

Documentos CEDE

ISSN 1657-7191 edición electrónica

Análisis económico de la “bio-carbonización” como
práctica de manejo agrícola

Juan Andrés Ramírez
Ramón Rosales Álvarez

21

OCTUBRE DE 2009

Serie Documentos Cede, 2009-21
ISSN 1657-7191

Octubre de 2009

© 2009, Universidad de los Andes–Facultad de Economía–Cede
Carrera 1 No. 18 A – 12, Bloque C.
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 3394949- 3394999, extensiones 2400, 2049, 2474
infocede@uniandes.edu.co
http://economia.uniandes.edu.co

Ediciones Uniandes
Carrera 1 No. 19 – 27, edificio Aulas 6, A. A. 4976
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 3394949- 3394999, extensión 2133, Fax: extensión 2158
infeduni@uniandes.edu.co

Edición, diseño de cubierta, pre prensa y prensa digital:
Proceditor Ltda.
Calle 1C No. 27 A – 01
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 2204275, 220 4276, Fax: extensión 102
proceditor@etb.net.co

Impreso en Colombia – Printed in Colombia

El contenido de la presente publicación se encuentra protegido por las normas internacionales y nacionales vigentes sobre propiedad intelectual, por tanto su utilización, reproducción, comunicación pública, transformación, distribución, alquiler, préstamo público e importación, total o parcial, en todo o en parte, en formato impreso, digital o en cualquier formato conocido o por conocer, se encuentran prohibidos, y sólo serán lícitos en la medida en que se cuente con la autorización previa y expresa por escrito del autor o titular. Las limitaciones y excepciones al Derecho de Autor, sólo serán aplicables en la medida en que se den dentro de los denominados Usos Honrados (Fair use), estén previa y expresamente establecidas; no causen un grave e injustificado perjuicio a los intereses legítimos del autor o titular, y no atenten contra la normal explotación de la obra.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA “BIO-CARBONIZACIÓN” COMO PRÁCTICA DE MANEJO AGRÍCOLA

JUAN ANDRES RAMIREZ O*.
RAMON ROSALES ÁLVAREZ[♦].

Resumen

Las altas concentraciones de gases de efecto invernadero, específicamente CO₂, han sido señaladas como la principal causa del cambio climático. La adopción de prácticas agrícolas capaces de incrementar el contenido de carbono en el suelo, ha sido propuesta como una estrategia de bajo costo y disponibilidad inmediata para enfrentar este fenómeno. La Bio-carbonización es una de estas prácticas agrícolas, la cual implica la aplicación de carbón vegetal al suelo, de modo que el carbono queda capturado en una forma altamente recalcitrante al tiempo que se mejora la calidad del suelo. Este artículo es el primero en evaluar la viabilidad financiera y considerar algunos de los efectos económicos de la práctica, estimados para una finca tipo en la altillanura colombiana. Los resultados permiten determinar la viabilidad financiera de la Bio-carbonización, el valor presente neto del incremento en los beneficios es US\$ 534,139, lo cual representa un incremento del 39.2% con relación a la línea base. Igualmente, los beneficios económicos asociados con la Bio-carbonización, hacen de esta una práctica adecuada para la captura de carbono.

Palabras clave: agricultura sostenible, altillanura colombiana, análisis costo-beneficio, programación lineal, secuestro de carbono, servicios ambientales.

Clasificación JEL: C6, D60, O30, Q10, Q24, Q50.

* Químico. M.Sc. en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

[♦] Economista Agrícola, Ph.D. Profesor Asociado. Facultad de Economía. Universidad de los Andes.

ECONOMICAL ANALYSIS OF BIO-CARBONIZATION AS A PRACTICE IN AGRICULTURAL MANAGEMENT

Abstract

The high concentration of gases due to global heating, specifically CO₂, have been signaled as the main cause of climatic change. The adoption of agricultural practices that are able to increase the content of carbon on the soil has been proposed as a low-cost strategy and immediately available to reduce this phenomenon. Bio-carbonization is one of the agricultural practices that implies application of carbon to the soil. This is the first article that evaluates the financial viability of this practice and considers some of its economic effects, estimated for a farm in the high plains of Colombia. The net present value of the increase in benefits is of US\$ 534,139, which represents an increase of 39.2% in relation to the base line, indicating the financial viability of biocarbonization. In the same sense, the economic benefits associated to the Bio-carbonization make this an adequate practice for the capture of carbon.

Key words: sustainable agriculture, Colombian high plains, analysis cost-benefit, carbon, linear programming, environmental services.

JEL Classification: C6, D60, O30, Q10, Q24, Q50.

1. Introducción

El aumento en la temperatura global, que se estimó en 0.6°C durante el siglo XX, y se pronostica crecerá entre 1.4 y 5.8°C más durante el siglo XXI, se correlaciona con el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) registradas a partir de la revolución industrial (IPCC, 2001). La captura de CO₂ atmosférico como materia orgánica en suelo (MOS)¹, ha sido identificada como una alternativa de bajo costo y de aplicación inmediata en las primeras décadas del siglo XXI (Antle & McCarl, 2002; Lal, 2003). Adicionalmente, el incremento de materia orgánica en el suelo disminuye su degradación como consecuencia de actividades agrícolas, aumentando de esta forma la sostenibilidad del mismo, reconocida como un componente crítico en la reducción de la pobreza y degradación ambiental (Antle & Diagana, 2003).

El cambio en el uso de la tierra de cultivos de ciclo corto a pasturas permanentes o sistemas forestales y la adopción de algunas prácticas agrícolas particulares, son las dos estrategias identificadas para la captura de carbono como MOS (Lal, 2003; Post et al., 2004). Post et al. (2004) propusieron una metodología para evaluar las prácticas para la captura de CO₂ en ecosistemas terrestres, que incluye los siguientes componentes: *i*) identificación de la prácticas; *ii*) comprensión de sus mecanismos de captura; *iii*) evaluación de otros efectos ambientales; *iv*) determinación de todos los flujos de carbono; *v*) ejecución de un análisis de sensibilidad bajo las condiciones de aplicación y *vi*) realización de un análisis económico que considere los costos de la práctica, su competitividad, las implicaciones de mercado y otros factores, como la tasa de descuento y el rol del gobierno. La aplicación del último paso de esta metodología para la práctica agrícola conocida como “*Bio-Carbonización*”, con el fin de establecer su viabilidad financiera y las implicaciones económicas en la captura de carbono como MOS, al tiempo que aumenta la productividad del suelo, es el objetivo principal de esta investigación.

La práctica de *Bio-Carbonización*² consiste en la incorporación al suelo de material orgánico carbonizado o parcialmente carbonizado (carbón vegetal-CV). Esta práctica trata de reproducir suelos desarrollados por precolombinos en el Amazonas brasileño y conocidos como Terra Preta (do indio). Estos suelos se caracterizan por su sostenibilidad y fertilidad, muy superiores a las encontradas en otros suelos amazónicos, así como por un alto contenido de MOS³, elevada capacidad de

¹ De acuerdo con Brady (2002) es la fracción orgánica del suelo que incluye residuos de plantas y animales en varios estados de descomposición, células y tejidos de organismos del suelo y sustancias sintetizadas por las poblaciones del suelo. En este documento se usará indistintamente materia orgánica en suelo y carbono en suelo.

² Nombre sugerido por Lehmann & Rondón (2005). Esta práctica ha sido propuesta a la Junta del Protocolo de Kyoto como metodología para MDL; sin embargo todavía no ha sido aprobada.

³ La MOS en los suelos Terra Preta está compuesta principalmente por carbón vegetal, cuya concentración es hasta 70 veces mayor (4 veces en promedio) que en los suelos adyacentes que fueron usados como control (Glaser, Haumaier, Guggenberger & Zech, 2001).

retención de nutrientes, alto valor de pH y gran capacidad de retención de humedad (Lehmann, Kern, Glaser & Woods, 2003a).

A pesar de contar con un volumen importante de información sobre las ventajas de la incorporación de CV al suelo, son pocos los estudios económicos sobre los costos y la competitividad de la práctica frente a otras alternativas. El estudio que se presenta a continuación aportará información sobre las implicaciones financieras y económicas de la práctica, haciendo énfasis en la aplicación en regiones tropicales. La información considerada sobre la *Bio-carbonización* se obtuvo a partir de los experimentos de campo realizados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en la altillanura colombiana (Rondón et al., 2005). El escenario propuesto para la aplicación de la práctica supondrá que la fuente de biomasa para la carbonización son los residuos de una plantación de *Acacia mangium*. Esta especie ha sido sugerida en esta investigación, teniendo en cuenta su adaptabilidad a los suelos de los Llanos Orientales, su rápido crecimiento y el atractivo que tiene como madera comercial (CORPOICA, 2005).

El desarrollo de este documento incluye una revisión de literatura, en la cual se establecen los beneficios de la práctica. Posteriormente se discute el marco teórico, en el cual se modelan las decisiones de los agricultores frente a la aplicación de una práctica capaz de incrementar el contenido de carbono en el suelo. Con base en esta información se diseña un marco metodológico y se obtienen los principales resultados, que son discutidos en la sección número seis. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2. Estado del Arte de la Bio-carbonización

Desde el punto de vista económico, la acumulación de carbono en el suelo genera tres tipos de valor: la disminución de las concentraciones de CO₂ atmosférico, el aumento en la productividad y la sostenibilidad⁴ causado por una mejora en la calidad del suelo, y otros beneficios ambientales relacionados con la calidad del suelo como, por ejemplo, el mejoramiento de la calidad del agua y la disminución de la erosión.

De las emisiones generadas por el cambio en el uso de la tierra, alrededor del 60% proviene del pool de carbono contenido en el suelo; en este sentido se ha logrado determinar que las técnicas convencionales de agricultura conllevan a la pérdida de entre el 50 y el 70% de MOS, lo que trae como consecuencia la degradación y desertificación de los suelos (Lal, 2003).

La degradación y desertificación de los suelos se contrarresta con el uso de prácticas agrícolas que disminuyan las pérdidas de MOS o incluso sean capaces de aumentarla, conduciendo a la captura efectiva de carbono al tiempo que incrementen la sostenibilidad agrícola del suelo.

⁴ Sostenibilidad entendida como la capacidad de mantener un nivel de producción por un número de periodos apreciable dentro de la escala humana.

Cole (1997) ha estimado que mediante técnicas de manejo agrícola, que incluyen la labranza mínima, los cultivos de cobertura, el uso de abonos orgánicos, el manejo de la irrigación y los sistemas agroforestales, la cantidad de carbono capturado por el suelo puede incrementarse, en un intervalo comprendido entre 0.44 a 0.88 Pg⁵ por año, a una escala global, y que esta tasa de captura puede ser mantenida durante 50 años. Otro estudio (Lal, 2003) revela que esta cantidad puede alcanzar 1.2 Pg de carbono por año, equivalente al 37% de las emisiones antropogénicas netas. En general estas estimaciones están basadas en el potencial agronómico de los suelos para capturar carbono dejando de lado las consideraciones económicas.

La captura de carbono en el suelo constituye una solución atractiva para la captura de CO₂, no obstante, presenta limitaciones que han retrasado su implementación como sumidero de carbono y su negociación en el mercado internacional de emisiones de GEI, por parte de organismos privados y públicos⁶. Estas limitaciones están relacionadas principalmente con la saturación y la permanencia del carbono en el suelo. La saturación implica que una vez se ha alcanzado una determinada concentración de MOS, continuar con el uso de una práctica específica de acumulación de carbono no produce ningún incremento en el contenido de MOS. Sin embargo, y con relación a la permanencia, si se abandona la práctica de acumulación de carbono y se retorna a una práctica convencional, el suelo regresaría al equilibrio inicial liberando el carbono capturado. Adicionalmente, las metodologías para determinar el contenido de carbono en el suelo continúan siendo costosas, lo que se traduce en elevados costos de transacción.

Los problemas señalados anteriormente son solucionados en gran medida mediante la aplicación de CV, como una forma de captura de carbono en el suelo. Con relación a la permanencia se tiene, por ejemplo, que cuando la biomasa se incorpora directamente al suelo, en forma de hojarasca o compost, al cabo de 100 años se espera que menos del 10% del carbono permanezca en el suelo. En el mismo sentido, Okimori, Ogawa & Takahashi (2003) señalan por ejemplo que, al cabo de un año el 53% del carbono acumulado en la biomasa sin ningún tratamiento y esparcida en el campo retorna a la atmósfera como CO₂. En contraposición, el CV es la fracción orgánica del suelo con mayor estabilidad y permanece en él por varios miles de años (Glaser, Lehmann & Zech, 2002; Pessenda, Gouveida & Aravena, 2001). Los estudios originales realizados sobre los puntos de Terra Preta en el Amazonas (Glaser et al, 2001), así como estudios recientes (Lehmann & Rondón, 2005) demuestran las bajas tasas de mineralización de la materia orgánica derivada del carbón vegetal, lo que sin duda condujo a su acumulación a lo largo del tiempo.

Lo anterior indica que la MOS incorporada mediante la práctica de Bio-carbonización, no solo es muy persistente, sino que además es fácil de cuantificar,

⁵ Peta gramos (1 x 10¹⁵ gramos). La transferencia antropogénica neta ha sido estimada en 3.2 Pg año⁻¹ (IPCC, 2001).

⁶ Dentro de los Certificados de Reducción de Emisiones negociados bajo el contexto del Protocolo de Kyoto, todavía no se han definido los parámetros que permitan la transacción de carbono secuestrado mediante actividades agrícolas (UNFCCC, 2006).

puesto que una vez aplicado el CV es muy poco probable que retorne a la atmósfera como CO₂, lo que se traduce en ventajas en el momento de certificar y negociar la captura de GEI. El potencial de captura de carbono al cambiar de la práctica tala y quema al sistema de adición de carbón vegetal es de 0.2 Pg C/año, a escala global, y si se combina con residuos agrícolas el potencial se incrementa en 0.2 Pg C año⁻¹ adicionales (Lehmann, Gaunt & Rondón, 2006). Este nivel de captura es similar al calculado para actividades de reforestación, estimado por el IPCC (2001) en 0.39 Pg C año⁻¹.

Con relación al nivel de saturación, se ha encontrado que dosis tan altas como 135 ton C ha⁻¹, aplicadas en forma de CV, no afectan de forma negativa la productividad del suelo y por el contrario incrementa el rendimiento de los cultivos (Glaser et al., 2002). En general se ha encontrado que el nivel de aplicación adecuado, en términos de disponibilidad de biomasa y efecto sobre la productividad, se encuentra en el intervalo comprendido entre 5 y 50 ton C ha⁻¹. Estos valores superarían a los encontrados por Antle & McCarl (2002), para el nivel de saturación y la tasa de ganancia de carbono⁷, que en promedio, para otras prácticas de secuestro de carbono en suelo, oscilan entre 15 ton C ha⁻¹ y 0.3 ton C ha⁻¹y⁻¹, respectivamente.

Así mismo, los proyectos de uso de la tierra que pretenden negociar certificados en donde se garantice la captura de GEI, deben tener en cuenta, además de los flujos de CO₂, los flujos de óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄)⁸. Ignorar los flujos de estos gases podría dar lugar a proyectos que a pesar de capturar CO₂, incrementan las emisiones de N₂O y CH₄, y conducir a emisiones netas, en términos de equivalentes de CO₂. En este sentido existe evidencia que permite asegurar que la adición de CV al vegetal al suelo reduce de forma significativa los flujos de N₂O y CH₄ (Rondón et al., 2005).

Además de reducir la concentración de GEI el incremento de la concentración de carbono en el suelo genera otros beneficios ambientales, conocidos como co-beneficios. La reducción en la erosión y las mejoras en la calidad de agua se destacan como los principales co-beneficios (Lehmann & Rondón, 2005).

Los beneficios discutidos hasta el momento corresponden principalmente a beneficios públicos. Sin embargo, estos beneficios pueden ser comparables e incluso superados por los beneficios privados, y en cualquier caso deben ser tenidos en cuenta dentro de un análisis de viabilidad económica (Post et al., 2004). El aumento de carbono en el suelo, puede mejorar la productividad de los cultivos y alargar los periodos en los cuales un suelo puede ser aprovechado en actividades agrícolas (Post et al., 2004; Antle & McCarl, 2003). En suelos con bajos niveles de materia orgánica los nutrientes aplicados se lavan rápidamente y son conducidos a zonas que no son

⁷ La tasa de ganancia de carbono es definida como el incremento anual en el contenido de carbono con relación a la línea base, expresado como Ton C ha⁻¹ año⁻¹.

⁸ Estos gases tienen un mayor poder radiactivo que el CO₂. Las capacidades de calentamiento global del CH₄ y el N₂O son, respectivamente, 21 y 310 veces mayores que la del CO₂ (IPCC, 2001).

alcanzadas por las raíces de las plantas (i.e. subsuelo y aguas subterráneas) (Lehmann et al, 2003b). Desde el punto de vista privado, esto implica que la inversión que realizan los agricultores en fertilizantes no tenga el rendimiento esperado.

En consecuencia el aumento en la MOS conduce al aumento en la producción en algunos cultivos y al incremento en los beneficios derivados de una práctica agrícola. De esta forma, la materia orgánica puede ser tratada como un insumo dentro de la producción agrícola. Tschakert (2004), por ejemplo, en un estudio a escala de pequeñas fincas en Senegal, encuentra que, para 15 prácticas de manejo capaces de capturar carbono, que incluyen la adición de estiércol de ganado y la conversión a pastos, el valor presente neto de los beneficios privados derivados del incremento en MOS para un periodo de 25 años, se encontraban dentro del intervalo comprendido entre US \$ -1400 y 9600 por tonelada de carbono.

Por otro lado Ringius (2002), determinó que los retornos financieros de diferentes prácticas que aumentan el contenido de carbono en el suelo, también en el África, y encontró que variaban entre 4.1 y -1.3. De acuerdo con esta investigación el incremento en la producción de maíz por tonelada de carbono, cuando se utilizó fertilización con estiércol, aumentó los ingresos de los agricultores en US \$ 1066, mientras que los costos por tonelada fueron de tan solo US \$ 260.

El efecto de la aplicación de carbón vegetal sobre la productividad ha sido revisado por Glaser et al. (2002) y Lehmann & Rondón (2005). Además de la retención de nutrientes provenientes de otras fuentes (que incluyen los nutrientes aplicados, así como aquellos con los que el suelo se encuentra dotado), la aplicación de CV mejora la fertilidad del suelo mediante la liberación de nutrientes que se encuentran sobre su superficie (tales como K, hasta una extensión limitada de P y micronutrientes) (Lehmann & Rondón, 2005).

Hasta el momento la discusión realizada tenía como objetivo determinar los beneficios generados por el incremento de la MOS, con énfasis especial en el efecto de la aplicación de carbón vegetal al suelo. En las siguientes secciones se presenta el marco teórico y la metodología propuesta para evaluar la viabilidad financiera de la práctica de Bio-Carbonización y se discutirán algunas implicaciones económicas de la misma.

3. Marco Teórico

La naturaleza de los beneficios públicos y privados asociados a la MOS hace necesario otorgar incentivos para la adopción de la práctica con el fin de alcanzar óptimos económicos (Izac, 1997). Antle & McCarl (2002), por ejemplo, concluyen que el pago que debe ser realizado al agricultor para que decida adoptar una práctica capaz de incrementar el contenido de carbono debe ser tal que $h^{is} < g^{is}$, donde h^{is} es el costo de oportunidad por periodo que tiene el agricultor al cambiar de la práctica i , que conduce a una cantidad inferior de carbono en el suelo, a la práctica s , cuyo nivel de captura de carbono en equilibrio es superior, y g^{is} es el pago que recibe el agricultor cada periodo por cambiar de la práctica i a la práctica s .

Antle & Diagana (2003) extienden el análisis a múltiples periodos. Definen un modelo que incluye productividad, costos de implementación e incentivos por la captura de carbono como MOS. Dentro del modelo se asume que el agricultor debe cambiar de un sistema agrícola i , que ha usado durante un periodo de tiempo y constituye su línea base para el nivel de carbono almacenado, a un sistema alternativo s que le permite aumentar el pool de carbono del nivel inicia hasta un nivel $C(s)$ en el periodo T . De tal forma, el Valor Presente Neto (VPN) de cambiar del sistema i al sistema s para T periodos está dado por la ecuación (1).

$$VPN(i, s) = \sum_{t=1}^T D_t [NR(p_t, w_t, z_t, s) + g_t(i, s) - M_t(i, s)] - I(i, s) \quad (1)$$

donde $D_t = (1/(1+r))^t$ y r es la tasa de interés anual; $NR(p_t, w_t, z_t, i)$ es el beneficio neto por hectárea del sistema s en el periodo t , dado un precio de producto p_t , unos precios en los insumos w_t y unos servicios de capital z_t ; $g_t(i, s) = P_t \Delta c_t(i, s)$ es el pago producido por la captura de carbono en el cual P_t es el precio por tonelada capturada y $\Delta c_t(i, s)$ es el incremento en toneladas por hectárea generado por la implementación de la práctica s en el periodo t ; M_t es el costo de mantenimiento por periodo causado por el cambio de sistema agrícola; y finalmente $I(i, s)$ es el costo de implementación del sistema alternativo que captura carbono como MOS. Si el agricultor continúa con la práctica inicial obtendrá un $VPN(i)$ para el cual los beneficios netos son iguales a $NR(p_t, w_t, z_t, i)$ y $g_t(i, s) = M_t(i, s) = I(i, s) = 0$. De acuerdo con el modelo el agricultor aplicará la práctica s si y solo si $VPN(i, s) > VPN(i)$.

De acuerdo con estos modelos, la captura de carbono en el suelo puede ser vista como un servicio por el cual paga un agente que requiere certificados de reducción de emisiones. Sin embargo, una vez se deje de pagar el “servicio”, los agricultores no tendrán incentivos para continuar con la practica que captura carbono y este será liberado nuevamente a la atmósfera como CO_2 . Una alternativa es asegurar la duración del contrato por un periodo tal que al término del contrato la productividad derivada del incremento en el stock de carbono, sea lo suficientemente grande como para garantizar que el agricultor no tiene incentivos para retornar a los niveles de carbono iniciales.

Los modelos discutidos, hacen evidentes las ventajas de la Bio-Carbonización, frente a otras prácticas de manejo agrícola que permiten la captura de MOS: por un lado, su impacto en la productividad y la alta tasa de captura, deben reducir el costo de oportunidad por tonelada capturada; y por otro lado, la prolongada permanencia en el suelo facilita la formulación de contratos y reduce los costos de monitoreo y verificación. A continuación se presenta un marco metodológico que permite realizar el análisis de la práctica de Bio-Carbonización.

4. Marco Metodológico

Se propone realizar el análisis de la práctica de Bio-Carbonización siguiendo una estrategia que incluye las siguientes etapas: *i*) consolidar la información disponible

para determinar el efecto que tiene la aplicación de carbón vegetal al suelo, sobre la productividad agrícola, el secuestro de carbono y otros *co-beneficios* ambientales; *ii*) determinar la viabilidad desde una perspectiva financiera, que incorpore la información obtenida en el punto anterior y que permita comparar la práctica *Bio-Carbonización* con otra práctica considerada como línea base, suponiendo que la práctica se aplica en una finca tipo en los Llanos Orientales de Colombia. Como parte de la evaluación financiera se llevará a cabo una simulación de Montecarlo⁹ para realizar un análisis de riesgo y sensibilidad; *iii*) optimizar, mediante programación lineal (PL), las decisiones tomadas por los cultivadores estableciendo supuestos sobre el uso de la tierra, considerados en la evaluación financiera, para específicamente encontrar las asignaciones óptimas del agricultor sobre la implementación de la práctica, así como el potencial de captura de carbono en el largo plazo; y *iv*) comparar la práctica *Bio-Carbonización* con otras de secuestro de carbono o reducción de emisiones para establecer su competitividad como alternativa de mitigación del cambio climático.

La PL, ha sido seleccionada para determinar el costo de adopción de la práctica Bio-carbonización y simular las decisiones de los agricultores, ya permite realizar análisis a escala de finca y no requiere un volumen importante de datos derivados de la previa adopción de la práctica¹⁰.

5. Información Utilizada

Para la evaluación financiera ex ante a escala de finca, se tiene información obtenida de la revisión bibliográfica, conjuntamente con experimentos adelantados, para determinar el efecto del CV sobre cultivos, por el Centro Internacional de Agricultura Tropical en la finca Matazul, ubicada en los Llanos Orientales de Colombia.

La *Bio-carbonización* es particularmente atractiva cuando está asociada a procesos productivos, en los cuales se genera biomasa considerada como residuo¹¹. El escenario propuesto plantea que ésta biomasa sea producida durante la explotación de un cultivo de *A. Mangium*. Esta especie ha sido sugerida en esta investigación, teniendo en cuenta su adaptabilidad a los suelos de los Llanos Orientales, su rápido crecimiento y el atractivo que tiene como madera comercial (CORPOICA, 2005). Asimismo, se ha calculado que, en el proceso de beneficio comercial, entre el 30 y el 60 por ciento de la biomasa aérea que originalmente contiene un árbol es considerada desecho y no genera ingresos al cultivador (CORPOICA, 2005).

De esta forma, los beneficios netos para el agricultor para cada periodo en que se aplique la práctica de Bio-carbonización son calculados como se indica en la ecuación (2).

⁹ Los análisis de riesgo y sensibilidad se realizarán usando el programa Crystal Ball.

¹⁰ Hazell & Norton (1986), revisan la aplicación de PL, específicamente aplicada a problemas agrícolas.

¹¹ Lehmann et al. (2006), han propuesto diferentes escenarios para la mitigación de emisiones en los cuales la Bio-carbonización puede ser utilizada.

$$NB_{BC_t} = B_{prod_t} + B_{Mad_t} + B_{Capt-C_t} - C_{Estab_t} - C_{trab_t} - C_{rentas_t} \quad (2)$$

NB_{BC} es el beneficio neto de la práctica de *Bio-carbonización* en el periodo t ¹². Todos los beneficios y costos se toman en cuenta cuando representan un cambio con relación a la línea base, donde se considera una práctica de manejo agrícola representativa para la Altillanura Colombiana. Esta práctica incluye una rotación de maíz, soya y pastos¹³; estos últimos destinados a una explotación de ganado vacuno del tipo doble propósito.

B_{prod} es el incremento en los ingresos por producción de biomasa en los cultivos, que es determinado por las rotaciones y las asignaciones en el uso de la tierra para cada periodo, y se calcula como el producto del área con aplicación de carbón vegetal (A_{acond}), por el incremento en el rendimiento de los cultivos ($Inc_{cultivo}$) y por el precio de los mismos ($P_{cultivo}$), según ecuación (3).

$$B_{prod} = A_{acond} \cdot Inc_{soya} \cdot P_{soya} + A_{acond} \cdot Inc_{maiz} \cdot P_{maiz} \quad (3)$$

B_{Mad} es el incremento en ingresos por ventas de madera y B_{Capt-C} es el incremento en ingresos derivado del incentivo por captura de carbono (este incentivo puede ser variado de acuerdo a diferentes escenarios), y se calculan siguiendo las ecuaciones (4) y (5).

$$B_{Mad} = A_{Forest} \cdot v \cdot p_v \quad (4) \quad B_{Capt-C} = A_{Forest} \cdot \Delta b \cdot p_b \quad (5)$$

A_{Forest} es el área dedicada a plantaciones forestales, v es el volumen de madera comercializable y p_v es el precio de la misma. Adicionalmente, Δb es el incremento en el contenido de carbono generado en un periodo determinado y p_b el precio por tonelada de carbono capturada.

C_{Estab} son los incrementos en costos por concepto de establecimiento y mantenimiento de la práctica, que incluyen los costos relacionados con la plantación forestal, la carbonización y la aplicación del carbón vegetal. C_{trab} es el incremento en los costos laborales correspondiente a las actividades de establecimiento y mantenimiento antes señaladas. C_{rentas} es el costo de las rentas perdidas por el cambio de manejo agrícola, y se obtiene de multiplicar el área sembrada en forestales por el beneficio neto por hectárea obtenido de las prácticas que son reemplazadas por estas plantaciones.

De acuerdo con lo discutido en el marco teórico, para que el agricultor decida adoptar la práctica de *Bio-carbonización*, el valor presente de los beneficios netos (VPN_{BCT}) debe ser positivo, como se expresa en la ecuación (6).

¹² En todos los casos se debe entender que NB_{BC} , y sus respectivos componentes, corresponden a un año específico de aplicación de la práctica. En adelante los subíndices de tiempo son eliminados.

¹³ Los pastos incluidos en este análisis son *Brachiaria* mejorada (cv. Toledo o Mulato).

$$VPN_{BC_T} = \sum_{t=0}^T NB_{BCt} \cdot (1+r)^{-t} > 0 \quad (6)$$

En este análisis no se tienen en cuenta costos de transacción, monitoreo, entrenamiento y verificación. En el Anexo se especifica la información utilizada; que incluye las rotaciones usadas, la productividad de madera y los volúmenes de carbono capturado, los costos de producción e inversión requerida, la productividad y valor de los cultivos. Otra información relevante con respecto a la finca tipo se expone a continuación.

De acuerdo con Rivas, Holmann & García (2005), para la altillanura colombiana, es posible suponer una finca tipo que tiene una extensión de 500 ha¹⁴. El escenario propuesto para el análisis costo beneficio de la *Bio-carbonización*, implica que en dicha finca, se destina una porción de tierra (estimada en un 20%¹⁵) para la plantación de *A. Mangium* y la superficie restante se mantiene con la rotación definida como línea base, que corresponde a la situación sin proyecto.

La Tabla A1 del Anexo muestra un esquema del uso de la tierra de acuerdo con la práctica propuesta, para un periodo de análisis de 28 años. Dentro de este análisis, se asume que la distribución de tierras *con proyecto* es 20% sabana nativa, 60% rotación pasturas-cultivos y 20% *A. Mangium*, mientras que *sin proyecto* es 20% sabana nativa¹⁶ y 80% rotación pasturas-cultivos.

El turno de tala propuesto para la *A. Mangium*, de acuerdo con cálculos propios realizados con base en la función de volumen de madera comercializable propuesta por Subarudi et al. (2003)¹⁷ y una tasa anual de descuento del 2%¹⁸, es de siete

¹⁴ De acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el área promedio de los predios rurales teniendo en cuenta los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán es de 650 hectáreas. El IGAC también señala que en la región existen 486 predios que se encuentran en el intervalo comprendido entre 200 y 500 hectáreas, así como 783 predios se ubican en el intervalo comprendido entre 500 y 1000 hectáreas (cálculos propios realizados a partir de estadística comprada al IGAC). Las consideraciones realizadas en este trabajo no limitan el número de personas que actúen como propietarios de la finca tipo.

¹⁵ Esta porción puede ser variable de acuerdo con el escenario y es sugerida por los expertos del CIAT, de acuerdo con las dosis de carbón aplicadas en sus ensayos.

¹⁶ En cualquier caso, análisis costo beneficio o programación lineal, se asume que la mínima porción de sabana nativa que debe mantener el agricultor es 100 hectáreas. La porción de sabana nativa se determina con base en el criterio de expertos del CIAT y tiene como objetivo actuar como una zona de amortiguación.

¹⁷ Aunque existen plantaciones de *A. Mangium* en la altillanura colombiana, pertenecientes a un proyecto de investigación adelantado por CORPOICA, de los cuales se tiene datos de volumen en función del tiempo (CORPOICA, 2005), los árboles tan solo tienen 4 años, por lo que se decide usar en adelante los parámetros usados por Subarudi et al. (2003) que, hasta la fecha, muestran concordancia con las estimaciones de CORPOICA (2005).

¹⁸ Este valor considera la tasa de interés del mercado vigente (DTF), en términos reales, para el 2005, de acuerdo con datos del Banco de la República (2006). Esta será la tasa de interés considerada a lo largo de la evaluación.

años¹⁹. Dentro de la práctica se supone que la biomasa considerada residuo²⁰ será carbonizada y aplicada a los suelos que mantienen las rotaciones de cultivos y pasturas. El residuo de biomasa puede ser generado una vez se haga la tala al cabo de los siete años, esto implica que la aplicación de CV se efectúa solamente durante los años en los cuales se beneficia la madera. Con base en la función de volumen usada por Subarudi et al. (2003) expresada en la ecuación (7), al cabo de los siete años el volumen de madera comercializable (v_7) es de 131.29 m³ ha⁻¹ (Tabla A2 del Anexo).

$$v_i(t) = 194.2 \cdot [1 - \exp(-0.374 \cdot t)]^{5.155} \quad (7)$$

A partir de este valor, es posible establecer que la cantidad de carbono secuestrada (b_i), para t igual a siete años, es 53.35 ton C ha⁻¹ (Este valor corresponde a una tasa de captura promedio anual de 7.62 Ton C ha⁻¹; Tabla A2 del Anexo).

Esta información permite determinar los flujos de dinero derivados específicamente de la implementación de la plantación forestal. Estos flujos son calculados de acuerdo con el esquema de servicios temporales, planteado por Cacho et al. (2003) para plantaciones forestales que prestan servicios de captura de carbono, en el cual los pagos por incrementos en el volumen de carbono captura se realizan anualmente y una vez se tala el bosque los dineros recibidos por concepto de estos servicios ambientales deben ser redimidos, en una proporción que debe ser establecida por las partes.

Cuando se considera la práctica de *Bio-carbonización*, los flujos de dinero derivados del esquema de servicios temporales deben ser modificados, de modo que se introduzca el costo de la carbonización y que la cantidad de créditos redimidos sea reducida en la cantidad de carbono contenido en el CV, teniendo en cuenta, como se planteó en la revisión de literatura, que este, dada su recalcitrancia en el suelo, puede ser considerado como inerte dentro del análisis.

Por otro lado, las ecuaciones de crecimiento, además de definir las tasas de producción de madera y secuestro de carbono, permiten estimar la cantidad de residuos generados. La biomasa aérea no comercializable es calculada en 23.20 ton ha⁻¹, es decir 11.60 ton C ha⁻¹. De acuerdo con la FAO (1983), el rendimiento durante la conversión de biomasa a carbón vegetal es del 25%. Esto implica que si se carboniza la totalidad del residuo generado en la plantación de *A. Mangium*, se obtendrían 5.80 ton de CV por hectárea, que contienen 4.93 ton C²¹ (Tabla A3 del Anexo). La transformación de una forma de biomasa con bajo contenido de C,

¹⁹ Este valor concuerda con el sugerido por el investigador de CORPOICA Fernando Gonzalez, y con base en los resultados de su investigación (CORPOICA, 2005). Esta estimación fue realizada siguiendo la metodología propuesta por Conrad (1999), la función de crecimiento planteada por Subarudi et al. (2003) y los precios de madera definidos en la Tabla A6 del Anexo.

²⁰ Como residuo se considera todo el material aéreo cuyo diámetro sea inferior a 8 cm.

²¹ El carbón vegetal está formado en un 85% por carbón elemental. Asimismo, 5.14 Ton de C, equivalen a 18.85 ton de CO₂eq.

altamente susceptible a la descomposición²² y que es considerada residuo, en una estructura que es mayoritariamente C, que es altamente recalcitrante en el suelo y que además mejora la calidad del mismo; es el mecanismo mediante el cual la *Bio-carbonización* permite la fijación de carbono.

Para la producción de este carbón vegetal, ensayos preliminares realizados en el CIAT (Rondón et al., 2005), permitieron establecer que una unidad de carbonización, conformada por 20 tambores²³ y dos operadores, tiene capacidad de generar 5 ton de CV mensuales. De acuerdo con los cálculos presentados, una plantación de 100 ha de *A. Mangiun*, produciría, por cada turno, biomasa suficiente como para elaborar 580 ton de CV. Esto quiere decir que, para la carbonización de la totalidad del residuo generado por la plantación, en un solo mes, se requieren 116 unidades de carbonización. Por otro lado, se ha calculado que los tambores usados en la carbonización tienen un tiempo de vida útil de tres meses, por lo que el residuo de biomasa puede ser carbonizado a lo largo de este periodo, de forma que solo se necesitarían 39 unidades, es decir 780 tambores y 78 operadores (Tabla A4 del Anexo).

Con relación al efecto del CV sobre la producción de biomasa, se pueden considerar los resultados experimentales obtenidos por CIAT (Rondón et al., 2005; Rondón et al., 2003), realizados en la finca Matazul ubicada en la altillanura colombiana (Municipio de Puerto López, Meta) y en los invernaderos de Palmira (Valle del Cauca). El experimento fue implementado en 2003 y las observaciones han sido recolectadas a lo largo de tres cosechas. Los investigadores del CIAT determinaron que la aplicación de carbón vegetal sobre la producción de maíz generó, con un rezago de un año²⁴, un incremento de 19 y 28 por ciento, con relación al control, para las dosis baja (8 ton de CV ha⁻¹) y alta de CV, respectivamente. Para el análisis se supondrá que la aplicación de 8 toneladas de CV genera un incremento del 15 por ciento en la productividad de maíz, que es observable un año después de la aplicación, y que se mantiene constante a lo largo del periodo de análisis.

Con relación al efecto del CV sobre la soya, Rondón et al. (2003) evaluaron el efecto de tres diferentes dosis de CV en experimentos a escala invernadero. Se encontró,

²² De acuerdo con Okimori et al. (2003), la tasa anual de descomposición de la biomasa dejada en campo abierto es superior al 50%.

²³ Se considera este método por ser más eficiente y ambientalmente más adecuado que el método tradicional en pilas. Los tambores considerados, son tambores metálicos comunes, que pueden ser producto de reciclaje y el mercado local tienen un precio de US \$ 10 por tambor. La carbonización usando tambores metálicos es descrita por la FAO (1983) y esencialmente implica el apilamiento de la madera en los tabores en los cuales el ingreso del aire se restringe a pequeños orificios, lo cual evita que la madera se quemé completamente y genere un volumen adecuado de carbón vegetal. De acuerdo con los experimentos adelantados por el CIAT, una vez se obtiene el carbón vegetal es molido para incrementar su área disponible y facilitar su aplicación al suelo. Este último paso puede hacerse usando una “voleadora” y puede ser ejecutada de forma conjunta con otras enmiendas o fertilizantes.

²⁴ De acuerdo con los expertos consultados, el efecto de la aplicación de CV solo es observado un año más tarde, porque es el tiempo necesario para que una cantidad suficiente de nutrientes, principalmente nitrógeno, se acumule sobre la superficie del CV, para luego ser liberada de forma controlada en periodos posteriores.

por ejemplo, que una dosis de 5 toneladas de CV por hectárea aumentó la producción de grano en un 40.2% con relación al control. Al contrario del maíz, estos resultados son observados durante el mismo año de la aplicación, lo cual se explica por que la soya, al ser fijadora de nitrógeno, no requiere el “acondicionamiento” del CV. Igualmente, se logró establecer un incremento en la producción de los forrajes equivalente al 5.3%. La productividad del maíz, soya y la pastura considerada, así como el efecto que sobre ella tiene una aplicación de 7.73 ton de carbón vegetal por hectárea, se encuentran en la Tabla A4 del Anexo. Esta dosis, se definió con base en la cantidad de CV generada por la plantación de *A. Mangium* (580 ton CV por cada turno) y las dosis aplicadas en los experimentos de CIAT. De esta forma, cada turno generaría el carbón vegetal necesario para su aplicación en 75 hectáreas (Tabla A5 del Anexo).

Para el análisis costo beneficio se deben tener en cuenta los precios que en promedio percibe un agricultor de la región. Los precios de los productos, de acuerdo con el uso de la tierra, y la tasa de interés utilizada²⁵, se presentan en la Tabla A6 del Anexo. Los costos de producción de los sistemas considerados y los requerimientos de mano de obra, se presentan en las Tablas números A6, A7 y A8 del Anexo, respectivamente.

Finalmente, las distribuciones de probabilidad y los intervalos más probables entre los cuales varían algunos de los parámetros más relevantes, son mostrados en la Tabla A9 Anexo. Estos valores serán insumos necesarios en el análisis de riesgo y sensibilidad.

6. Discusión de Resultados

6.1. Evaluación Financiera

De acuerdo con la discusión realizada, además del escenario con Bio-carbonización, es necesario comparar la línea base (situación sin proyecto) con los resultados obtenidos en un escenario donde se establece la explotación forestal pero no se produce carbón vegetal - denominado Forestal - y otro donde se produce el carbón vegetal pero se vende como combustible - denominado Carbonización -²⁶. Como se explicó antes, el criterio de análisis será el Valor Presente Neto (VPN) financiero del incremento en los flujos derivados de la implementación de cada uno de estos escenarios, evaluados para la totalidad de la finca. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

²⁵ Esta tasa fue fijada de acuerdo con la DTF promedio de 2005, en términos reales (Banco de la República, 2006).

²⁶ La mayor parte del CV esta destinado a su uso en parrilladas. Algunos proyecto MDL han propuesto su uso como sustituto de combustibles fósiles como el coque.

Tabla 1. Resumen de resultados de la evaluación financiera.

Práctica	VPN	VPN/ha	VPN del Incremento	VPN del Incremento/ha	Incremento %	TIR del Incremental (%)
Bio-Carbonización	\$ 3,756,195	\$ 7,512	\$ 1,398,023	\$ 2,796	59.28%	17.85
Carbonización	\$ 3,392,662	\$ 6,785	\$ 1,034,491	\$ 2,069	43.87%	16.02
Forestal	\$ 3,337,071	\$ 6,674	\$ 978,899	\$ 1,958	41.51%	15.38
Sin Proyecto	\$ 2,358,172	\$ 4,716	\$ -	\$ -	0.00%	n.a.

Fuente: Cálculos propios. Ver Anexo para información detallada. n.a.: no aplica. Dólares de 2005.

Los resultados obtenidos indican que la práctica *Bio-carbonización* es viable, desde el punto de vista financiero. Su implementación le generaría al agricultor un incremento en los beneficios netos superior al 50% de los obtenidos en el escenario Sin proyecto (Tabla 1). Para que la Bio-carbonización sea viable, no solo debe superar al escenario Sin proyecto, sino también los flujos de los escenarios Carbonización y Forestal. Los resultados de la Tabla 1, permiten observar este comportamiento: los flujos derivados de la Bio-carbonización sobrepasan los de estos escenarios, en un 15.42% y 17.77%, respectivamente.

Una vez se ha generado el carbón vegetal, incorporarlo al suelo en lugar de venderlo²⁷ constituye un costo de oportunidad asociado con la Bio-carbonización. Sin embargo, los beneficios producidos por el incremento en la fertilidad y la captura de carbono lo superan ampliamente. De esta forma, si se calcula el precio de mercado que debería tener una tonelada de CV, de modo que el agricultor prefiriera venderla en lugar de aplicarla al suelo como enmienda, el valor que se encuentra es de US\$ 318 por tonelada. Es decir que los beneficios obtenidos de una tonelada de carbón empleada en la *Bio-carbonización*, superan en un 218% los beneficios que el productor obtendría si decidiera venderla en el mercado.

La diferencia en el VPN entre el escenario Bio-carbonización y el Forestal, representa los beneficios netos derivados de la producción y aplicación de CV al suelo, y equivale a US\$ 419,124 (Tabla 1). Cuando no se consideran pagos por captura de carbono, esta diferencia se reduce hasta US\$ 398,446. En consecuencia, este valor equivale a los beneficios netos producidos exclusivamente por concepto de mejoramiento en la fertilidad del suelo. De esta forma, es posible afirmar que de los beneficios netos atribuibles a la aplicación de CV al suelo con respecto al escenario Forestal, el 95.07% son producidos por el incremento en la productividad gracias a una mejor calidad de suelo, mientras que tan solo 4.93% son generados por servicios ambientales relacionados con la captura de carbono.

Sin embargo, el peso que tienen estos servicios ambientales depende del esquema de pagos acordado entre el comprador y el agricultor. Por ejemplo, si no se deben redimir los certificados una vez se tala el bosque, los aportes que tienen los pagos por

²⁷ De acuerdo con las estadísticas de la FAO para las exportaciones colombianas de CV, el precio de la tonelada de CV puede ser fijado en US\$100 por tonelada (Tabla A6 del Anexo).

captura de carbono aumentan, y pasan a ser 7.75% y 8.07% del VPN para los escenarios de *Bio-carbonización* y Forestal, respectivamente.

Una alternativa en la implementación de la *Bio-carbonización*, es mantener el nivel de producción y reducir el uso en los insumos agrícolas²⁸. Cuando se considera esta alternativa el VPN del incremento en los beneficios con relación al escenario Sin proyecto es de US\$ 1,417,284. Al comparar este valor con el obtenido para el primer caso (Tabla 1), se encuentra que los beneficios, desde el punto de vista financiero, son mayores cuando se reduce el nivel de insumos y se mantiene la productividad. La diferencia entre estos dos alternativas de aplicación de la *Bio-carbonización* es de US\$ 19,261, lo que equivale a un incremento en los beneficios del 1.38%. Estos valores implican que la incorporación de carbón vegetal al suelo, ofrece una alternativa viable desde el punto de vista financiero, que permiten reducir el uso fertilizantes, haciendo que el agricultor no dependa del precio de este insumo y reduciendo los impactos ambientales que los fertilizantes puedan causar.

De otra parte, cuando se analizan las elasticidades de VPN para cada escenario, se observa que aunque en todos los casos las mayores elasticidades se presentan con relación al precio del maíz y la soya, el VPN del escenario Sin Proyecto depende en mayor medida de estos parámetros (La elasticidad del VPN con relación al precio del maíz es un 45% menor en *Bio-carbonización*). Asimismo, aunque su efecto es menor que el de los precios de los productos, se observa que dado que los incrementos en el VPN asociados a los escenarios con plantaciones forestales se obtienen en el mediano y largo plazo, la tasa de interés tiene una mayor influencia sobre estos escenarios (alrededor de un 20% más alta en *Bio-carbonización*).

Dentro de la viabilidad de la práctica es necesario reflexionar sobre las necesidades de mano de obra. Cuando se comparan los escenarios se encuentra, que en promedio la implementación de la *Bio-carbonización* reduce las necesidades anuales de mano de obra en un 5.0% (Tabla 2). En general reemplazar la rotación pastos-cultivos por plantaciones forestales implica la reducción en las necesidades de mano de obra promedio. La demanda por mano de obra en estas plantaciones presenta picos que dependen de los turnos óptimos de tala. Esta demanda se ve incrementada por las necesidades de mano para las operaciones relacionadas con producción y aplicación de CV. De esta forma, la *Bio-carbonización* presenta la máxima demanda por mano de obra en los años donde la madera es talada, los residuos son carbonizados y aplicados al suelo; alcanzando los 16,310 jornales ese año (Tabla 2). En la medida que en la región se implemente la práctica *Bio-carbonización* en un mayor número de fincas y los turnos de tala óptimos se presenten en diferentes año, la demanda por mano de obra será suavizada, lo que se traduciría en un incremento neto sobre su demanda.

²⁸ De acuerdo con el criterio de los investigadores del CIAT, disminuir en un 25% el uso de cal, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio; no debería afectar el nivel de producción de los cultivos considerados en el análisis. Sin embargo, esta alternativa no ha sido evaluada con experimentos en campo.

En la revisión de literatura se identificaron varias externalidades positivas relacionadas con el incremento de MOS y específicamente con la aplicación de CV al suelo. Sin embargo, en la evaluación financiera solo es posible internalizar los beneficios relacionados con la captura de CO₂ atmosférico. Incluso con relación a esta externalidad, es controvertible suponer que el precio que el mercado reconoce a la captura de una tonelada de CO₂ es equivalente a la totalidad de los beneficios marginales relacionados con esta operación. Para el nivel de desarrollo que tiene la Bio-carbonización no es posible internalizar todos los beneficios ambientales, teniendo en cuenta que, por el estado de las investigaciones, todavía no se cuenta con suficiente información que permita establecer la dimensión del impacto ambiental y valorar los beneficios económicos relacionados con dicho impacto.

Finalmente, es necesario considerar que durante la carbonización también se generan externalidades negativas que deben ser cuantificadas y prevenidas. Los métodos tradicionales de carbonización, por ejemplo, generan lixiviados orgánicos, con un alto grado de toxicidad. Usar canecas metálicas, como se propone en este trabajo, reduce significativamente estas emisiones pues permite recuperar con mayor facilidad los productos condensados durante la carbonización²⁹. Sin embargo, algunos de los compuestos volátiles que no son condensados pueden tener un impacto sobre la salud, principalmente sobre las personas encargadas de esta operación. Este impacto debe ser determinado con claridad para la recomendación de las prácticas que implican la carbonización de los residuos forestales.

Tabla 2. Uso de mano de obra total.

<i>Práctica</i>	<i>Uso promedio de mano de Obra (jornales/año)</i>	<i>Uso mínimo de mano de Obra (jornales/año)</i>	<i>Uso máximo de mano de Obra (jornales/año)</i>
Bio-Carbonización	9,042	7,592	16,310
Carbonización	8,961	7,592	16,166
Forestal	8,133	7,592	10,166
Sin Proyecto	9,514	9,238	10,838

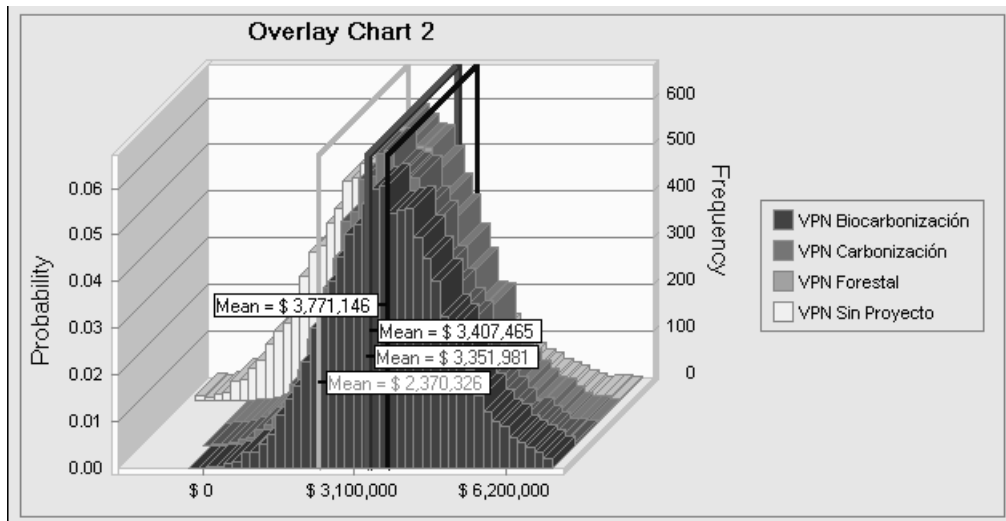
Fuente: Cálculos propios

6.1.1. Análisis de riesgo y sensibilidad evaluación financiera

Con el fin de incorporar el análisis de riesgo y sensibilidad en el análisis se llevó aplicó el modelo de Montecarlo. El resultado obtenido de la simulación es el VPN más probable y su distribución de probabilidad en cada uno de los escenarios es generado por la combinación de la varianza en los parámetros como se puede establecer a partir de la Tabla A9 del Anexo y de la Gráfica 1.

²⁹ Estos productos tienen un valor comercial que no ha sido considerado en esta investigación.

Gráfico 1 Valores más probables del Valor Presente Neto - Evaluación financiera



Fuente. Cálculos Propios.

Los valores más probables para el VPN son levemente superiores a los obtenidos en la evaluación financiera (Tabla 1), sin embargo, las tendencias se mantienen - la Bio-carbonización presenta los máximos beneficios y el escenario Sin proyecto los menores - y los cambios en todos los escenarios son proporcionalmente muy parecidos. Los intervalos de confianza al 95%, para cada uno de los escenarios se presentan en la Tabla A10 del Anexo. Usando este nivel de confianza el único de los escenarios que podría presentar pérdidas, es el escenario Sin proyecto, en el cual el límite inferior se encuentra en US\$ -201,784. Adicionalmente, el escenario Sin proyecto presenta la mayor variación con una desviación estándar de US\$ 1,396,081, mientras que el Forestal presenta la menor desviación estándar y su valor es igual a US\$ 1,149,166.

En cuanto a la sensibilidad del VPN se observan las mismas tendencias discutidas antes: el escenario sin proyecto es más sensible al precio de los cultivos - la variación en el precio del maíz explica el 51.48% de la varianza en el VPN de este escenario, mientras que para la *Bio-carbonización* este valor se reduce al 40.5% - y en los escenarios con rendimientos en el mediano y largo plazo tienen una mayor sensibilidad con respecto a la tasa de retorno - en la Bio-carbonización este valor es 1.3%, mientras que en el escenario Sin proyecto se reduce a 0.3% -.

Finalmente, cabe destacar que la variación en los parámetros relacionados con la Bio-carbonización (REC, precio del CV y los incrementos por aplicación de CV), no tienen un efecto significativo sobre la varianza del VPN en ninguno de los escenarios.

6.2. Programación Lineal

La programación lineal -PL permite encontrar las decisiones óptimas del agricultor desde el punto de vista financiero³⁰. Este análisis se hace a partir de las matrices

³⁰ El análisis de programación lineal fue realizado usando la función Solver de Excel.

construidas para el análisis costo beneficio. La función objetivo es valor presente del incremento en los beneficios asociados con la *Bio-carbonización*, de acuerdo con lo planteado en las ecuaciones 2 y 6. Las variables de decisión y las restricciones son especificadas en la Tabla 3. Adicionalmente, la estructura de la matriz de pagos de la finca incluye la información biológica y económica especificada en el Anexo. Los resultados de este análisis permitirán predecir si la aplicación de la *Bio-carbonización* es una decisión adecuada para un agricultor, cuyo objetivo es la maximización de sus beneficios en un periodo de 28 años, e igualmente obtener los valores óptimos para cada una de las variables de decisión.

Tabla 3. Variables de Decisión y Restricciones de la Programación Lineal

Variables de Decisión	Restricciones
Área bajo rotación Pastos-Cultivos (APC)	Área Explotación Total \leq Área Finca
Área bajo Forestales (AF)	ACV \leq AF
Área destinada a producción de CV (ACV)	ABio \leq ACV
Área de producción de CV aplicado al suelo (ABio)	Áreas positivas

De acuerdo con la Tabla 3, el propietario de la finca debe decidir si incorpora a su producción plantaciones forestales y con base esta decisión destinar o no recursos para la elaboración de CV a partir de los residuos de la plantación. Una vez cuenta con un volumen de CV el agricultor debe definir la porción que debe ser vendida en el mercado y la que debe ser aplicada al suelo, es decir en que medida adopta o no la Bio-carbonización. En este sentido la relación entre el CV aplicado al suelo y el CV producido, puede dar una idea sobre el nivel de implementación de la Bio-carbonización.

La Tabla 4 contiene el resumen de los resultados de la PL. Cuando se parte del escenario planteado en el análisis costo beneficio, el proceso de optimización conduce a una solución en la cual el 70.0% del área de explotación de la finca, se mantiene con la rotación de pastos y cultivos (Valor final 1, en la Tabla 4). Para esta solución, el agricultor incrementa el área con plantaciones forestales de modo que pueda adecuar mediante la aplicación de CV la totalidad del área bajo la rotación pastos cultivos. Con relación a la adopción de la Bio-carbonización se encuentra que para maximizar los beneficios financieros todos los residuos producidos deben ser carbonizados y aplicados al área que tiene la rotación pastos-cultivos. Es decir que la implementación de la Bio-carbonización es del 100%. Por otro lado, el agricultor enfrenta pérdidas durante el primer año que alcanzan los US\$ 57,706 y solo tiene flujos positivos a partir del segundo año. Cabe anotar que en el escenario Sin proyecto, el agricultor obtiene beneficios positivos desde el primer año. La captura de carbono por concepto de CV aplicado al suelo, a lo largo del periodo de análisis es de 6,673 toneladas de CO₂ equivalente.

Las asignaciones de recursos expuestas en el párrafo anterior corresponden tan solo a un máximo parcial. Las decisiones tomadas por el agricultor para alcanzar un máximo global se describen en la columna Valor final 2 (Tabla 4). En este caso el agricultor decide plantar toda su finca en A. Mangium y utilizar todos los residuos para la producción de CV. Aunque esta alternativa supera ampliamente el anterior

escenario, implica realizar una inversión de US\$468,453 durante los tres primeros años, incluso teniendo en cuenta que se debe vender todo el hato ganadero. De esta forma, adoptar este tipo de explotación no solo implica un choque extremo con la cultura de producción actual, sino además la necesidad de un volumen importante de capital externo. Adicionalmente, los ingresos en una explotación exclusivamente forestal, como la que propone esta solución, dependería únicamente del precio de la madera.

Tabla 4. Resumen de los resultados Programación Lineal-Escenario *Bio-carbonización*.

Nombre	Valor original	Valor final 1	Valor final 2	Valor final 3
Área bajo rotación Pastos-Cultivos	300	276.96	0	209.0
Área bajo Forestales	100	123.04	400	92.9
Área destinada a producción de CV	100	123.04	400	92.9
Área de producción de CV destinada a aplicación	100	123.04	0	92.9
VPN	\$ 3,756,195	\$ 4,078,302	\$ 6,496,134	\$ 3,129,797
Precio sobre de la tierra		\$ 6,760	\$ 15,714	\$ -
VPN primer año	\$ -44.11	\$ -57.71	\$ -221.17	\$ -

Fuente: Cálculos propios. Dólares de 2005.

Las decisiones incluidas en la solución Valor final 3 (Tabla 4), se encuentra gracias a la adición de una nueva restricción, que implica que el agricultor no tiene ni beneficios ni pérdidas durante el primer año. De esta forma, el agricultor decide abandonar 98.1 hectáreas (24.5%) de su dotación de tierra explotable. Sin embargo, decide mantener la rotación pastos cultivos en el 69.2% de la fracción de tierra que permanece bajo producción agrícola. En este caso se encuentra, igual que en Valor final 1, que la totalidad de los residuos son carbonizados e incorporados al suelo, adoptando la Bio-carbonización en un 100%.

7. Conclusiones

La información experimental recopilada sobre la Bio-carbonización, permitió definir los beneficios privados y algunas implicaciones económica de la práctica. Aunque existe claridad sobre la magnitud de los beneficios derivados del incremento en la productividad de los cultivos y del volumen de carbono capturado mediante la aplicación de la Bio-carbonización, el impacto de externalidades como la reducción en la erosión y la lixiviación de nutrientes no cuenta hasta el momento con un suficiente soporte científico que permita su cuantificación.

La evaluación financiera reveló que la práctica Bio-carbonización es viable, superando alternativas como el simple establecimiento de plantaciones forestales. Adicionalmente, se determinó que la viabilidad financiera de la práctica no depende de forma significativa de los pagos por captura de carbono; el impacto de los pagos por servicios ambientales sobre el incremento en el VPN, es superado ampliamente por el impacto asociado al incremento en la productividad del suelo. Este comportamiento puede cambiar en la medida que cambien los precios y la participación de los mecanismos de mitigación que involucran cambios en el uso de

la tierra en el mercado de carbono, se torne más dinámica. De otra parte, el análisis de riesgo y sensibilidad, reveló que la introducción de productos forestales reduce la variabilidad en los beneficios obtenidos por el agricultor, es decir el riesgo asociado a las actividades agrícolas.

Sin embargo, la viabilidad financiera es una condición necesaria, pero no suficiente para la adopción de la *Bio-carbonización*. Incluso la adopción de cultivos forestales, no ha tenido históricamente un crecimiento importante a pesar de que sus beneficios superan, desde un punto de vista financiero, las alternativas tradicionales de aprovechamiento agrícola. Dentro de este contexto es necesario evaluar con mayor profundidad las causas que han impedido el desarrollo adecuado del sector forestal. Específicamente, es necesario analizar si las señales económicas definidas a través las políticas del Gobierno, como la Ley Forestal, por ejemplo, son suficientes para generar una mayor dinámica dentro del sector.

Finalmente, es necesario resaltar que cuando se compara la Bio-carbonización, con la captura de carbono mediante el uso de plantaciones forestales, se encontró que, no obstante estas plantaciones presentan un VPN del incremental positivo frente al escenario *Sin proyecto*, la *Bio-carbonización* genera mayores beneficios y permite incrementar el volumen de carbono capturado.

8. Recomendaciones

Es necesario diseñar los mecanismos necesarios para asegurar que el desarrollo de la Bio-carbonización por parte de los agricultores que aprovechan los residuos de una plantación, no genere incentivos que conduzcan a la obtención y aplicación de carbón vegetal a partir de bosque primario.

De otro parte, contar con una práctica que mejora la calidad de suelo, que permite el aumento en la productividad y la introducción de nuevos cultivos; puede generar condiciones que permitan ampliar la frontera agrícola. En este sentido, es necesario contar con una valoración económica de los ecosistemas de sabana nativa, que permita especificar correctamente las áreas destinadas a explotación y conservación.

La implementación de la Bio-carbonización genera una serie de externalidades positivas, adicionales a la disminución de la concentración de CO₂ atmosférico, que deben ser consideradas en el análisis económico. Un análisis económico total requiere realizar investigaciones complementarias sobre las implicaciones ambientales y la valoración económica de los co-beneficios inherentes a la ejecución de la práctica. Promover pagos que compensen estas externalidades positivas mejorará la viabilidad económica de la práctica.

El aprovechamiento de residuos de plantaciones forestales es solo una de las alternativas propuestas para la aplicación de la Bio-carbonización. Se recomienda analizar otros escenarios en los cuales se consideren otro tipo de residuos y se aproveche la carbonización para la producción de combustibles de origen biológico. Uno de estos escenarios es la producción de combustibles líquidos mediante la pirólisis de biomasa, en un proceso conocido como BTL, por sus siglas en inglés.

Bibliografía

Amézquita E, Thomas RJ, Rao IM et al (2004) Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia.. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103 (2): 269-277

Antle JM, McCarl B (2002) The Economics of Carbon Sequestration. In: Tientenberg T, Folmer H (ed) *The International YearBook of Environmental and Resource Economics 2002-2003*. Edward Elgar Publishing, Northampton

Antle JM, Diagana B (2003) Creating Incentives for the Adoption of Sustainable Agricultural Practices in Developing Countries: The Role of Soil Carbon Sequestration. *Am. J. Agric. Econ.* 85 (5): 1178-1184

Arias AF (2005) Ley forestal: Urgente Necesidad. In: *Últimos artículos*. Available via DIALOG. <http://www.minagricultura.gov.co/media/74842879.pdf>. Cited 15 Nov 2005

Banco de la República (2006) Base de datos del sector financiero. <http://www.banrep.gov.co/economia/ctanallsfm.htm>. Cited 28 de feb de 2006

Brady NC, Weil RR (eds) (2002) *The Nature and Properties of Soils*, 13rd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River

Brown, S., (1997). Estimating biomass and biomass change in tropical forests: A primer. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma

Cacho OJ, Wise RM, MacDicken KG (2004) Carbon monitoring costs and their effect on incentives to sequester carbon through forestry. *Mit. Adap. Strat. Gl. Change* 9 (3):273-293

Cole, CV (1997) Global Estimates of Potential mitigation of green house gases emissions by agriculture. *Nut. Cycling Agroecosyst.* 49 (1): 221-228

Conrad JM (eds) (1999) *Resource Economics*. Cambridge University Press, New York

CORPOICA (2005) Evaluación de germoplasma y desarrollo de prácticas de cultivo sostenible para el establecimiento y manejo de plantaciones perennes de cítricos y forestales en la altillanura de Colombia. In: *Informe Final Carimagua*. CORPOICA, Villavicencio

FAO (1983) Simple Technologies for Charcoal Production. In: *FAO Documents*. Available via DIALOG. http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/X5328S/X5328S00.htm. Cited 15 Sep 2005

FAOSTAT(2006)FAO.

<http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&hasbulk=0&-subset=forestry>.

Cited 21 Apr 2006

Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W (2001) The Terra Preta phenomenon - a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88 (1): 37–41

Glaser B, Lehmann J, Zech W (2002) Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biol. Fert. Soils* 35 (1): 219-230

Hazell PBR, Norton R (eds) (1986) *Mathematical Programming For Economic Analysis In Agriculture*. McMillan Publishing Co, New Jersey.

Holmann et al. (2003) Evolución de los Sistemas de Producción de Leche en el Trópico Latinoamericano y su interrelación con los Mercados. In: CIAT . Available via DIALOG. <http://www.ciat.cgiar.org/webciat/tropileche/articulos.pdf>. Cited 16 Mar 2006

Intergovernmental Panel on Climate Change (eds) (IPCC). (2001). *Climate Change: The Scientific Bases*. Cambridge Univ. Press, Cambridge .

Izac AMN (1997) Developing Policies for Soil Carbon Management in Tropical Regions, *Geoderma* 79: 261–276.

Lal R (2003) Global Potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22 (2): 151-184

Lecocq F, Capoor K (2005) *Situación y tendencias del mercado de carbono 2005*. Banco Mundial, Washington DC

Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI (2003a) Amazonian dark earth: Origin, properties, management. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam

Lehmann J, da Silva JP, Steiner C et al (2003b) Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil* 249 (2): 343-357

Lehmann J, Rondón M (2005) Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. In: Uphoff N et al (ed) *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. CRC Press, Boca Raton

Lehmann J, Gaunt J, Rondon M (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mit. Adap. Strat. Gl. Change* 11 (2):395-419

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004). Anuario Estadístico del Sector Agropecuario. Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá

Okimori Y, Ogawa M, Takahashi F (2003) Potential of CO₂ Emissions Reductions by Carbonizing Biomass Waste From Industrial Tree Plantation in South Sumatra, Indonesia. *Mit. Adap. Strat. Gl. Change* 8 (3): 261-280

Pessenda LCR, Gouveia SEM, Aravena R (2001) Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with ¹⁴C ages of fossil charcoal. *Radiocarbon* 43 (3): 595-601

Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P et al (1995) Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267: 1117-1123

Post WM., Izaurralde RC, Jastrow JD, et al (2004) Enhancement of Carbon Sequestration in US Soils. *Biosciences* 54 (10): 895-909

Ringius L (2002) Soil carbon sequestration and the CDM: opportunities and challenges for Africa. *Clim. Change* 54 (4): 471-495

Rivas L, Holmann F, Garcia JA (2005) Nuevos Sistemas de Producción Agropecuaria y Servicios Ambientales: Una Evaluación Económica en la Altiplanura Colombiana. CIAT, Cali (in press).

Rondón M, Ramírez JA, Amézquita E, Lehmann J (2003) Effect of charcoal applications on crop/forage yield and fluxes of greenhouse gasses under glasshouse conditions. In: Centro Internacional de Agricultura Tropical, Annual report. CIAT, Cali

Rondón M, Molina D, Hurtado M, et al (2005) Enhancing the productivity of crops and grasses through bio-char amendments to unfertile tropical soils. In: Centro Internacional de Agricultura Tropical, Annual report. CIAT, Cali

Rubas D, (2004). Technology Adoption: Who is likely to adopt and how does the timing affect the benefits? Dissertation, Texas A&M University

Schneider UA (2002) The Cost of Agricultural Carbon Savings. CARD Working Paper 02-WP 306. Iowa State University. Available via DIALOG. http://www.econ.iastate.edu/research/webpapers/-paper_2118.pdf. Cited 15 May 2005

Subarudi, Djaenudin D, Cacho O (2003) Growth and carbon sequestration potential of plantation forestry in Indonesia. Carbon working paper CC08. The University of New England. . Available via DIALOG. <http://www.une.edu.au/carbon/CC08.PDF>. Cited 8 Dec 2005

Tschakert P (2004) The costs of soil carbon sequestration: an economic analysis for small-scale farming systems in Senegal. *Agric. Systems* 81 (3): 227-253

UNFCCC (2006) Methodologies for CDM project activities. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/-PAmethodologies>. Cited 8 Feb 2006

Anexo

Tabla A1. Uso de la tierra-Rotaciones con proyecto

Año	Sabana Nativa (100ha)	Rotación Pastos - Cultivos Lote 1 (150ha)	Rotación Pastos - Cultivos Lote 2 (150ha)	A. Mangium (100ha)
0	SN	M – S	GM	AM
1	SN	M – S	GM	AM
2	SN	M – S	GM	AM
3	SN	M – S	GM	AM
4	SN	M – S	GM	AM
5	SN	M – S	GM	AM
6	SN	GM	M – S	AM
7	SN	GM	M – S	AM (tala)
8	SN	GM	M – S	AM
9	SN	GM	M – S	AM
10	SN	GM	M – S	AM
11	SN	GM	M – S	AM
12	SN	M – S	GM	AM
13	SN	M – S	GM	AM
14	SN	M – S	GM	AM (tala)
15	SN	M – S	GM	AM
16	SN	M – S	GM	AM
17	SN	M – S	GM	AM
18	SN	GM	M – S	AM
19	SN	GM	M – S	AM
20	SN	GM	M – S	AM
21	SN	GM	M – S	AM (tala)
22	SN	GM	M – S	AM
23	SN	GM	M – S	AM
24	SN	M – S	GM	AM
25	SN	M – S	GM	AM
26	SN	M – S	GM	AM
27	SN	M – S	GM	AM
28	SN	M – S	GM	AM (tala)

SN: Sabana nativa; GM: Gramínea Mejorada (Mulato); M: Maíz; S: Soya; AM: *Acacia Mangium*

Tabla A2. Productividad de Madera y C secuestrado

Año	Volumen comercial (m3 Madera/ha)	Biomasa capturada (Mg C/ha)	Incremento anual en Biomasa (Mg C/ha)
0	0.00	0.00	
1	0.48	0.19	0.19
2	7.10	2.89	2.69
3	25.42	10.33	7.44
4	52.42	21.30	10.97
5	81.81	33.24	11.94
6	108.83	44.22	10.98
7	131.29	53.35	9.13

Fuente: Cálculos propios con base en las funciones de crecimiento de Subarudi, Djaenudin D., & Cacho, O. (2003).

Tabla A3. Carbonización y Costo de la Carbonización

Producción de CV (ton/ha) ^a	5.8
Producción de C en CV(ton/ha)	4.93
Precio de CV (US\$/ton) ^b	100
Costo Carbonización sin mano de obra (US\$/ha)	78
Jornales en carbonización (jornales/ha/año)	60

Fuente: ^a Cálculos propios con base en las funciones de crecimiento de Subarudi, Djaenudin D., & Cacho, O. (2003) y los rendimientos en carbonización establecidos por Okimory et al. 2003 y FAO (1983); ^b FAO (2006). Dólares corrientes de 2005.

Tabla A4. Productividad por Cultivo

Cultivo	ton/ha sin CV	ton/ha con CV	Incremento (%)
Maíz	4.9	5.6	15
Soya	2.5	3.3	30
G. Mejoradas	54	56.7	5

Fuente: Rondón, M., Molina, D., Hurtado, M., Ramírez, J.A., Amézquita, E., Major, J. & Lehmann J. (2005).

Tabla A5. Aplicación de CV

Aplicación de Carbón (ton CV/ha)	7.73
Hectáreas por cada Aplicación (US\$/ha)	75
	8.72
Jornales en aplicación de CV (jornales por ha)	0.42

Fuente; Cálculo propios con base en Subarudi et al. (2003) y Rondón et al. (2005). Dólares corrientes de 2005.

Tabla A6. Precio de los Productos

Producto	Precio
Cultivos ^{a,b}	
Maíz (US\$ /ton)	213
Soya (US\$ /ton)	341
Ganadería ^c	
Vacas en producción (US\$/kg en pie)	1.28
Toros (US\$/kg en pie)	1.30
Terneros 0 – 1 año (US\$/kg en pie)	0.73
Novillas de reemplazo (US\$/kg en pie)	1.11
Vacas de desecho (US\$/kg en pie)	0.63
Leche (US\$/Kg)	0.18
Forestales	
Acacia Mangium ^d (m ³ de madera talada)	70
Secuestro de Carbono	
REC ^e (US\$/ton CO ₂ eq) ^f	5
Tasa de descuento (%)	2

Fuentes: ^a Rivas et al. (2005); ^b Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004); ^c Holmann et al. (2003); ^d CORPOICA (2005); ^e Reducción de emisiones de certificadas; ^f Lecocq, F. & Capoor, K. (2005). Dólares corrientes de 2005.

Tabla A7. Costos de Producción sin mano de obra

Cultivos ^{a,b}	Costo
Maíz (US\$/ha)	939
Soya (US\$/ha)	453
Ganadería ^c	
Establecimiento Pasto Mulato (US\$/ha)	513
UGG ^d (US\$)	421
Costo de Prod Diferentes de MO (US\$ /UGG)	70
Forestales ^e	
Establecimiento (US\$/ha)	920
Costos Mantenimiento y Tala Forestales	
Año 1 US\$/ha	340
Año 2 US\$/ha	340
Año 3 US\$/ha	82
Año 4 US\$/ha	82
Año 5 US\$/ha	82
Año 6 US\$/ha	82
Año 7 US\$/ha	1400

Fuente: ^a Rivas et al. (2005); ^b Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004) - no se están considerando costos adicionales por el establecimiento de los cultivos sobre los lotes en los cuales antes se encontraba el pasto mulato, estudios futuros deben considerar este rubro -; ^c Holmann et al. (2003); ^d Unidad gran ganado de 500 Kg. ^e CORPOICA (2005). Dólares corrientes de 2005.

Tabla A8. Mano de Obra Empleada

Costo Jornal para la región (US\$) ^{a, b}	5.13
Cultivos	
Maíz (Jornales/ha/cosecha)	9
Soya (Jornales/ha/cosecha)	9
Ganadería	
Establecimiento pasto mulato ^a	8
Jornales/UGG/año ^c	13
Forestales ^d	
Establecimiento <i>Acacia Mangium</i> (Jornales/ha/año)	15
Mantenimiento y tala de bosque	
Año 1 (Jornales/ha/año)	6
Año 2 (Jornales/ha/año)	6
Año 3 (Jornales/ha/año)	6
Año 4 (Jornales/ha/año)	6
Año 5 (Jornales/ha/año)	6
Año 6 (Jornales/ha/año)	6
Año 7 (Jornales/ha/año)	17

Fuente: ^a Rivas et al. (2005); ^b Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004); ^c Holmann et al. (2003); ^d CORPOICA (2005); Dólares corrientes de 2005.

Tabla A9. Distribuciones de probabilidad. Análisis de Riesgo y sensibilidad

Parámetro	Descripción		
	<i>Media</i>	<i>Desviación estándar</i>	
<i>Con distribución normal</i>			
Producción de Maíz ^a	4,9	0,7	
Producción de Soya ^a	2,5	0,31	
Incremento en Maíz por CV ^b	0,15	0,02	
Incremento en Maíz por CV ^b	0,3	0,03	
Precio de Maíz ^c	213	45	
Precio de Soya ^c	341	47	
Valor del Jornal ^d	5,13	0,51	
<i>Con distribución triangular</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Valor más probable</i>	<i>Máximo</i>
Precio de Madera ^e	40	70	100
Precio de REC ^f	7,15	18,93	26,21
Precio de CV ^g	80	100	120
Tasa de interés ^h	0,015	0,020	0,025

Fuente: ^a Rivas et al. (2005); ^b Rondón et al. (2005); ^c Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004); ^d Holmann et al. (2003); ^e CORPOICA (2005); ^f Lecocq, F. & Capoor, K. (2005); ^g FAO (2006); ^h Banco de la República (2006). Dólares corrientes de 2005.

Tabla A.10. Intervalos de confianza al 95% para los diferentes escenarios.

Escenario	VPN más probable	Intervalo de Confianza (95%)		Desviación estándar
		Límite inferior	Límite superior	
Bio-Carbonización	\$ 3,759,357	\$ 1,494,937	\$ 6,215,956	\$ 1,211,535
Carbonización	\$ 3,395,202	\$ 1,235,531	\$ 5,721,057	\$ 1,150,327
Forestal	\$ 3,339,439	\$ 1,190,788	\$ 5,668,439	\$ 1,149,166
Sin Proyecto	\$ 2,361,136	-\$ 201,784	\$ 5,212,964	\$ 1,396,081

Fuente. Cálculos propios. Dólares corrientes de 2005

