijar carbono y su valor económico por el servicio ambiental así como también estimar la rentabilidad de dichos sistemas. De esta forma, determinar así el sistema que produce el máximo beneficio productivo, ecológico y financiero.

## **5.10 PRINCIPALES FUENTES DE EMISIONES DE CARBONO EN CAFÉ**

Dentro de las principales fuentes de emisión de GEI provenientes de la producción de café se pueden citar:

- La producción y aplicación de fertilizantes nitrogenados que generan N<sub>2</sub>O.
- La producción y aplicación de plaguicidas.
- Emisiones que se generan en el proceso de beneficio húmedo del café.

En el estudio realizado por Rikxoort se cita los siguientes porcentajes de emisiones, dependiendo de la fuente (Rikxoort, 2011):

- 20 % provenientes de la producción de fertilizantes.
- 16 % provenientes de la aplicación de fertilizantes nitrogenados (gases N<sub>2</sub>O)
- 34 % de la producción de aguas residuales provenientes del beneficio
- 11 % del manejo de los residuos del cultivo

En una evaluación realizada por Solidaridad y UTZ CERTIFIED en Fincas productoras de café en Kenia usando la herramienta *Cool Farm Tool*® encontraron que al evaluar diferentes sistemas de producción (alto, medio, bajo), las emisiones de gases de efecto invernadero por hectárea variaban entre 501,3 kg CO<sub>2</sub> /Ha (Manejo Medio, Wamuguma) y 3075 kg CO<sub>2</sub> /Ha (Manejo alto, Karimikui). El bajo nivel de emisiones de Wamuguma es causada por el cambio en la práctica de labranza, compensando las emisiones de los cambios en su manejo (desde labranza a labranza cero). También existe diferencia al comparar los rendimientos por hectárea. Los altos rendimientos (1,7 toneladas de pergamino) corresponden con moderado nivel de emisiones de granja (2075 kg/ha) y los bajo rendimientos (0,3 toneladas de pergamino) con mayores emisiones por hectárea (2603 kg/ Ha) (Nikkels, 2011).

En evaluación realizada por Sangana Commodities Ltd y la GIZ usando la herramienta *Cool Farm Tool*® encontraron que a nivel de finca la principal fuente de emisiones es la que se origina a partir de la producción y uso de fertilizantes, unida al manejo de los residuos de cultivo (Sangana Commodities Ltd y GIZ, 2011).

En el 2011 se realizaron pruebas piloto para medir las emisiones de carbono en diferentes sistemas de producción en café en el departamento de Caldas. En las mediciones realizadas utilizando la herramienta *Cool Farm Tool* se encontró que el 33,6% (la mayor cantidad de emisiones) provienen del manejo de aguas residuales, seguido por las emisiones inducidas por fertilizantes con el 32,8 % (Tabla 8 Fuente de emisiones de carbono en café). Estos hallazgos coinciden con la información reportada en la tesis de Rikxoort, 2011. El 81 % de las emisiones en café provienen de 3 prácticas de manejo: el manejo de aguas residuales, las emisiones inducidas por fertilizantes y el transporte fuera de la finca (Isaza Ramirez, 2011).

**Tabla 8 Fuente de emisiones de carbono en café.**

<b>Fuente de emisiones</b>	<b>Promedio (Kg CO2 eq /Ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
Aguas residuales	2911	34%
Emisiones inducidas por fertilizantes	2850	33%
Transporte fuera de finca	1327	15%
Manejo de residuos de cultivos	658	8%
Producción de fertilizantes	619	7%
Pesticidas	209	2%
Procesamiento primario	85	1%
Uso de Energía en campo	15	0%
Total	8674	

Fuente: (Isaza Ramirez, 2011)

## **5.11 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN DE CARBONO**

Existen diferentes y numerosas herramientas y modelos disponibles en el medio para cuantificar las emisiones y captura de GEI. Las Calculadoras de GEI se han desarrollado siguiendo diferentes enfoques, con diferentes objetivos. También cada herramienta es adecuada para una cobertura geográfica definida. La cuantificación de emisiones provenientes de la agricultura requiere de diferentes mediciones, en el caso de la medición de carbono en café a nivel de finca se debe cuantificar las diferentes fuentes de emisiones como: emisiones provenientes de la fertilización, emisiones del manejo del suelo, emisiones asociadas con el manejo de los residuos y los subproductos del beneficio, entre otras. Aunque cada herramienta tiene ventajas y desventajas, a la hora de seleccionar una se deben tener en cuenta criterios como:

- Confiabilidad y versatilidad de la herramienta para calcular de la manera más precisa posible todas las emisiones y capturas que se generan en el sistema de producción.

- Aceptación de la herramienta por parte del mercado.
- Facilidad de uso y aplicabilidad en campo.

La FAO (FAO, 2012) realizó un trabajo de análisis de las principales herramientas existentes, adicionalmente en el documento citado propone una metodología para escoger la herramienta de medición (Tabla 9 Lista de calculadoras existentes para medición de carbono en agricultura).

**Tabla 9 Lista de calculadoras existentes para medición de carbono en agricultura**

Calculadora	Desarrollador	Persona a cargo
ALU	Colorado State University, (USA)	Stephen M. Ogle
Calculateur AFD	Agence Francaise de Developpement (FR)	
CALM	Country land and Business Association (UK)	Derek Holliday
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	AERU, Lincoln university (NZ)	Caroline Saunders
Carbon Farming Calculator	Carbon Farming Group (NZ)	Clayton Wallwork
CBP; carbon benefit project	GEF, Colorado State University (USA)	Eleanor Milne, Mark Easter
CFF Carbon Calculator	Farm Carbon Cutting Toolkit ( UK)	Jonathan Smith
Climagri®	ADEME, calculator developed by Solagro (FR)	Sarah Martin, Sylvain Doublet
Cool FarmTool	Unilever Sustainable Agriculture, Sustainable Food Lab; University of Aberdeen (UK)	Jon Hillier (Aberdeen University)
CPLAN v2	SEE360 (UK)	Drew Coulter, Ron Smith & Jan Dick
Dia'terre®	ADEME (FR)	Audrey Trévisiol
EX-ACT	FAO	Martial Bernoux, Louis Bockel
FarmGAS	Australian Farm Institute (AUS)	Renelle Jeffrey
Farming Enterprise Calculator	Queensland university, Institute for Sustainable Resources (AUS)	Peter Grace
Full CAM	Australian Government (AUS)	-
Holos	Agriculture and Agri-food Canada (CAN)	José M. Barbieri

IFSC	Peter University of Illinois (USA)	David Kovaicic, Peter McAvoy, Tim Marten, and Aaron Petri
USAID FCC	Winrock International (USA)	Felipe Casarim and Nancy Harris

Fuente: (FAO, 2012)

Dentro de las opciones de calculadoras disponibles se destacan:

### **CLA CALM Calculator**

La CLA CALM Calculator mide emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O que se generan de prácticas de manejo del suelo y las capturas del suelo y los árboles. Esta herramienta ha sido desarrollada por el Country Land and Business Association (CLA) en asocio con Savills. Las fuentes de emisiones de esta calculadora incluyen: uso de energía y combustibles, ganadería, cambios en el uso del suelo, aplicación de fertilizantes nitrogenados y materia orgánica. Estas emisiones se contrastan contra las capturas del suelo y los árboles del sistema de producción existente (Country Land and Business Association, 2014).

### **EX – ACT Carbon Balance Tool (FAO, 2013)**

La EX-ACT (EX-Ante Carbon Balance Tool) es una herramienta desarrollada por La FAO, está dirigida a proporcionar estimaciones ex-ante del impacto de proyectos de agricultura y silvicultura relacionados con emisiones y captura de GEI.

La calculadora tiene un enfoque modular, en cada módulo se describe un uso específico del suelo, siguiendo una estructura lógica de tres pasos:

- Una descripción general del proyecto (área geográfica, el clima y las características del suelo, la duración del proyecto).
- Identificación de los cambios en el uso del suelo y las tecnologías previstas por los componentes del proyecto que utilizan "módulos" específicos (la deforestación, la forestación, la degradación de los bosques, los cultivos anuales / perennes, el cultivo del arroz, pastizales, ganado, insumos, energía).
- Cálculo de balance de carbono con y sin el proyecto utilizando los valores por defecto del IPCC y, cuando esté disponible coeficientes específicos de la región.

## Cool Farm Tool® (CFT)

La Cool Farm Tool (CFT) es una calculadora de emisiones de GEI basada en investigaciones previas que han dado como resultado un amplio número de datos e indicadores que se han definido para su uso. La herramienta de medición se ha desarrollado utilizando información que el agricultor puede tener fácilmente disponible en su finca. La herramienta utiliza factores de emisión pre definidos (IPCC Nivel 1), y modelos de simulación basados en procesos que requieren datos de entrada de mayor complejidad (IPCC Nivel 3) (Cool Farm Institute, 2012)

La CFT ha sido desarrollada por Unilever y los investigadores de la Universidad de Aberdeen para ayudar a los agricultores a medir y entender las emisiones de GEI que se generan a nivel de finca. La herramienta se ha diseñada para que sea sencilla, pero científicamente robusta en el complejo campo de la medición de carbono, es por esto que tiene validez científica. La herramienta ha sido probada y adoptada por un amplio rango de compañías multinacionales quienes la están usando para trabajar con sus proveedores para medir, manejar y reducir las emisiones de GEI en un esfuerzo por mitigar el cambio climático global. La base para el desarrollo de la herramienta *Cool Farm Tool*® han sido los métodos sugeridos por el IPCC para hacer análisis de inventarios de GEI. Estos métodos varían en grado de complejidad desde los más simples (nivel 1) que usan factores globales o regionales, pasando por factores de complejidad media (nivel 2) derivados de estadísticas y resultados de investigaciones nacionales hasta los más métodos más complejos (nivel 3) que involucran medidas en campo, modelaciones locales y son de mayor precisión (IPCC, FAO, 2009).

La herramienta identifica los “puntos calientes” y hace fácil para los agricultores probar escenarios alternativos de manejo, al mismo tiempo que identificar los escenarios que tienen un impacto positivo en el balance total de emisiones de GEI. A diferencia de otras calculadoras existentes, la CFT incluye cálculos de secuestro de carbono por el suelo, que es un componente clave de agricultura que tiene ambos beneficios, de mitigación y adaptación.

La *Cool Farm Tool*® fue revisada, mejorada y adoptada durante más de dos años (2010-12) por el “*Global Farming Assessment Cool Farming Options*”, liderado por el *Sustainable Food Lab* en asocio con la Universidad de Aberdeen y Unilever. La iniciativa (*Cool Farming Options*) fue patrocinada por 17 socios e incluyó pilotos en 16 cultivos en 15 países. El proyecto tuvo adicionalmente otros ocho proyectos piloto en otros 7 países en 6 cultivos adicionales, implementados por socios no patrocinadores (Cool Farm Institute, 2012). Estas referencias de uso le dan a la herramienta *Cool Farm Tool*® un amplio respaldo y confiabilidad científica para ser usada en el presente trabajo de investigación.

## **Componentes de la CFT y estructura**

Como ya se ha planteado la herramienta CFT utiliza factores y métodos de emisión definidos por el IPCC como nivel 1, nivel 2 y nivel 3. Los métodos del nivel 1 están diseñados para que resulten los más simples de usar, para lo cual se suministran ecuaciones y los valores de los parámetros por defecto (p. ej. factores de emisión y de cambio en las existencias). Para ser usados es necesario contar con datos de la actividad específicos por país, aunque, en lo referido al nivel 1, a menudo se dispone mundialmente de fuentes de estimaciones de datos de la actividad (p. ej. tasas de forestación, estadística de producción agrícola, mapas de cobertura de la tierra a nivel global, uso de fertilizantes, datos sobre la población ganadera, etc.).

En el nivel 2 se emplea el mismo abordaje metodológico que en el nivel 1, pero se aplican factores de emisión y de cambio en las existencias que se basan en datos específicos del país o de la región en lo referido a las categorías más importantes de uso de la tierra o de ganado. Los factores de emisión definidos por país son más apropiados para las regiones climáticas, los sistemas de uso de la tierra y las categorías de ganado del país de que se trata. Es típico que en el nivel 2 se utilicen datos de resolución temporal y espacial y de actividad más desagregada, de manera que correspondan con los coeficientes definidos para el país por regiones específicas y por categorías de uso especializado de la tierra o de ganado.

En el nivel 3, se utilizan métodos de orden superior, incluidos modelos y sistemas de medición de inventario, hechos a medida para satisfacer las circunstancias nacionales que se repiten en el tiempo, basados en datos de la actividad de alta resolución y desagregados a nivel sub-nacional. Estos métodos de orden superior ofrecen estimaciones de mayor certeza que los niveles más bajos. Estos sistemas pueden incluir muestreos de campo exhaustivos realizados a intervalos regulares y/o sistemas de datos sobre edad, clase/producción basados en sistemas de Información Geográfica (GIS, del inglés Geographic Information Systems), datos sobre suelos y datos de la actividad de uso y gestión de la tierra, que integran varios tipos de monitorización.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 LOCALIZACIÓN

El trabajo de investigación se desarrolló en la finca La Unión en la vereda La Cabaña del municipio de Manizales a una altitud de 1400 m, con temperatura promedio y precipitación anual de 22°C y 2100 mm, respectivamente. Los suelos de estas zonas son clasificados como Andisoles típicos derivados de cenizas volcánicas. La finca tiene un área en producción de 28,37 hectáreas, con un rendimiento promedio por hectárea de 3.125 Kilos de café pergamino seco (c.p.s) y una densidad promedio de siembra de 7.953 árboles por hectárea. En la Tabla 10 Estructura de lotes de café finca la Unión se observa como están estructurados los lotes de café de la finca. Este sistema productivo presenta las siguientes características:

- Altas densidades de siembra (más de 7.000 árboles por hectárea)
- Ausencia o mínima cantidad de sombra.
- Cultivo altamente tecnificado, con uso de gran cantidad de insumos externos principalmente fertilizantes.
- Alta producción por área.
- En la actualidad la finca se encuentra certificada en el estándar de sostenibilidad UTZ Certified e implementa Buenas Practicas Agrícolas.

La investigación desarrollada fue de tipo cuantitativo no experimental. Aprovechando la herramienta Cool Farm Tool®, que más adelante se describe, se recogió información cuantitativa en finca sobre el balance de carbono en cada una de las etapas de producción de café. En la investigación se evalúa el balance de carbono en un sistema de producción ya establecido, con unas condiciones de manejo que a criterio del propietario hacen viable económicamente la finca.

**Tabla 10 Estructura de lotes de café finca la Unión.**

Lote	Árboles	Área en café (Hectáreas)	Densidad (árboles/ha)	Zoca/siembra	Año renovación
1	41.120	5,41	7601	zoca	ene-12
2	12.610	1,76	7165	siembra	ene-12
3	52.750	7,19	7337	zoca	ene-09
4	28.300	3,46	8179	zoca	ene-10
5	51.380	5,22	9843	zoca	ene-11
6	39.481	5,33	7407	siembra	ene-13
<b>Total</b>	<b>225.641</b>	<b>28,37</b>			

## 6.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE MEDICIÓN DE GEI

Para evaluar y cuantificar las emisiones y capturas que se generan en el proceso se utilizó la herramienta *Cool Farm Tool*®. Esta es una herramienta para calcular los GEI a nivel de finca, fue desarrollada por Sustainable Food Lab (Laboratorio de Alimentos Sostenibles), Universidad de Aberdeen, Unilever plc. Aunque esta armonizada con otras calculadoras, esta herramienta se caracteriza por:

- Está enfocada en el agricultor. Haciendo que su manejo sea fácil, de manera que la información de entrada fácilmente se puede encontrar disponible en la finca.
- Reconoce factores específicos del contexto evaluado que influyen en las emisiones de GEI tales como: variaciones geográficas y climáticas, características del suelo, prácticas de manejo del cultivo.
- El modelo genera información de salida en términos de Toneladas de dióxido de carbono por hectárea [ $t\text{ CO}_2\text{-e/ha-1}$ ] y kilogramos de dióxido de carbono por kilogramo de producto [ $kg\text{ CO}_2\text{-e/kg-1}$ ] de esta forma se evalúa el desempeño del sistema de producción en términos de eficiencia en el uso del suelo y eficiencia por unidad de producto (Café pergamino seco).

Alguna información utiliza modelos empíricos construidos a partir de cientos de estudios revisados por pares para transformar alguna información recolectada en finca.

La Calculadora tiene siete secciones, cada una en hoja de cálculo dentro de un archivo de Excel separada, relacionadas a:

- Información general (localización, año, producto, área de producción, clima)
- Manejo del cultivo (operaciones agrícolas, protección del cultivo, uso de fertilizantes, manejo de residuos)
- Secuestro (uso y manejo de la tierra, Biomasa aérea)
- Ganadería (opciones de alimentación, fermentación entérica, excreciones de N, manejo de estiércol)
- Uso de energía de campo (irrigación, maquinaria agrícola, etc.)
- Transformación primaria (fábrica, almacenamiento, etc.)
- Transporte (por carretera, ferroviario, aéreo, barco).

En el anexo 1 se muestran las diferentes hojas de cálculo, con la información que se recolecta en la calculadora *Cool Farm Tool*®.

### **6.3 CONSTRUCCIÓN DE GUÍA DE APOYO PARA FACILITAR LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN FINCA**

Con el análisis de la herramienta *Cool Farm Tool*® y la ficha para el levantamiento de datos de campo se definió para que preguntas se debía construir una ayuda que facilitara la recolección de información en campo. Producto del análisis se generó la Guía de apoyo para diligenciar la ficha para levantamiento de datos de campo (Anexo 2). Este documento se construyó con base a:

- Experiencia de campo del profesional que realizó la investigación.
- Consulta de referencia a expertos.
- Avances técnicos e investigación científica de CENICAFE (Centro Nacional de Investigaciones del Café, Colombia).
- Algunas mediciones previas que se han realizado en la finca.

Para la selección de la finca y lotes para realizar mediciones se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Finca ubicada en zona óptima para la producción de café (altura sobre el nivel del mar y temperatura promedio).
- Área de café económicamente viable, que sea una unidad económica mínima rentable.
- Preferiblemente que tuviera un programa de implementación de buenas prácticas agrícolas en marcha, esto

es, que le esté apuntando a un modelo de caficultura sostenible.

- Disposición del propietario para realizar el trabajo de investigación.
- Disponibilidad de información.

Con base en los diferentes sistemas productivos que se encontraron en la finca y el número de lotes existentes se conformaron subgrupos de medición teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Sistema de producción existente (manejo de monocultivo, asociación o presencia de sombra).
- Edad del cultivo
- Distancias de siembra

## **6.4 VISITAS A FINCA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

El trabajo de campo se realizó entre los meses de noviembre de 2013 y enero de 2014. Para recolectar la información de la manera más efectiva y precisa se estableció el siguiente procedimiento:

1. Reunión con el propietario y explicación de los objetivos del trabajo: en este primer contacto también se entregó al productor un listado de requerimientos de información que se necesitaban para realizar el trabajo.
2. Concertación de fechas y horarios para realizar las visitas a finca y ejecutar el trabajo de campo.
3. Trabajo de campo: para recoger la información en finca se utilizan las siguientes estrategias:
  - Entrevista con personal clave encargado de los diferentes procesos: asistente técnico, administrador, patieros.
  - Recorrido por los lotes para hacer inspección visual y efectuar las mediciones requeridas.
  - Revisión de registros e información escrita disponible.
  - Aplicación de algunos estándares y medidas definidas con anterioridad de acuerdo a la realidad en la finca (uso de la guía de apoyo)

## **6.5 PROYECCIÓN DE OPCIONES DE GESTIÓN DEL CARBONO**

Después de realizadas las mediciones y con base en la disponibilidad de tecnología se construyeron escenarios simulados de adopción de prácticas que deberían llevar a la finca a un modelo de gestión eficiente de carbono. En la construcción de los escenarios simulados se tuvieron en cuenta criterios de viabilidad económica, social y ambiental.

Después de analizadas las prácticas agrícolas que se realizan al cultivo se decidió intervenir y modelar el comportamiento del carbono sugiriendo modificaciones en prácticas que cumplieran con los siguientes criterios:

1. Proponer mejoras en las prácticas que más contribuyen a generar emisiones.
2. Proponer modificaciones y mejoras al manejo del sistema de producción tendientes a aumentar las capturas de carbono.
3. Las nuevas prácticas a evaluar para efectos de modelación no deben implicar sacrificios para la finca en términos de productividad o su impacto debería ser menor.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 BALANCE DE CARBONO EN EL SISTEMA ANALIZADO

Para la finca la Unión la cantidad de emisiones es mayor al almacenamiento, razón por la cual se presenta un balance final de emisiones de 41.869,74 kg CO<sub>2</sub>eq. Como se discutirá mas adelante es útil no solo determinar el balance por área, tener el balance por producto producido y por árbol es de gran utilidad para definir estrategias de manejo (Tabla 11 Balance en las diferentes etapas de producción).

**Tabla 11 Balance en las diferentes etapas de producción.**

Emisiones y capturas	Emisiones - kg CO <sub>2</sub> eq					
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Totales por área	Por hectárea	Por tonelada de CPS
Producción del fertilizante	27.157,79			27.157,79	969,92	310,20
Inducidas por fertilización	16.948,85	342,28		118.265,14	4.223,76	1.350,83
Inducidas por pesticidas	8.323,00			8.323,00	297,25	95,07
Manejo de residuos del cultivo	-	104,43	-	30.910,89	1.103,96	353,07
Almacenamiento de carbono	(190.717,98)			(190.717,98)	(6.811,36)	(2.178,39)
Uso de energía en el campo	473,66			473,66	16,92	5,41
Procesamiento primario	4.876,38			4.876,38	174,16	55,70
Agua del beneficio			39,15	978,75	34,96	11,18
Transporte del café (fuera de la finca)				41.602,11	1.485,79	475,18
<b>Total</b>	<b>(132.938,30)</b>	<b>446,71</b>	<b>39,15</b>	<b>41.869,74</b>	<b>1.495,35</b>	<b>478,24</b>

La mayor cantidad de emisiones, el 51 %, provienen del uso de fertilizantes; seguido por las emisiones inducidas por el transporte del café 18 % y el manejo de los residuos del cultivo 13% (Tabla 12 Emisiones en diferentes

procesos y etapas de producción). Estos hallazgos coinciden con la información reportada en la tesis de Rikxoort, 2011. El 94 % de las emisiones provienen de 3 prácticas de manejo: las emisiones inducidas por fertilizantes tanto en su manufactura como en su uso, el transporte fuera de la finca y el manejo de los residuos de cultivo.

**Tabla 12 Emisiones en diferentes procesos y etapas de producción**

	Emisiones - kg CO <sub>2</sub> eq	
	Totales por área	Porcentaje
Producción del fertilizante	27.157,79	12%
Emisiones inducidas por fertilización	118.265,14	51%
Emisiones inducidas por pesticidas	8.323,00	4%
Manejo de residuos del cultivo	30.910,89	13%
Uso de energía en el campo	473,66	0%
Procesamiento primario	4.876,38	2%
Emisiones del agua del beneficio	978,75	0%
Emisiones por transporte del café (fuera de la finca)	41.602,11	18%
<b>Total</b>	<b>232.587,72</b>	

## 7.2 EMISIONES EN ETAPA DE CULTIVO

### 7.2.1 Emisiones por unidad de área

La mayor cantidad emisiones provenientes de manejo del cultivo se originan en la aplicación de fertilizantes con 969 Kg CO<sub>2</sub>eq/ha, en este caso cabe destacar que los fertilizantes nitrogenados son los que más aportan a este tipo de emisiones por el N<sub>2</sub>O producido (Tabla 12 Emisiones en diferentes procesos y etapas de producción). Los resultados encontrados en este finca son superiores a los encontrados por una evaluación realizada por Solidaridad y UTZ Certified en fincas productoras de café en Kenia usando la herramienta Cool Farm Tool, donde al evaluar diferentes sistemas de producción (alto, medio, bajo nivel de tecnificación), las emisiones de gases de efecto invernadero por hectárea variaban entre 501,3 kg CO<sub>2</sub> /ha (Manejo Medio, Wamuguma) y 3075

kg CO<sub>2</sub> /Ha (Manejo alto, Karimikui). El bajo nivel de emisiones de Wamuguma es causada por el cambio en la práctica de labranza, compensando las emisiones de los cambios en su manejo (desde labranza convencional a labranza cero) (Nikkels, 2011). En los resultado de la finca La Unión se encuentran emisiones del orden de 6594,89 kg CO<sub>2</sub> /Ha (Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento).

Estos resultados son razonables teniendo en cuenta que el sistema de producción de la finca es más intensivo en el uso de recursos como los fertilizantes.

De acuerdo con la revisión de literatura realizada, el sistema productivo de monocultivo al sol es el que genera la mayor cantidad de emisiones, sin embargo en el presente trabajo no se puede confirmar esta situación pues en la finca solo se tenía un solo sistema de producción.

**Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento**

<b>Fuente de las emisiones</b>	<b>Emisiones por hectárea</b>	<b>Emisiones por tonelada</b>	<b>%</b>
Producción del fertilizante	969,9	310,2	12%
Emisiones inducidas por fertilización	4223,8	1350,8	51%
Emisiones inducidas por pesticidas	297,3	95,1	4%
Manejo de residuos del cultivo	1104,0	353,1	13%
<b>Total por manejo del cultivo</b>	<b>6594,89</b>	<b>2109,16</b>	<b>79%</b>
Uso de energía en el campo	16,9	5,4	0%
Procesamiento primario	174,2	55,7	2%
Emisiones del agua del beneficio	35,0	11,2	0%
Emisiones por transporte del café (fuera de la finca)	1485,8	475,2	18%
<b>Total por procesamiento y manejo de energía</b>	<b>1711,82</b>	<b>547,47</b>	<b>21%</b>
<b>Total</b>	<b>8306,70</b>	<b>2656,63</b>	<b>1,00</b>

### 7.2.2 Emisiones por producto cosechado

Las emisiones por tonelada de producto cosechado son menores (2.109,2 kg CO<sub>2</sub> / tonelada de CPS), esto es razonable en la medida que los sistemas de producción al sol tecnificados son altamente productivos (Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento). Sin embargo en su tesis de grado Henk

van Rikxoort realizó mediciones en diferentes sistemas de producción encontrando bajas emisiones de carbono para policultivos tradicionales (5,4 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por kg de producto) y policultivos comerciales (4,9 kg CO<sub>2</sub>eq / kg); en comparación con mayores emisiones de monocultivos con sombra (7,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) y monocultivos a libre exposición solar (8 kg CO<sub>2</sub>-e/kg) (Rikxoort, 2011).

## **7.3 EMISIONES DE CARBONO DEL PROCESAMIENTO Y MANEJO DE ENERGÍA**

### **7.3.1 Emisiones por unidad de área**

La mayor cantidad de emisiones por procesamiento y uso de energía se presentan por el transporte de producto fuera de la finca con un valor de 1.485,89 Kg CO<sub>2</sub>eq/ha, seguido por el uso de energía en el procesamiento con un valor de 174,16 Kg CO<sub>2</sub>eq/ha (Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento). Las altas emisiones por transporte se deben a que se usan vehículos pequeños (camperos) que utilizan como combustible diésel.

### **7.3.2 Emisiones por producto cosechado (Toneladas)**

La principal fuente de emisiones en la etapa de procesamiento y manejo de energía por producto continua siendo el transporte fuera de la finca, seguido por el uso de energía en la atapa de beneficio. (Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento).

Al comparar las emisiones provenientes del manejo del cultivo contra las emisiones provenientes del procesamiento y manejo de la energía se encontró que 79 % de las emisiones provienen del manejo del cultivo, y como se planteó anteriormente, la mayor parte es del uso de fertilizante (Tabla 13 Comparación de las emisiones en manejo del cultivo y procesamiento). Esta información es de mucha utilidad a la hora de construir escenarios y definir estrategias de manejo.

## **7.4 CAMBIOS EN LAS RESERVAS DE CARBONO**

La única reserva de carbono de esta finca es el mismo cultivo de café, el cual contribuyó con 193.103 kg CO<sub>2</sub>eq en capturas (Tabla 14 Almacenamiento de carbono). Todos los sistemas de producción de café son capaces de secuestrar carbono en la biomasa, los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas sin

sombra. Si bien las plantaciones de café sin sombra secuestran carbono, los árboles de sombra incrementan la posibilidad de secuestro (Rikxoort, 2011).

En la finca evaluada no se tiene forestales, de acuerdo con la literatura consultada los sistemas agroforestales capturan más carbono. Con relación al secuestro de carbono por los diferentes sistemas productivos se ha llegado a diferentes conclusiones. En un estudio realizado en Turrialba, Costa Rica se evaluó la captura de carbono por árboles asociados con café, encontrándose que la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea de las especies maderables por hectárea fue muy variable al interior de cada especie. Esto se debió principalmente a las grandes diferencias de densidades de árboles ha-1 establecidos dentro de los cafetales. Obteniendo los siguientes resultados: 39 a 27 t C ha-1 para *C. alliodora*, 14 a 10, t C ha-1 para *E. deglupta*, y 32 a 16 t C ha-1 para *T. amazonia* (Dzib Castillo, 2003).

**Tabla 14 Almacenamiento de carbono.**

Reservas de carbono	kg CO <sub>2</sub> eq
Carbono en biomasa del cultivo (parte aérea)	-153947
Carbono en biomasa del cultivo (bajo el suelo)	-36771
<b>Total</b>	<b>-193103</b>

De acuerdo con la literatura revisada la capacidad de almacenamiento de carbono de las fincas cafeteras es directamente proporcional a la cantidad de biomasa leñosa presente. El tipo de cultivo que incorpora un mayor número de árboles y por consiguiente, de capacidad potencial de almacenar carbono, es el que se conoce como “Rústico” (42.4 TC/ha), seguido por los “Policultivos” (16.1 TC/ha). En cambio, el cultivo denominado “Monocultivo” tiene una menor capacidad potencial de almacenar carbono (4.5 TC/ha), debido a que hay un menor número de árboles presentes en esa clase de fincas (Manson R.H., et al, 2008).

## 7.5 ESCENARIO PARA MEJORAR EL BALANCE DE CARBONO DE LA FINCA

En términos de capturas y emisiones se modeló el comportamiento del carbono incorporando las siguientes prácticas agrícolas:

- En la actualidad la finca tiene fosas para descomponer la pulpa de manera parcial, después de un mes esta se dispone sobre la superficie en lotes de renovación. En la modificación se sugiere incorporar la pulpa

descompuesta en los hoyos de siembra, adicionalmente utilizar la pulpa para el llenado de las bolsas en etapa de almácigo. El incorporar la pulpa reduce la cantidad de emisiones, adicionalmente, según la literatura, se da mejor aprovechamiento de la materia orgánica por parte de las plantas de café.

- Se plantea la posibilidad de modificar de manera gradual el sistema de producción actual (libre exposición solar), incorporando árboles de Guamo (*Inga edulis*) a distancias de siembra de 12 metros por 12 metros (70 árboles de sombra/ha). De acuerdo con la literatura consultada, con esta distancia de siembra y un manejo tecnificado de la sombra la productividad del cultivo no debe verse afectada (Farfán Valencia & Baute Balcázar, 2009), (Arcila P, Farfán V, Moreno B, Salazar G, & Hincapié G, 2007), (Cenicafé, 2013).

Incorporando árboles de guamo (70 árboles/ha) después de un año de sembrados se tendría un balance positivo de carbono para la finca analizada. Esto es, se pasaría de generar emisiones a tener capturas del orden de 33.075,38 kg CO<sub>2</sub>eq para toda la finca y 1,181.26 kg CO<sub>2</sub>eq por hectárea (Tabla 15 Balance de carbono incorporando árboles).

**Tabla 15 Balance de carbono incorporando árboles.**

Fuente de emisiones	Emisiones - kg			Emisiones - kg CO <sub>2</sub> eq		
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Por área	Por hectárea	Por tonelada de CPS
Producción del fertilizante	27.157,79			27.157,79	969,92	310,20
Emisiones inducidas por fertilización	16.948,85	342,28		118.265,14	4.223,76	1.350,83
Emisiones inducidas por pesticidas	8.323,00			8.323,00	297,25	95,07
Manejo de residuos del cultivo	-	104,43	-	30.910,89	1.103,96	353,07
Cambios en el almacenamiento de carbono	(265.663,10)			(265.663,10)	(9.487,97)	(3.034,42)
Uso de energía en el campo	473,66			473,66	16,92	5,41
Procesamiento primario	4.876,38			4.876,38	174,16	55,70
Emisiones del agua del beneficio			39,15	978,75	34,96	11,18
Emisiones por transporte del café (fuera de la finca)				41.602,11	1.485,79	475,18
<b>Total</b>	<b>(207.883,42)</b>	<b>446,71</b>	<b>39,15</b>	<b>(33.075,38)</b>	<b>(1.181,26)</b>	<b>(377,79)</b>

El escenario de incorporación de la pulpa de café en el momento de siembra no reporto mayores cambios, razón por la cual en términos de carbono la práctica no representa mayores beneficios, a pesar de que en términos de manejo del cultivo es lo más conveniente desde su aprovechamiento.

El trabajo de investigación no planteo modelar otros escenarios, al analizar posibilidades con el asistente técnico de la finca y propietarios sobre otras posibles prácticas de impacto significativo en el mejoramiento del carbono, estos consideraron difícil intervenir aspectos como:

- Mejoramiento del proceso de transporte fuera de la finca.
- Implementación de otras prácticas de fertilización e incorporación de fertilizantes con baja huella de carbono.

## 8. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el 93,7 % de las emisiones provienen del manejo de fertilizantes, el manejo de los residuos del cultivo y el transporte fuera de la finca, es en estas prácticas que deben concentrarse los esfuerzos iniciales para obtener disminuciones importantes en las emisiones de carbono.

Al construir diferentes escenarios usando la herramienta Cool Farm Tool® (con sus parámetros de medición) se encontró que para el manejo de los residuos, las posibilidades de disminuir emisiones son mínimas, razón por la cual no es muy efectivo trabajar sobre esta práctica. Por un lado en las renovaciones por zoca, cada año, un porcentaje importante de la biomasa queda sobre el suelo y se descompone, volviendo nuevamente a liberarse el carbono a la atmósfera. La incorporación de este material al suelo resulta poco práctica.

Una opción para disminuir las emisiones de los fertilizantes nitrogenados consiste en incorporar el fertilizante al momento de la aplicación y no realizar la aplicación al voleo, como actualmente se realiza en la finca. Al modificar esta práctica, se cambia de tener unas emisiones por concepto de los fertilizantes aplicados de 118.265 kg CO<sub>2</sub>eq a 114.158 kg CO<sub>2</sub>eq. Sin embargo para poder implementar esta práctica se deben hacer los análisis económicos y técnicos que justifiquen su implementación.

La otra posibilidad de disminuir las emisiones por concepto de fertilizantes aplicados consiste en usar fertilizantes nitrogenados que por sus características reducen la volatilización del nitrógeno. Al incorporar este tipo de fertilizantes, se cambia de tener unas emisiones por concepto de los fertilizantes aplicados de 118.265 kg CO<sub>2</sub>eq a 92.518 kg CO<sub>2</sub>eq. Sin embargo, al igual que la práctica de incorporación del fertilizante se deben hacer los análisis económicos y técnicos que justifiquen su implementación. Es de anotar que estos fertilizantes son más costosos, sin embargo, según las compañías que los producen se mejoran las eficiencias de uso. Otra posibilidad consiste en usar fertilizantes nitrogenados que incorporan baja huella de carbono en su proceso de manufactura, como los desarrollados por la compañía Yara. Al usar este tipo de fertilizantes se pueden reducir las emisiones de 27.157,8 kg CO<sub>2</sub>eq a 22.304,3 kg CO<sub>2</sub>eq.

Implementando las prácticas de incorporar el fertilizante usado, usar fertilizantes especiales que reducen la volatilización del nitrógeno y usar fertilizantes nitrogenados con baja huella de carbono, es posible disminuir las emisiones de 145.422,9 kg CO<sub>2</sub>eq a 110,936 kg CO<sub>2</sub>eq, lo cual representa una disminución del 14,8 % en las emisiones de carbono del sistema de producción. Como se plantea anteriormente, la implementación de estas recomendaciones debe ir acompañada de análisis técnicos y económicos que las justifiquen.

Es necesario poder medir la biomasa cuando se considera la cuestión de los sumideros de carbono, puesto que las mediciones de la biomasa proveen una estimación de la cantidad de carbono contenida en la vegetación. Por lo tanto, la biomasa representa una medida indirecta de la cantidad de carbono que es almacenada por la vegetación leñosa. La estimación de la biomasa también permite establecer la cantidad de bióxido de carbono que puede ser removida de la atmósfera por la reforestación. El presente trabajo se apoyó en literatura existente y se realizaron unas mediciones de biomasa de árboles de café a manera de muestreos. Las modelaciones con árboles de Guamo se hicieron con base a diámetros obtenidos de revisión de literatura.

La pregunta principal que se debe responder cuando se analiza el tema del pago por servicios ambientales es ¿cuánto se debe pagar para que los propietarios de las fincas tengan un incentivo suficiente para mantener la cobertura vegetal de sus fincas como reservorio de carbono, de forma tal que compense la pérdida de productividad del cultivo en el corto plazo?. Para responder a esta pregunta, debe hacerse un análisis detallado de las implicaciones que en términos de costos de producción y sacrificio de productividad puede tener para la finca este cambio de manejo.

Los servicios ambientales que proveen los SAF están ganando cada vez más atención, sin embargo, debido a que estos beneficios se obtienen a mediano y largo plazo, muchas veces no son tangibles por los productores y las posibilidades de volverlos reales implican una exploración técnica y profesional que en muchos casos no están al acceso del productor. Adicionalmente la introducción/promoción de árboles puede aumentar la competencia con el café y reducir la productividad. Si se quiere tener unas opciones más claras en términos de gestión eficiente de carbono en café, se requiere de mecanismos de compensación y estrategias que estimulen a los productores a incluir árboles dentro de sus cultivos de café.

Se necesita más investigación sobre los efectos compensatorios y/o incompatibilidades ("trade-offs") entre los diferentes servicios ambientales que proveen los SAF y sobre los mecanismos de valoración y transferencia financiera requeridos para beneficiar directamente a los productores que proveen estos servicios.

La herramienta Cool Farm Tool es útil y fácil de manejar para cuantificar el balance de carbono en sistemas productivos de café. Aplicando esta herramienta en un mayor número de fincas y en una muestra representativa de cada sistema productivo es posible establecer conclusiones y definir recomendaciones de manejo para disminuir las emisiones.

A pesar de que el cultivo de café no es un cultivo que genere muchas emisiones, si se abre una posibilidad importante de trabajar un manejo del cultivo que beneficie las capturas y el almacenamiento. Cada vez será más importante hablar de carbono en agricultura y las posibilidades de mercadear servicios ambientales por este concepto en un futuro pueden ser atractivas.

## 9. RECOMENDACIONES

En términos de gestión de carbono, la finca la unión podría iniciar un piloto estableciendo árboles en uno de los lotes de renovación. De esta forma se pueden empezar a evaluar en campo los beneficios y limitantes de incorporar árboles en el manejo del café. Los proyectos que incorporan árboles son de largo plazo y los resultados muchas veces no son observables en los primeros años de implementados.

Se recomienda evaluar la dosis de fertilizante y el tipo de fertilizantes que se usan de acuerdo a la productividad que se tiene. Para definir el plan de fertilización es útil tener en cuenta el análisis de suelos. Estos análisis deben de ir acompañados de análisis económicos que justifiquen los cambios y no afecten el desempeño financiero de la finca.

La captura de carbono en café y sistemas de producción asociados es nueva y poco estudiada en la caficultura Colombiana, o al menos existen muy pocos reportes de investigación. Por esta razón es necesario emprender más trabajos relacionados con metodologías de medición, impacto de diferentes sistemas en la huella de carbono, prácticas que permiten disminuir la huella de carbono, evaluación económica de las posibles medidas a implementar.

La metodología de cálculo de huella de carbono sirve para determinar las emisiones de GEI, pero esto resulta útil, sólo si se tiene un parámetro de comparación, es decir, el sistema de producción o finca analizada debe ir actualizando los cálculos de manera de poder comparar las emisiones de los distintos años y observar si ha habido reducciones o aumentos de GEI atribuibles a las practicas implementadas, de esta forma se reconocen las emisiones que pueden ser reducidas o compensadas, dependiendo de lo que decida la finca como estrategia de sostenibilidad ambiental.

Los estudios asociados al cálculo de huella son cada día más importantes y necesarios para el cálculo y reducción de la huella ecológica que ha ido en aumento durante los últimos años. Cada vez el mercado demandara más productos que sean amigables con el ambiente. Por este motivo, resulta importante que las fincas cafeteras se adapten y respondan a están tendencias del mercado y nuevas realidades ambientales. Es

necesario continuar realizando investigaciones de este tipo que fundamenten técnica y económicamente lo que el caficultor debe de hacer en el campo.

Es interesante generar adaptaciones y cambios que mejoren las metodologías al aplicarlas dentro del país, pero es importante también que esas modificaciones sean aceptadas a nivel global y que no se generen tantas diferencias entre los cálculos de un país con otro.

Para futuras investigaciones sobre los temas planteados en este estudio se recomienda tener en consideración los siguientes elementos: hacer un análisis más detallado de los que ocurre con las emisiones provenientes de la pulpa y las aguas de beneficio. Esta fuente es de mucha importancia si se tiene en cuenta que el metano es el principal GEI que se genera en el proceso. Muestrear diferentes sistemas de producción, particularmente muestrear un rango más amplio de densidades y edades de árboles, al igual que sistemas de manejo, para tener mejor precisión sobre el almacenamiento de carbono en relación con la densidad y edad de los árboles tanto de café como de los árboles incorporados.

Es muy recomendable hacer un seguimiento en el tiempo de parcelas con sistemas agroforestales de café con árboles en las diferentes regiones para documentar más profundamente el efecto del manejo sobre el crecimiento de los árboles.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Alain, A., & Kadji, S. (2003, Octubre). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 226.
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 15-27.
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 15-27.
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (Octubre de 2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 226.
- Albrecht, A., & Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 15-27.
- Altieri, M. (1999). *AGROECOLOGIA Bases científicas para una agricultura sustentable*. Montevideo: Editorial Nordan–Comunidad.
- Amézquita, M. C., Murgueitio, E., Cuartas, C. A., & Gómez, M. H. (2004). *Almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres para mitigar el cambio climático*. Valle del Cauca.
- Arcila P, J., Farfan V, F., Moreno B, A., Salazar G, L. F., & Hincapie G, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. (H. Ospina O, & S. M. Marin L, Edits.) Chinchina, Colombia: Cenicafé.
- Arcila P, J., Farfán V., F., Moreno B., A., Salazar G., L. F., & Hincapié G., E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. (H. F. Ospina O., & S. M. Marín L., Edits.) Chinchina, Caldas, Colombia.
- Avila Vargas, G. (2000). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol*. Tesis de maestría, CATIE, Turrialba.
- Avila Vargas, G. (2000). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol*. Turrialba, Costa Rica.

- Avila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforesteria de las Americas*, 8(30), 32-35.
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforesteria de las Americas*, 10(37).
- Beer, J., Muschler, R., & Kass, D. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38(1-3), 139-164.
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests*. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Burbano Orjuela, H. (1989). *El suelo: una visión sobre sus componentes biorgánicos*. Pasto: Universidad de Nariño.
- Cenicafe. (2011). *Informe anual Cenicafe 2011*. Informe de labores.
- Cenicafé. (2013). *Manual del cafetero Colombiano (Vol. II)*. Chinchina, Colombia.
- CEPAL. (2010). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación*. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- CEPAL. (2011). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Cool Farm Institute. (2012). *Acerca de: CFT, Cool Farm Tool*. Recuperado el 20 de Abril de 2013, de <http://www.coolfarmtool.org/Home>
- Cool Farm Institute. (2012). *The Cool Farm Tool, a User's Guide, For Use with the CFT Version 2.0*. Reino Unido.
- Cool Farm Institute. (2012). *The Cool Farm Tool, a User's Guide, For Use with the CFT Version 2.0*. United States.
- Corral Castillo, R. (2006). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arabigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del Litoral Ecuatoriano*. Tesis Maestría, Universidad Nacional de Loja.
- Country Land and Business Association. (9 de Enero de 2014). *CLA*. Recuperado el 9 de Enero de 2014, de <http://www.calm.cla.org.uk/index.php?section=home>
- DaMatta, F., & Rodríguez, N. (2007). Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotropico. *Agronomía Colombiana*, 25(1), 113-123.

- Dzib Castillo, B. B. (2003). *Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica*. Tesis Posgrado Magister scientiae, CATIE, TURRIALBA.
- Espinoza Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez Alarcón, A., & Torres Rivera, A. (2012). ALMACÉN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57-70.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. FAO.
- FAO. (2010). *Agricultura "climáticamente inteligente"*. Roma, Italia.
- FAO. (2011). *Soil carbon sequestration, SOLAW Background Thematic Report - TR04B*.
- FAO. (2012). *Review of GHG calculators in agriculture and forestry sectors A Guideline for Appropriate Choice and Use of Landscape Based Tools*. Roma.
- FAO. (15 de Junio de 2013). *Carbon-balance tool (EX-ACT)*. Recuperado el 2013 de Junio de 2013, de <http://www.fao.org/tc/exact/carbon-balance-tool-ex-act/en/>
- FAO. (2013). *Página web de la FAO*. Recuperado el 1 de Junio de 2013, de [http://www.fao.org/fileadmin/templates/tci/pdf/backgroundnotes/webposting\\_SP.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/tci/pdf/backgroundnotes/webposting_SP.pdf)
- Farfan Valencia, F., & Baute Balcazar, J. E. (2009). Efecto del arreglo espacial del café y del sombrero sobre la producción del café. *Cenicafé*, 60(4), 305-315.
- Federación Nacional de cafeteros de Colombia. (2011). *Sostenibilidad en Acción 1927 - 2010*. Bogota.
- Gerald C, N., & al, e. (2009). *Cambio climático, El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Política Alimentaria, Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias IFPRI, Washington, D.C.
- GTZ. (2010). *El cambio climático influye en la agricultura, La agricultura influye en el cambio climático*. GTZ.
- GTZ, Ministerio federal de cooperación Económica y desarrollo y Café direct. (2010). *Cambio Climático y Café: Capacitación para productores y organizaciones cafetaleras*. Eschborn, Alemania.
- GTZ, Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, y Café Direct. (2010). *Cambio Climático y Café: Capacitación para Productores y Organizaciones Cafetaleras*. Eschborn, Alemania.
- Hernández Vásquez, E., Campos Ángeles, G. V., Enríquez del Valle, J. R., Rodríguez Ortiz, G., & Velasco Velasco, V. A. (19 de Enero de 2012). Captura de carbono por inga jinicuil schltldl. En un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11.

- Houghton, J. (1997). *Global warming: the Complete Briefing*. Cambridge: Cambridge University press.
- International Trade Centre. (2010). *Climate Change and the Coffee Industry*. Geneva, Switzerland.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventario Nacionales de los gases de efecto invernadero* (Vol. Cuatro). (S. Egleson, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tabane, Edits.) Japón.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Primera ed.). (O. D. B. Metz, Ed.) Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Primera ed.). (S. D. Solomon, Ed.) United Kingdom and New York, United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- IPCC, FAO. (2009). *Datasets for use in the IPCC Guidelines, FAO data and how it can be used in the IPCC Agriculture and Land Use Guidelines*. Italia, Roma.
- IPCC, FAO,. (2009). *Datasets for use in the IPCC Guidelines, FAO data and how it can be used in the IPCC Agriculture and Land Use Guidelines*. Italia, Roma.
- Isaza Ramirez, C. H. (2011).
- ISEAL Alliance. (12 de Noviembre de 2013). *ISEAL Alliance*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2013, de <http://www.isealalliance.org/online-community/news/utz-project-to-address-climate-change-in-the-vietnamese-coffee-sector>
- 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, PERU. *Ecología Aplicada*(3).
- Lovelock, J. (2008). *La Venganza de la Tierra*. Colombia: Planeta Colombia S.A.
- Manson R.H., et Al. (2008). *Agroecosistemas cafetaleros de veracruz biodiversidad, manejo y conservación*. Mexico: Instituto de Ecología A.C. e Instituto Nacional de Ecología.
- Martinez, J., & Fernandez, A. (2004). *Cambio climatico: una vision desde Mexico*. Coyoacan, Mexico: Instituto Nacional de Ecología.
- Medina Benavides, C., Calero González, C., Hurtado, H., & Vivas Soto, E. (Junio de 2009). Cuantificación de carbono en la biomasa aerea de café (coffea arábica l.) con sombra, en la comarca palo de sombrero, Jinotega, Nicaragua. *La calera*, 9(12), 28-34.

- Mena, V. E., Andrade, H. J., & Navarro, C. M. (Septiembre de 2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforestería Neotropical*(1).
- Ministerio de Ambiente, et al. (2010). *Deforestación Evitada. Una Guía REDD + Colombia*. Bogota.
- Nestlé Nespresso SA. (9 de Enero de 2014). *Nespresso*. Recuperado el 9 de 1 de 2014, de <http://www.nestle-nespresso.com/ecolaboration/case-studies/life-cycle-assessment-at-nespresso>
- Nikkels, R. (2011). *Fieldtesting coffee and cocoa carbon footprinting on UTZ Certified farms based on the Cool Farm Tool V1 0278*. Amsterdam,, The Netherlands.
- Polzot, C. L. (2004). *Carbon Storage in Coffee Agroecosystems of Southern Costa Rica: Potential Applications for the Clean Development Mechanism*. Informe de tesis, York University, Toronto.
- Rainforest Alliance. (2009). *Guidance on coffee carbon project development using the simplified agroforestry methodology*.
- Red de Agricultura Sostenible (RAS). (2011). *Módulo Clima de la RAS Criterios para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*. San José.
- Rikxoort, H. v. (2011). *The Potential of Mesoamerican Coffee Production*. Alblasserdam, The Netherlands.
- Rivera Posada, H., & Aristizabal Gómez, A. (1992). *El sombrío en los cafetales protege los suelos de la erosión*. Avances Técnicos, CENICAFE.
- Salgado Vásquez, J. L. (2010). *Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua*. Tesis Maestría, CATIE, Turrialba.
- Salgado Vásquez, J. L. (2010). *Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica.
- Samayoa, S. (2011). *Mercado de carbono, para proyectos de pequeña escala oportunidades* (Segunda ed.). (F. S. Fider, Ed.)
- Sangana Commodities Ltd y GIZ. (2011). *Carbon and Coffee, Kenia*. Reporte de resultados.
- Sangana PPP. (2011). *Climate Change Adaptation and Mitigation in the Kenyan Coffee Sector*. 4 C.
- Scherr, S. J., & Sthapit, S. (2009). *Worldwatch Report 179, Mitigating Climate Change*. Washington, D.C.: Worldwatch Institute.

- Seeberg Elverfeldt, C. (2010). *Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor*. (FAO, Ed.) Roma, Italia: FAO.
- Suarés Pascua, D. A. (2002). *Cuantificación y Valoración Económica del Servicio Ambiental Almacenamiento de Carbono en Sistemas Agroforestales de Café en la Comarca Yassica Sur, Metagalpa, Nicaragua*. Tesis Maestría, CATIE, Turrialba.
- Tchibo. (2008). *Case study tchibo privat kaffee rarity machare by tchibo gmbh*.
- UNEP. (2009). *The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation*. Cambridge.
- Unilever. (2010). *Sustainable agriculture: Growing for the future*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2011, de <http://www.growingforthefuture.com/>
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernandez, J. (Mayo de 2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), 322-329.

## 11. ABREVIATURAS USADAS

AVC: Análisis del ciclo de vida

CFT: Cool Farm Tool ®

GEI: Gases Efecto Invernadero

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

MOM: Materia Orgánica Muerta

MOM: Materia Orgánica del Suelo

ODM: Objetivos de Desarrollo del Milenio

PNE: Productividad Neta del Ecosistema

PPB: Productividad Primaria Bruta

PPN: Productividad Primaria Neta

RAS: Red de Agricultura Sostenible

SAF: Sistema Agro Forestal

Sector AFOLU: Agriculture Forest and other Land Use

TM: Toneladas Métricas

## 12. ANEXOS

### Anexo 1 Herramienta Cool Farm Tool®

En el siguiente Link es posible descargar la herramienta:

<http://www.coolfarmtool.org/CftExcel>

### Anexo 2 Guía de apoyo para diligenciar la ficha para levantamiento de datos de campo (Cool Farm Tool)

#### INTRODUCCION

En el presente documento encontrara algunas instrucciones y recomendaciones que le permitirán diligenciar la ficha para levantamiento de datos de campo (**Cool Farm Tool**) adecuadamente, orientar al productor en el proceso de respuesta y finalmente realizar un buen trabajo.

El objetivo es que la información recolectada represente en gran medida la realidad que se quiere evaluar; para esto es fundamental que la persona encargada del trabajo de campo (diligenciamiento del cuestionario) lea detenidamente esta guía anexa antes de proceder a diligenciar la ficha para levantamiento de datos de campo.

#### SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

Recomendaciones generales para ser tenidas en cuenta al momento de recoger la información:

- El trabajo deberá ser desarrollado por una persona capacitada en los temas relacionados en la ficha.
- El trabajo de campo deberá limitarse a recolectar la información solicitada en la ficha; no se deberán modificar o realizar preguntas diferentes a las indicadas en el instrumento.
- Agradezca al productor por el tiempo que va a dedicar para responder las preguntas, al igual que su disposición para compartir la información.
- Resalte que la información que se entrega es confidencial y para uso exclusivo del trabajo de investigación y que en ningún caso será utilizada para fines diferentes a los planteados en el proyecto.

- Toda la información que se recoja corresponderá a un periodo de 12 meses de evaluación (no necesariamente tiene que coincidir con el año calendario). Antes de iniciar el proceso es importante identificar claramente el periodo a evaluar (12 meses). Tenga en cuenta permanentemente este periodo cuando este recolectando la información y realizando las preguntas al productor para evitar errores o recolección de información de periodos diferentes.
- Lea toda la ficha y manual de apoyo detallada y anticipadamente de forma tal que se familiarice con el tipo de pregunta, las unidades en que se pide la información, las formas alternativas que podría utilizar para encontrar la información en finca.
- Cerciórese de tener todo el material disponible para realizar la visita a campo (cuestionarios suficientes, lápices, calculadora, metro, entre otros).
- Tenga mucho cuidado a la hora de llenar la ficha para garantizar que los valores consignados corresponden a las unidades en que se pide la información.
- La persona que orienta el diligenciamiento de la ficha debe tener claro el objetivo general de la encuesta. El entrevistado podría solicitar información al respecto.
- Las preguntas han sido diseñadas para evitar la posibilidad de sugerir respuestas al productor, por lo tanto, resulta sumamente importante que el encuestador se mantenga neutral respecto al contenido del cuestionario. Sugerimos al entrevistador leer la pregunta al productor tal como aparece escrita en el cuestionario.
- Toda entrevista depende fundamentalmente del nivel de comunicación y la buena relación que se establezca con el productor. Promueva un ambiente de confianza y entendimiento que favorezca en el productor responder de manera correcta y precisa a las preguntas formuladas.
- El registro de las respuestas a las preguntas formuladas, debe realizarse en el momento mismo de la entrevista; no trate de confiar en su memoria ni registre la información al terminar la entrevista.
- Finalizado el diligenciamiento de la ficha revise todas las preguntas de nuevo para verificar que todas se han respondido, revise donde puedan haber inconsistencias y verifique o pregunte de nuevo para tener seguridad en la veracidad en la respuesta.

## DILIGENCIAMIENTO DE LA FICHA

En esta sección usted podrá encontrar información útil y sugerencias que le permitan diligenciar adecuadamente cada una de las preguntas. También encontrará ejemplos, recomendaciones o sugerencias para recoger la información según sea el caso.

### Información general

En el ítem relacionado con la producción de la finca (Producto fresco de área de producción) se pueden presentar los siguientes casos:

- Que el productor tenga en sus registros el dato de producción en kg de café cereza.
- Que se tengan los registros de venta y en este caso el registro podría estar en kg de café pergamino seco (c.p.s) o arrobas de café pergamino seco (@/c.p.s).

Para estas situaciones y las demás que se puedan presentar le recomendamos recoger la información en las unidades y forma como la tenga el productor; posteriormente usted deberá realizar la transformación a las unidades en que se pide la información en el cuestionario.

A continuación se presentan algunos factores de conversión que le podrán ser útiles:

Para convertir de	A	multiplique por
	almendra	0,16
	pulpa fresca	0,43
	pulpa mojada	0,48
<b>Pergamino seco</b>	Cereza	4,94
	almendra	0,8
	pulpa fresca	2,15
	pulpa mojada	2,13

Fuente: Avance técnico de CENICAFE N° 370: PROPIEDADES FÍSICAS Y FACTORES DE CONVERSIÓN DEL CAFÉ

### EN EL PROCESO DE BENEFICIO.

Si para las condiciones de su región o la finca tiene factores definidos, es mejor utilizar dicha información para hacer los cálculos.

### Ejemplo 1

En una finca determinada el productor lleva registros semanales de recolección de café cereza, consolidada la información encontramos que en el año (periodo) evaluado se recolectaron 324.000 kg de café en cereza.

Apoyados en la tabla de factores de conversión definimos que para pasar de kg de café cereza a kg de café pergamino seco (Oro) multiplicamos el valor de kg de café cereza por 0,2:

$$324,000 \text{ kg (café cereza)} * 0.2 = 64,800 \text{ kg (café pergamino seco)}.$$

### Ejemplo 2

Nos encontramos otra finca donde el productor tiene los recibos de venta de café para el año evaluado.

Totalizando los recibos del año el productor vendió 20000 kg de café pergamino seco.

Apoyados en la tabla de factores de conversión definimos que para pasar de kg de café pergamino seco a kg de café cereza multiplicamos el valor por 4,94:

$$20,000 \text{ kg (café pergamino seco)} * 4,94 = 98,800 \text{ kg café cereza o producto fresco}.$$

## Cultivo

### Fertilización (Fuente)

Teniendo en cuenta que en la zona cafetera Colombiana se utilizan diferentes fuentes de fertilizantes, especialmente mezclas físicas y químicas, se recomienda recoger la información de acuerdo con el tipo de fertilizante que se usa en la finca y posteriormente con la ayuda de una tabla en Excel (Herramienta anexa) hacer las conversiones de cantidades de nutrientes por hectárea que se están aplicando.

### FORMULA

Nombre Comercial	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Fertilizante (Kg/Ha)
PRODUCCION	17	6	18	2	
SUPERCAFE	25	4	24		
HYDRAN	19	4	19		
KAFE CALDAS	24	3	19	3	

TRIPLE 15	15	15	15		
NITRASAM	28	4	0		
KOR KALLI	0	0	40	3	
UREA	46	0	0		
KCL	0	0	60		
DAP	18	46	0		
TOTAL					

### Ejemplo

Nos encontramos una finca donde el caficultor ha aplicado 430 kg/ha de Kafe Caldas y 20 Kg/ha de Dap.

Apoyados con la tabla de Excel para conversión de fertilizantes incorporamos el nombre comercial del producto, o si está en la lista simplemente incorporamos el valor aplicado en la finca:

FORMULA	Nutriente aplicado (Kg/ha)									
	Nombre Comercial	N (Kg/Ha)	P	K	Mg	Fertilizante	N	P205	K2O	MgO
PRODUCCION		17	6	18	2		0	0	0	0
SUPERCAFE		25	4	24			0	0	0	0
HYDRAN		19	4	19			0	0	0	0
KAFE CALDAS		24	3	19	3	430	103,2	12,9	81,7	12,9
TRIPLE 15		15	15	15			0	0	0	0
NITRASAM		28	4	0			0	0	0	0
KOR KALLI		0	0	40	3		0	0	0	0
UREA		46	0	0			0	0	0	0
KCL		0	0	60			0	0	0	0
DAP		18	46	0		20	3,6	9,2	0	0
TOTAL							106,8	22,1	81,7	12,9

**Finalmente las aplicaciones de nutrientes obtenidas son:**

**Nitrógeno: 106,8 Kg/ha**

**Fósforo: 22,1 Kg/ha**

**Potasio: 81,7 Kg/ha**

**Magnesio: 12,9 Kg/ha**

## Calculo de volumen de aguas residuales del beneficio

Si la finca no tiene cuantificado el volumen de aguas residuales que se generan es posible hacer una cuantificación aproximada usando valores dependiendo del proceso de beneficio que se aplica. Para facilitar la cuantificación se entrega la siguiente tabla:

<b>Etapas del proceso de beneficio</b>	<b>Consumos de agua (lt/kg C.P.S)</b>
En despulpado	5
En lavado y transporte de grano	15
En transporte de la pulpa	20
Tanque de lavado o tanque tina (4 lavadas)	4.1
Canal correteo	20
Transporte de pulpa con tornillo sinfin	1
Becolsub (Beneficio Ecologico)	0,6

**Fuente: Avances Técnicos CENICEFE 58, 187, 408.**

### Ejemplo

Al visitar una finca nos encontramos que en el proceso de beneficio utiliza agua en las siguientes etapas:

Despulpado

Tiene tanque tina para el lavado de café

Utiliza agua para el transporte de la pulpa.

Adicionalmente la finca produce 120 arrobas de café pergamino seco. Apoyados en la tabla anexa obtenemos los siguientes consumos de agua:

Etapa de beneficio beneficio	Volumen de agua (lt/ kg C.P.S)
En despulpado	5
En transporte de la pulpa	20
Tanque de lavado o tanque tina (4 lavadas)	4,1

Para este caso la finca estaría generando 29,1 litros de aguas por kilogramo de Café pergamino seco (CPS) producido. Al multiplicar la producción de la finca en arrobas por los litros de agua consumidos por arroba de café pergamino seco obtenemos el volumen total de agua residual generada por la finca en la etapa de beneficio: 3492 lt.