

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA “*BIO-CARBONIZACIÓN*” COMO PRÁCTICA DE MANEJO AGRÍCOLA¹

Juan Andrés Ramírez Orozco²

Mayo de 2006

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 VPN 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: Secuestro de carbono, servicios ambientales, análisis costo-beneficio, agricultura sostenible, altillanura colombiana.

Clasificación JEL: Q12, Q56

¹ Artículo presentado para optar al título de Magíster en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales de la Universidad de los Andes.

² Gracias a Marcela y Samuel, son mi inspiración y motivación. Ramón Rosales, quién asesoró este trabajo, fue siempre muy generoso con su tiempo y conocimientos, por lo que merece mi más sincera gratitud. Marco Rondón y Diego Luis Molina, del Centro Internacional de Agricultura Tropical, colaboraron continuamente con sus opiniones y me facilitaron la información recolectada en sus experimentos. Agradezco también a Jorge Higinio Maldonado por sus comentarios y apoyo constante. Raúl Castro y Luís Alfonso Coronado, actuaron como jurados de tesis y sus comentarios han sido un complemento importante para este documento. Finalmente, agradezco al convenio BID-CAF-Universidad de los Andes por el soporte económico durante la elaboración de la maestría.

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)³, 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). Dentro de las prácticas agrícolas usadas actualmente se encuentran la labranza mínima, los cultivos de cobertura, el uso de fertilizantes orgánicos, el manejo de la irrigación y los sistemas agroforestales. Recientemente se ha propuesto una metodología para evaluar las prácticas para la captura de CO₂ en ecosistemas terrestres (Post et al., 2004), que incluye los siguientes componentes: *i*) Identificación de las prácticas con potencial para la captura de carbono en suelo; *ii*) Comprensión de los mecanismos de acción de la práctica; *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 una práctica agrícola conocida como “*Bio-Carbonización*”, para establecer su viabilidad

³ 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.

financiera para la captura de carbono como MOS, al tiempo que se aumenta la productividad del suelo, es precisamente el objetivo de esta investigación.

La práctica de *Bio-Carbonización*⁴ consiste en la incorporación al suelo de material orgánico carbonizado o parcialmente carbonizado (carbón vegetal). 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 MOS⁵, alta capacidad de retención de nutrientes, alto valor de pH y alta capacidad de retención de humedad (Lehmann, Kern, Glaser & Woods, 2003a).

Los esfuerzos realizados para reproducir la práctica han encontrado que la aplicación de carbón vegetal (CV) incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo y de esta forma su capacidad para retener nutrientes (Lehmann, da Silva, Steiner & Nehls, 2003b). Aún más, aporta nutrientes adicionales como potasio y zinc (Glaser, Lehmann & Zech, 2002) y puede aumentar el pH hasta en dos unidades (Lehmann & Rondón, 2005). La disponibilidad de nutrientes y el incremento del pH además de aumentar los rendimientos de los cultivos, abre la posibilidad para la implementación nuevos cultivos que antes no estaban disponibles en determinadas regiones.

La principal ventaja del CV esta dada por su estabilidad química lo que permite que tanto el efecto de captura de carbono como el de mejoramiento de la calidad de suelo persistan por un tiempo prolongado, alcanzado como en el caso de los puntos identificados en el Amazonas varias centurias. 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. Sin embargo, cuando el carbono se encuentra en forma de carbón vegetal, menos del 1% es susceptible a

⁴ 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.

⁵ 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).

descomposición, y en este sentido se ha identificado que la fracción orgánica más antigua del suelo esta compuesta por carbón vegetal (Pessenda, Gouveida & Aravena, 2001).

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 alternativas⁶. 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 ocho. Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones.

⁶ Okimori et al. (2003), sobresale como una excepción.

2. Objetivos

2.1. General

Establecer la viabilidad financiera de la práctica de manejo agrícola “*Bio-Carbonización*”, que consiste en el secuestro de carbono en suelo mediante la incorporación de biomasa carbonizada como enmienda en suelos agrícolas.

2.2. Específicos

- 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.
- Realizar un análisis costo beneficio, 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.
- Usar los resultados de la evaluación financiera para hacer un estudio de programación lineal, que permita simular las decisiones tomadas por los cultivadores y estimar el potencial de captura de CO₂ a largo plazo suponiendo una extensión de tierra definida, ubicada en los Llanos Orientales de Colombia.
- Comparar la práctica *Bio-carbonización* con otras de secuestro de carbono o reducción de emisiones para determinar su competitividad como alternativa de mitigación del cambio climático.

3. Hipótesis

La aplicación de carbón vegetal al suelo es una alternativa financieramente viable y económicamente recomendable, que simultáneamente permite la captura de carbono (por periodos de tiempo más largos que cualquier otra práctica conocida) y mejora la sostenibilidad agrícola mediante el incremento de la calidad del suelo.

4. Revisión de la literatura

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 sostenibilidad⁷ 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.

Dentro de los beneficios públicos generados por la captura de carbono en el suelo se destaca la reducción de CO₂ atmosférico. El IPCC (2001) señala, por ejemplo, que desde el inicio de la revolución industrial hasta 1999, la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado de 280 ppmv a 367 ppmv, principalmente por el uso de combustibles fósiles ($6.3 \pm 0.4 \text{ Pg C año}^{-1}$ ⁽⁸⁾) y el cambio en el uso de la tierra ($1.6 \pm 0.8 \text{ Pg C año}^{-1}$). 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). Esto hace evidente que el uso de prácticas agrícolas que disminuyan las pérdidas de MOS o incluso sean capaces de aumentarla, conducirán a la captura efectiva de carbono al tiempo que aumentan la sostenibilidad agrícola del suelo.

⁷ Sostenibilidad entendida como la capacidad de mantener un nivel de producción por un número de periodos apreciable dentro de la escala humana.

⁸ Peta gramos (1×10^{15} gramos). La transferencia antropogénica neta ha sido estimada en 3.2 Pg año^{-1} (IPCC, 2001).

Cole (1997) ha estimado que mediante técnicas de manejo agrícola la cantidad de carbono capturado por el suelo puede incrementarse, en un intervalo comprendido entre 0.44 a 0.88 Pg 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.

Las opciones agrícolas para la captura de carbono como MOS son analizadas por Lal (2003) y por Post et al. (2004). Entre ellas se incluyen la labranza mínima, los cultivos de cobertura, el uso de abonos orgánicos, el manejo de la irrigación y los sistemas agroforestales. Una alternativa es la práctica *Bio-Carbonización*, que en términos generales consiste en la aplicación al suelo de biomasa carbonizada (carbón vegetal) a manera de enmienda. Esta práctica constituye el eje central de este trabajo. En esta sección se revisarán los beneficios relacionados con la práctica *Bio-Carbonización* así como las características que la diferencian con relación a otras formas de captura de carbono en suelo.

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 públicos⁹. 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

⁹ 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).

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. Con relación al CV, en cambio, se ha determinado que es la fracción orgánica del suelo con mayor estabilidad y que puede permanecer en él por varios miles de años (Glaser et al., 2002). Los estudio 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, 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 muy 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, 2002). Aunque Lehmann & Rondón (2005) señalan que dosis de 250 ton C ha⁻¹ no reducen la productividad del cultivo, los niveles de aplicación deben ser determinados para cada región específica. 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 carbono¹⁰, 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)¹¹. 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*. La labranza en la agricultura permite que el suelo sea más vulnerable a procesos de erosión. De esta forma, proyectos que tienen como objetivo reducir las emisiones de carbono mediante el uso de prácticas de manejo de labranza mínima, adicionalmente reducirán el efecto negativo de la erosión sobre la calidad del suelo. Pimentel et al. (1995) demuestran que la reducción en la erosión posee un importante valor económico. Aunque no se cuenta con mediciones del efecto que la adición de CV al suelo tiene sobre la erosión, es posible asociar un beneficio similar al generado por el incremento en la MOS, cuando se usan prácticas de reducción en la labranza.

La reducción en la erosión está relacionada con otro *co-beneficio* del incremento de la materia orgánica en el suelo: el mejoramiento en la calidad del agua. Es ampliamente

¹⁰ 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.

¹¹ Estos gases tienen un mayor poder radiativo 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).

conocido que la erosión está directamente relacionada con la turbidez en el agua. Además, la materia orgánica en el suelo, como se discutirá a continuación, mejora la eficiencia en el uso de fertilizantes inorgánicos al aumentar la capacidad del suelo para retenerlos, lo que previene su lixiviación hacia el subsuelo o aguas subterráneas.

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). Este efecto se explica por la capacidad que tiene la materia orgánica para retener nutrientes y agua en el suelo. La capacidad de intercambio catiónico está relacionada directamente con el contenido de materia orgánica en el suelo, y es un indicador de la capacidad que tiene el suelo para atrapar nutrientes y liberarlos de forma controlada para el aprovechamiento de las plantas. Los suelos en las regiones tropicales se caracterizan por tener una baja capacidad de retención de nutrientes, derivada su composición química y de su bajo contenido de MOS. En estos suelos los nutrientes aplicados se lavan rápidamente y son conducidos a zonas que no son 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). Así por ejemplo, la producción de cultivos como el caupí (*vigna unguiculata*) se amplió en un 100% con relación al control, en suelos de la amazonia brasilera (Ferrasoles Xánticos), mediante la aplicación de carbón vegetal (135 ton ha^{-1}) (Glaser et al., 2002). De otro lado, Lehmann et al. (2003b) demuestran que la aplicación de CV (67.6 ton ha^{-1}) junto con fertilizantes, mejora el desempeño de estos últimos, aumentando la productividad en 42% para un cultivo de caupí en suelos amazónicos. Los experimentos adelantados por CIAT en los Llanos Orientales de Colombia, también han revelado el aumento en la productividad como consecuencia de la aplicación de CV. Estos resultados se discutirán más adelante en este documento.

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.

5. Marco Teórico

Como se señaló en la sección anterior, el incremento de la materia orgánica en el suelo genera beneficios públicos y privados¹². A pesar de las ventajas asociadas con el incremento de la materia orgánica en el suelo, se ha señalado que las asignaciones de esta variable se encuentran por debajo de su óptimo económico (Izac, 1997). Desde el punto de vista privado existen limitantes que impiden la asignación eficiente del nivel MOS. En primer lugar, aunque el agricultor puede percibir claramente los costos causados por el cambio de una práctica convencional a una práctica alternativa que acumule C en el suelo, los beneficios generados desde el punto de vista privado (y el mismo cambio en el contenido de C) no son fáciles de cuantificar. Adicionalmente, los flujos positivos producidos por el incremento de MOS comúnmente se encuentran rezagados varios periodos. Esto hace que un agente con tasas de descuento elevadas no valore adecuadamente los beneficios en el futuro y opte por prácticas que conducen a bajas concentraciones de MOS.

Por otro lado, los beneficios públicos derivados del aumento del contenido de carbono en el suelo constituyen una externalidad positiva, y como tal no pueden ser asignados de manera eficiente sin acudir a mecanismos que modifiquen los incentivos, de modo que los costos marginales sociales y los beneficios marginales sociales del aumento en el contenido de MOS, sean iguales. Lo anterior implica la necesidad de compensar a los agricultores por adoptar este tipo de prácticas.

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

¹² El marco teórico se desarrolla con base en el incremento de MOS de forma general, sin importar la práctica utilizada para dicho incremento. Se harán aclaraciones con relación a la práctica de Bio-Carbonización cuando la discusión así lo requiera.

a la práctica s . Una alternativa es el pago por unidad de carbono capturada, en donde la condición para la realización de un contrato es que $\frac{h^{is}}{\Delta c^{is}} < P$, donde Δc^{is} es la cantidad de carbono capturada en cada periodo, $\frac{h^{is}}{\Delta c^{is}}$ es el costo de oportunidad por tonelada por cada periodo y P es el precio por tonelada de C capturada. Antle & McCarl (2002) encuentran que el primer esquema es más costoso, puesto que no considera la heterogeneidad en costo de oportunidad por tonelada. Esta heterogeneidad se deriva del hecho que tanto la productividad (que en últimas define el costo de oportunidad) como la capacidad para capturar carbono son función de las propiedades biológicas y geoquímicas del suelo.

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 inicial 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 siguiente expresión:

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

donde $D_t = (1/(1+r))^t$ y r es la tasa de interés anual; $NR(p_t, w_t, z_t, s)$ 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 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 de 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. Otra posibilidad está relacionada con el uso de prácticas en las cuales el carbón tiene alta recalcitrancia, como la práctica de *Bio-Carbonización*.

Los modelos revisados en esta sección logran demostrar que para lograr un incremento en la captura de carbono es necesario realizar un pago al agricultor que compense su costo de oportunidad por tonelada. Igualmente, es claro que el pago por unidad de calidad ambiental, en este caso toneladas de carbono, es una mejor opción que el pago por el simple cambio de la práctica; no obstante los costos de monitoreo serían significativamente mayores (Antle & McCarl, 2002). En este sentido cabe resaltar que, de acuerdo con los modelos teóricos, las ventajas de la práctica *Bio-Carbonización*, señaladas en la sección anterior, cobran mayor importancia. 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.

6. Marco Metodológico

Schneider (2002) revisa las metodologías usadas para estimar los costos implicados en la adopción de prácticas capaces de capturar carbono. Estas incluyen: establecer presupuesto a escala de fincas, métodos econométricos, control óptimo, programación matemática - que pueden variar desde un escenario lineal y estático, hasta uno no lineal y dinámico -, análisis de equilibrio general computable y la combinación de los anteriores.

A pesar de estos esfuerzos, Tschakert (2004) señala que han sido pocos los estudios que logran especificar los costos y los beneficios de las prácticas de manejo antes señaladas y su efecto económico en los cultivadores locales. De acuerdo con el marco teórico y la revisión de las metodologías para estimar los costos de captura de carbono, 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, lo cual se ha realizado de forma parcial en las secciones anteriores.
- ii) Realizar un análisis costo beneficio, 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 base¹³, suponiendo que la práctica se aplica en una finca tipo en los Llanos Orientales de Colombia. Como parte del análisis costo beneficio y usando simulación de Montecarlo¹⁴, se realizará un análisis de riesgo y sensibilidad con base en la varianza de los diferentes parámetros utilizados y se establecerá el efecto que el cambio en estos tiene sobre el VPN de los escenarios planteados.

¹³ La línea base incluye rotación de cultivos y pastos, y se definirá de forma detallada en la siguiente sección.

¹⁴ Los análisis de riesgo y sensibilidad se realizarán usando el programa Crystal Ball.

- iii) Optimización, mediante programación lineal (PL), de las decisiones tomadas por los cultivadores y estimación del potencial de captura de carbono en el largo plazo. Este análisis amplía los supuestos sobre el uso de la tierra, considerados en el análisis costo beneficio, y específicamente permite encontrar las asignaciones óptimas del agricultor sobre la implementación de la práctica.
- iv) Comparar la práctica *Bio-Carbonización* con otras de secuestro de carbono o reducción de emisiones para determinar 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, porque permite realizar análisis a escala de finca y no requiere un volumen importante de datos derivados de la previa adopción de la práctica¹⁵.

7. Información Utilizada

Con el objetivo de analizar la viabilidad y la rentabilidad de la práctica de *Bio-carbonización*, y dentro de la estrategia propuesta en la sección anterior, se debe llevar a cabo un análisis ex-ante costo beneficio. Es un análisis a escala de finca construido con base en 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 residuo¹⁶. 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

¹⁵ Hazell & Norton (1986), revisan la aplicación de PL, específicamente aplicada a problemas agrícolas.

¹⁶ Lehmann et al. (2006), han propuesto diferentes escenarios para la mitigación de emisiones en los cuales la *Bio-carbonización* puede ser utilizada.

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 a continuación:

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

NB_{BC} es el beneficio neto de la práctica de *Bio-carbonización* en el periodo t ¹⁷. 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 pastos¹⁸; 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 ($P_{cultivo}$):

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

¹⁷ 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.

¹⁸ Los pastos incluidos en este análisis son *Brachiaria* mejorada (cv. Toledo o Mulato).

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 carbono¹⁹, y se calculan de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$B_{Mad} = A_{Forest} \cdot v \cdot p_v \quad (4)$$

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

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 agricultor²⁰ decida adoptar la práctica de *Bio-carbonización*, el valor presente de los beneficios netos debe ser positivo. En consecuencia para que la práctica sea viable desde el punto de vista financiero se debe cumplir la siguiente condición:

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

¹⁹ Este incentivo puede ser variado de acuerdo a diferentes escenarios.

²⁰ Dentro del contexto de este trabajo, el agricultor puede ser considerado como uno o varios agentes que actúan como propietarios de la finca tipo.

En este análisis no se tienen en cuenta costos de transacción, monitoreo, entrenamiento y verificación. En el Anexo número uno se especifica la información usada; 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. La información más relevante se explicará 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 ha²¹ y en la cual se enfrentan los costos y beneficios de un agricultor promedio de la región. El escenario propuesto para el análisis costo beneficio de la *Bio-carbonización*, implica que en dicha finca, se destine una porción de tierra (estimada en un 20%²²), para la plantación de *A. Mangium* y la superficie restante se mantenga con la rotación definida como línea base.

La Tabla No 2 del Anexo 1 muestra un esquema del uso de la tierra de acuerdo con la práctica propuesta, para un periodo de análisis de 28 años. En este esquema es posible observar que el productor asigna una porción de tierra al cultivo de *A. Mangium*, mientras que mantiene la porción restante ocupada entre la rotación de cultivos de línea base y la sabana nativa. La cantidad de sabana nativa que se mantiene depende de la dotación de capital. Igualmente, algunos estudios recomiendan mantener una porción de sabana nativa como una zona de amortiguación dentro de la finca (Amézquita et al., 2001). Para el análisis costo beneficio, 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 nativa²³ y 80% rotación pasturas-cultivos.

²¹ 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 compradas al IGAC). Las consideraciones realizadas en este trabajo no limitan el número personas que actúen como propietarios de la finca tipo.

²² 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.

²³ 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.

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) (Ecuación No. 7)²⁴ y una tasa anual de descuento del 2%²⁵, es de siete años²⁶. Dentro de la práctica se supone que la biomasa considerada residuo²⁷ 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) (Ecuación No. 7), al cabo de los siete años el volumen de madera comercializable (v_T) es de 131.29 m³ ha⁻¹ (Tabla No.3 del Anexo 1).

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

A partir de este valor, la Ecuación No. 8 permite encontrar que la cantidad de carbono secuestrada (b_t), para t igual a siete años, es 53.35 ton C ha⁻¹⁽²⁸⁾ (Tabla No.3 del Anexo 1). La Ecuación 8 toma en cuenta que la densidad de la madera, en base seca, es 0.53 ton m⁻³ (Subarudi et al., 2003), que el 50 por ciento de la madera es carbono elemental (Brown, 1997), que tan solo el 75% del volumen de biomasa área es comercializable (Okimori et al., 2003)²⁹ y que la cantidad de carbono acumulada en las raíces es el 15 por ciento (Subarudi et al., 2003).

²⁴ 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).

²⁵ 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.

²⁶ 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 4 del Anexo 1.

²⁷ Como residuo se considera todo el material aéreo cuyo diámetro sea inferior a 8 cm.

²⁸ Este valor corresponde a una tasa de captura promedio anual de 7.62 Ton C ha⁻¹

²⁹ Como se dijo anteriormente CORPOICA (2005), señala al menos el 30% de una plantación forestal puede ser considerada como residuo.

$$b_t = \left[\frac{0.5 \cdot 0.53 \cdot v_t}{0.75} \right] \cdot 1.15 \quad (8)$$

Esta información permite calcular los flujos de dinero derivados específicamente de la implementación de la plantación forestal. Estos flujos serán calculados de acuerdo con el esquema de servicios temporales, planteado Cacho et al. (2003) para plantaciones forestales que prestan servicios de captura de carbono:

$$VPN_T = v_T \cdot p_v \cdot (1+r)^{-T} + \sum_{t=0}^T [\Delta b_t \cdot p_b \cdot (1+r)^{-t}] - c_E - \beta \cdot b_T \cdot p_b \cdot (1+r)^{-T} \quad (9)$$

en donde VPN_T es el Valor Presente Neto recibido por el productor por hectárea, por concepto de la plantación forestal. Como se indicó antes el turno óptimo T es igual a siete años. El primer término corresponde a la venta de madera comercializable, en donde v_T es el volumen de madera comercializable en el año T , p_v es el precio de la misma y r es la tasa de descuento. Los pagos por captura de carbono se realizan al final de cada año, de acuerdo con el incremento en el contenido de carbono (Δb_t) y el precio por tonelada de carbono capturada p_b . El costo de establecimiento de la plantación es representado por c_E . Los valores usados para cada uno de estos parámetros se especifican en las Tablas números 3 a 6 del Anexo 1. Una vez se tala el bosque, los dineros recibidos por concepto de estos servicios ambientales deben ser redimidos, lo cual es capturado por el último término de la Ecuación No. 9. El factor β en este término, indica si es o no necesario redimir todos los créditos y depende exclusivamente del contrato que suscriban los compradores de créditos y el productor agrícola. Para el escenario planteado β se hace igual a uno.

De acuerdo con lo expuesto hasta el momento, cuando se considera la práctica de *Bio-carbonización*, la ecuación 9 debe ser modificada 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 expuso 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 $23.20 \text{ ton ha}^{-1}$, es decir $11.60 \text{ ton C ha}^{-1}$. 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 C^{30} (Tabla No. 7 del Anexo 1). La transformación de una forma de biomasa con bajo contenido de C, altamente susceptible a la descomposición³¹ y que es considerada residuo, en una estructura que es mayoritariamente C, que, como se explicó en la revisión de literatura, 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 tambores³² 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. Mangium*, 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

³⁰ El carbón vegetal está formado en un 85% por carbón elemental. Asimismo, 5.14 Ton de C, equivalen a 18.85 ton de CO₂eq.

³¹ De acuerdo con Okimori et al. (2003), la tasa anual de descomposición de la biomasa dejada en campo abierto es superior al 50%

³² 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 quemara 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.

periodo, de forma que solo se necesitarían 39 unidades, es decir 780 tambores y 78 operadores (Tabla No. 7 del Anexo 1).

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 año³³, 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, respectivamente³⁴. 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 tres diferentes dosis de CV en experimentos a escala invernadero. Se encontró, por ejemplo, que una dosis de 5 toneladas de CV por hectárea conduce a un incremento en la producción de grano de 2.86 g a 4.01 g, por planta, es decir, la aplicación de esta dosis de CV 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 No. 8 del Anexo 1. 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

³³ 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.

³⁴ Las causas que explican el efecto de la aplicación de carbón vegetal sobre la producción fueron expuestas en la revisión de la literatura.

aplicadas en los experimentos de CIAT. De esta forma, cada turno generaría el carbón vegetal necesario para su aplicación en 75 hectáreas (Tabla No. 9 del Anexo 1).

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 (ver Tabla No. 2 del Anexo 1), y la tasa de interés utilizada³⁵, se presentan en la Tabla No. 4 del Anexo 1. Los costos de producción de los sistemas de considerados y los requerimientos de mano de obra, se presentan en las Tablas números 5 y 6 del Anexo 1, 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 No. 10 del Anexo 1. Estos valores serán insumos necesarios en el análisis de riesgo y sensibilidad.

8. Discusión de Resultados

8.1. Evaluación Financiera

De acuerdo con la discusión realizada, además del escenario con *Bio-carbonización*, es necesario comparar la línea base 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* -³⁶. Como se explicó antes, el criterio de análisis será el Valor Presente Neto (VPN) 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 No. 1.

³⁵ Esta tasa fue fijada de acuerdo con la DTF promedio de 2005, en términos reales (Banco de la República, 2006).

³⁶ 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.

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* (ver Tabla No. 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 No. 1, permiten observar este comportamiento: los flujos derivados de la *Bio-carbonización* superan los de estos escenarios, en un 15.42% y 17.77%, respectivamente. La tasa interna de retorno para el incremento, en la última columna de la Tabla No. 1, también permite observar que la *Bio-carbonización* es más rentable que las alternativas de *Carbonización* y *Forestales*.

Tabla 1. Resumen de resultados de la evaluación financiera.

<i>Práctica</i>	<i>VPN</i>	<i>VPN/ha</i>	<i>VPN del Incremento</i>	<i>VPN del Incremento/ha</i>	<i>Incremento %</i>	<i>TIR del Incremental</i>
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 No. 2 para información detallada. n.a.: no aplica. Dórales de 2005.

Una vez se ha generado el carbón vegetal incorporarlo al suelo, en lugar de venderlo³⁷, 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.

³⁷ 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 (ver Tabla No. 7 del Anexo 1).

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 (ver Tabla No. 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.

De igual manera, cuando el precio de las reducciones de emisiones certificadas (REC) se hace cero, el VPN del incremental de la *Bio-carbonización* con respecto a la línea base disminuye hasta US\$ 1,365,320. Esto implica que tan solo el 2,34% del VPN de este incremental corresponde a pagos por servicios de captura de carbono - es decir que, aún sin REC el proyecto continúa siendo bastante viable desde el punto de vista financiero -. Por otro lado, cuando el efecto de la aplicación del CV sobre la productividad se hace cero, el VPN del incremental se reduce hasta US\$ 927,787, es decir que el aporte al VPN del incremental por este concepto asciende al 33,64%.

Para el caso del *Forestal*, el resultado es parecido, al eliminar los pagos por captura de carbono el VPN del incremental con respecto a la línea base disminuye en 1.02%. Esto implica que, para los precios actuales de las reducciones de emisiones certificadas - alrededor de US\$ 5 por ton CO₂ equivalente (Lecocq & Capoor, 2005) -, el pago por secuestro de carbono no debe ser un factor determinante en la decisión del agricultor de iniciar o no una plantación forestal. Sin embargo, el peso que tienen estos servicios ambientales depende del esquema de pagos acordado entre el comprador y el agricultor. Por ejemplo, si el factor β en la Ecuación No. 9 se hace igual a cero y en consecuencia no se deben redimir los certificados una vez se tala el bosque, los aportes que tienen los pagos por captura de carbono aumentan, y pasan a ser 7.75% y 8.07% del VPN para los escenarios de *Bio-carbonización* y *Forestal*, respectivamente. La *Bio-carbonización* es

menos sensible al cambio en β , porque, a pesar de secuestrar un mayor volumen de carbono, la porción que se captura mediante la aplicación de carbón vegetal al suelo es considerada inerte y cuando se usa este mecanismo no es necesario redimir los certificados pagados por secuestro de carbono.

Una alternativa en la implementación de la *Bio-carbonización*, es mantener el nivel de producción y reducir el uso en los insumos agrícolas³⁸. 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 (ver Tabla No.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, fue posible calcular las elasticidades para algunos de los parámetros que se consideran tienen mayor interés en términos de la implementación de la *Bio-carbonización*. Los parámetros incluyen los precios de los cultivos, la madera y los certificados de reducción de emisiones. Igualmente, se tiene en cuenta el rendimiento de los cultivos y en el efecto de la aplicación de CV sobre los mismos. Los cálculos fueron realizados usando la función Tornado del programa Crystal Ball. Los datos contenidos en la Tabla No. 2 implican, por ejemplo, que todos los escenarios son elásticos con respecto al precio y la producción del maíz. El VPN del escenario *Sin proyecto* presenta la mayor elasticidad con respecto al precio del maíz, un cambio del 1% en el precio del maíz produce un incremento del 2.02% en el VPN. Para la *Bio-carbonización* este valor es del 1.12%. En este caso, un menor efecto del precio se ve compensado por el incremento en la

³⁸ 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.

producción de maíz, considerada para la *Bio-carbonización*. Teniendo en cuenta que para el nivel de aplicación de CV se estima un incremento del 15% en la producción se espera que el VPN, por este concepto, aumente en el 16.8%.

Como se señaló anteriormente el efecto de los pagos por servicios ambientales es mínimo. En todos los escenarios donde se consideran pagos por captura de carbono, el VPN es inelástico con relación al precio del REC. Estos valores varían entre 0.01 y 0.02 para los escenarios *Forestal* y *Bio-carbonización*, respectivamente.

Para la tasa de interés las elasticidades varían entre -0.25 y -0.30 (ver Tabla No. 2). A pesar de que para todos los escenarios el VPN es inelástico con respecto a la tasa de interés, el escenario con mayor elasticidad respecto a este parámetro es la *Bio-carbonización*. La tasa de interés tiene una mayor influencia en la medida que los rendimientos se obtengan en el mediano o largo plazo, y en consecuencia se observa que el escenario *Sin proyecto* es el que presenta una menor respuesta frente a un cambio en la tasa de interés.

Tabla 2. Elasticidades del Valor Presente Neto – Evaluación Financiera

Parámetro	Elasticidades Valor presente neto.			
	Sin proyecto	Forestal	Carbonización	Biocarbonización
Precio Maíz (US\$/ton)	2,02	1,20	1,18	1,12
Precio Soya US\$/ton	1,65	0,98	0,96	0,96
Precio Madera (USD\$/m3)	n.a.	0,75	0,74	0,68
REC (USD/tonC)	n.a.	0,01	0,01	0,02
Precio CV (USD/ton)	n.a.	n.a.	0,05	0,00
Tasa de Interés	-0,25	-0,29	-0,29	-0,30
Prod. Maíz	1,27	1,25	1,18	1,12
Prod. Soya	1,03	1,01	0,96	0,96
Incremento en Maíz por CV	0,00	0,00	0,00	0,07
Incremento en Soya por CV	0,00	0,00	0,00	0,04

Fuente: Cálculos propios, función Tornado del programa Crystal Ball. n.a.: no aplica

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% (ver Tabla No. 3). 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 (ver Tabla No. 3). 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 años, la demanda por mano de obra será suavizada, lo que se traduciría en un incremento neto sobre su demanda.

Tabla 3. Uso de mano de obra total.

Práctica	Uso promedio de mano de Obra (jornales/año)	Uso mínimo de mano de Obra (jornales/año)	Uso máximo de mano de Obra (jornales/año)
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

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.

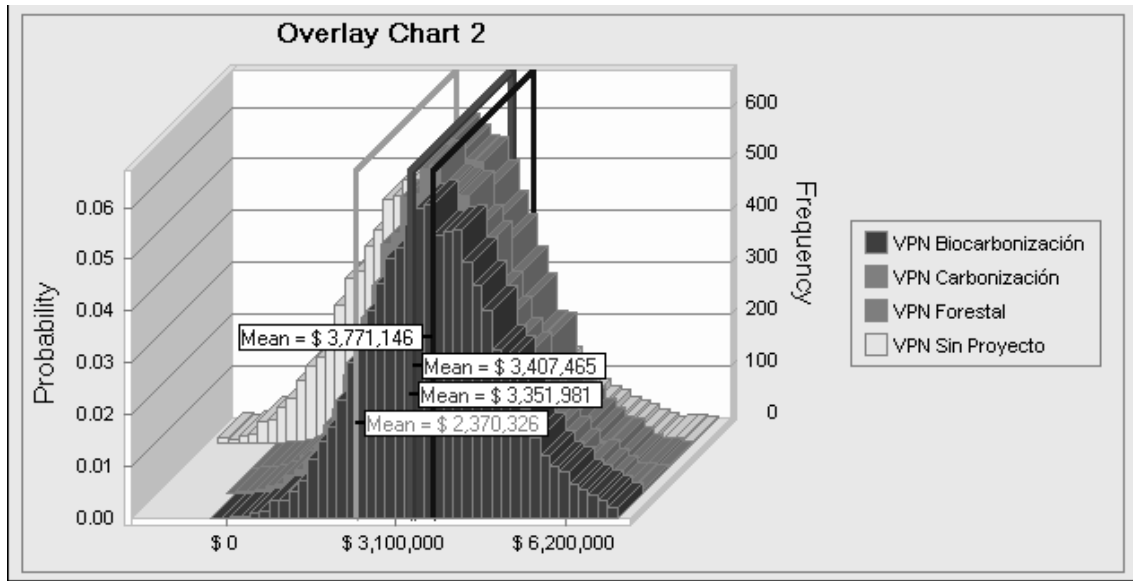
Finalmente, es necesario considerar que durante la carbonización también se generan externalidades negativas que deben ser cuantificadas y prevenidas. Los métodos tradicionales de carbonización, por ejemplo, generan lixiviados orgánicos, con un alto grado de toxicidad. Usar canecas metálicas, como se propone en este trabajo, reduce significativamente estas emisiones pues permite recuperar con mayor facilidad los productos condensados durante la carbonización³⁹. 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.

8.1.3. Análisis de riesgo y sensibilidad evaluación financiera

Para realizar el análisis de riesgo y sensibilidad se utiliza una simulación de Montecarlo, con base en las distribuciones de probabilidad definidas para algunas de los parámetros, de acuerdo con lo señalado en la Tabla No. 10 del Anexo 1. Estos parámetros fueron seleccionados teniendo en cuenta el impacto que tienen sobre el VPN (ver Tabla No. 2) y la relevancia que tienen para la práctica *Bio-carbonización*. El resultado obtenido de la simulación es el VPN más probable y su distribución de probabilidad, en cada uno de los escenarios, los cuales son generados por la combinación de la varianza en los parámetros. La Gráfica No. 1 muestra estos resultados.

³⁹ 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 (ver Tabla No. 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 No. 1 del Anexo 3. 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\$ -201784. 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 (ver Tabla No. 1 del Anexo 3).

Por sensibilidad se entiende el porcentaje de la variabilidad en una función objetivo, en este caso el VPN, causado por la varianza en un parámetro específico. Con base en lo anterior, el precio del maíz es, para todos los escenarios, el parámetro que genera mayor variación. En el escenario *Sin proyecto*, la variación en el precio del maíz explica el 51.4.8% de la varianza en el VPN, siendo el escenario donde el precio del maíz presenta mayor contribución a la varianza. Para la *Bio-carbonización*, en cambio el precio del maíz

presenta el menor impacto sobre la varianza, y su contribución a la varianza total es de 40.5% (ver Gráfico No. 1 del Anexo 3). Estos resultados son consistentes con los discutidos para las elasticidades en la sección anterior.

El efecto de la variabilidad de la tasa de interés sobre la varianza del VPN, cambia radicalmente dependiendo del escenario considerado. Para el escenario con *Bio-carbonización* este efecto alcanza un valor máximo del 1.3% (en términos absolutos), mientras que para el escenario *Sin proyecto* solo representa el 0.3%. Esto quiere decir que un mayor nivel de incertidumbre sobre las tasas de interés genera un mayor nivel de riesgo para los escenarios con plantaciones forestales. Este comportamiento era predecible pues los rendimientos en los escenarios que involucran plantaciones forestales se obtienen en un mediano plazo.

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 (ver Gráfico No. 1 del Anexo 3).

8.2. Programación Lineal

La PL permite encontrar las decisiones óptimas del agricultor desde el punto de vista financiero⁴⁰. Este análisis se hace a partir de las matrices 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 No. 4. Adicionalmente, la estructura de la matriz de pagos de la finca incluye la información biológica y económica especificada en el Anexo 1. 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.

⁴⁰ El análisis de programación lineal fue realizado usando la función Solver de Excel.

Tabla 4. 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 No. 4, 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 No 5 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 No. 5). 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 (ver Tabla No. 5). 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\$468.453⁴¹ 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 5. 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. Ver Anexo 4 para información detallada. Dólares de 2005.

Las decisiones incluidas en la solución Valor final 3 (Tabla No. 5), 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%.

⁴¹ Dólares corrientes de 2005

8.3. Consideraciones sobre política

La evaluación financiera reveló que la adopción de la *Bio-carbonización* es un escenario viable para la altillanura colombiana, cuando se compara con las explotaciones agrícolas y ganaderas que se adelantan actualmente. Sin embargo, el escenario forestal también lo es - incluso sin pagos por servicios ambientales -, y aún así no adquiere una dinámica importante en la región y el país en general. De acuerdo con el Ministro de Agricultura, Andrés Felipe Arias (2005), Colombia cuenta con alrededor de 25 millones de hectáreas aptas para la reforestación comercial, sin embargo, sólo existen 189,000 hectáreas con plantaciones forestales comerciales.

Rubas (2004) realiza una revisión de todos los factores que afectan positivamente la adopción de una nueva tecnología por parte de un agricultor, que pueden ser clasificados en:

- i) Características de los productores: Ingreso, educación, experiencia e indicadores de atracción por el riesgo.
- ii) Características de la Finca: Tamaño, gastos en investigación y desarrollo, contar con derechos de propiedad definidos y estar localizado cerca de otros productores que hayan adoptado nuevas tecnologías.
- iii) Características de la tecnología: Rentabilidad, certeza sobre los resultados y tener la posibilidad de adopciones parciales y reversibles.

Es decir que para la adopción de la *Bio-carbonización*, no es suficiente contar con una práctica viable desde el punto de vista financiero - esta es solo una de las condiciones que afecta de forma positiva la decisión del agricultor -, además de la viabilidad financiera es necesario evaluar los factores que limitan la adopción de estas prácticas y emprender políticas que permitan que la práctica sea adoptada y adicionalmente sea sostenible en el tiempo.

Como primera medida es evidente que existe deficiencia y asimetría de información: La *Bio-carbonización* todavía requiere mayor investigación sobre sus

implicaciones en largo plazo y una mayor difusión entre los agricultores. Esto último se puede lograr mediante experimentos que involucren de forma activa a los agricultores que pueden convertirse en los beneficiarios finales de la práctica.

Otros incentivos, los cuales forman parte de la estrategia diseñada por el Gobierno Nacional para promover las plantaciones forestales, incluyen mejorar la infraestructura, crear una normatividad clara para el sector y conceder subsidios que reduzcan las necesidades de dinero durante el establecimiento y mantenimiento de las plantaciones forestales. El Certificado de Incentivo Forestal, es el subsidio creado por el gobierno para este fin. Sin embargo, el presupuesto para este incentivo ha sido bastante discreto. En 2005, por ejemplo, los recursos apropiados para estos certificados fueron de \$6.500 millones de pesos, lo cual es un valor ínfimo cuando se compara con los subsidios entregados a otros reglones agrícolas.

Según Antle y McCarl (2003), la forma más eficiente de suministrar los incentivos relacionados con el secuestro de carbono en el suelo es mediante el pago por tonelada de carbono. En este sentido, un planificador central también podría incrementar el pago proveniente de la venta de REC como un incentivo para la aplicación de la Bio-carbonización y en general la implementación de iniciativas forestales.

Además de las iniciativas expuestas, adelantar conjuntamente cultivos transitorios y explotaciones ganaderas con las plantaciones forestales, permite generar flujos continuos de dinero y como se ha demostrado, la *Bio-carbonización* refuerza este efecto en la medida que mejora la calidad del suelo y aumenta la productividad y sostenibilidad de la explotación agropecuaria.

En cualquier caso, los resultados obtenidos permiten que un planificador central conozca la magnitud de los beneficios asociados con la práctica y con base en esta información diseñe los incentivos necesarios para que la *Bio-carbonización* sea sostenible. El valor de este incentivo no debe superar los beneficios financieros establecidos en las secciones anteriores y además debe asegurar que el VPN del incremento en los beneficios

derivados de la aplicación de la *Bio-carbonización*, una vez sean consideradas las externalidades negativas que limitan la aplicación de la práctica, sea mayor que cero.

9. Conclusiones

La información experimental recopilada sobre la *Bio-carbonización*, permitió definir los beneficios privados y públicos propios 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. La viabilidad 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 generado por el incremento en la productividad del suelo. Este comportamiento puede cambiar en la medida que cambien los precios de los REC 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.

Cuando no se imponen restricciones sobre el capital disponible, el máximo beneficio se obtiene cuando la totalidad de la finca se establece como una plantación forestal y los residuos son carbonizados para su comercialización. Sin embargo, las restricciones sobre capital y la necesidad de retornos en el corto plazo hacen que el agricultor descarte este escenario y decida mantener una porción de su finca bajo la rotación de pastos y cultivos. Las soluciones óptimas encontradas usando programación lineal, demostraron que cuando el agricultor cuenta con una fracción de suelo bajo la

rotación pastos-cultivos, aplicará sobre ellas CV, adoptando la *Bio-carbonización* en el 100% del área destinada a esta rotación.

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.

10. 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.

A pesar de presentarse como un sector con un gran potencial productivo, las plantaciones forestales no cuentan con una dinámica consolidada. Es necesario adelantar

estudios que permitan identificar claramente las razones que han retardado este sector y conduzcan al diseño de una normatividad adecuada, que además de las consideraciones financieras, tenga en cuenta los costos económicos y sociales relacionados con este tipo de prácticas.

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.

11. Bibliografía

- Amézquita, E., Thomas, R. J., Rao, I. M., Molina, D. L. & Hoyos, P. (2001). The influence of pastures on soil physical characteristics of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (in review).
- Antle, J.M., & McCarl, B. (2002). The Economics of Carbon Sequestration. En T. Tientenberg & H. Folmer (Eds.). *The International YearBook of Environmental and Resource Economics 2002-2003* (pp. 279-310). Cheltenham, UK y Northampton, MA, U.S.: Edward Elgar Publishing.
- Antle, J.M., & Diagona, B. (2003). Creating Incentives for the Adoption of Sustainable Agricultural Practices in Developing Countries: The Role of Soil Carbon Sequestration. *American Journal of Agricultural Economics*, 85 (5), 1178-1184
- Arias, A.F. (2005). Ley forestal: Urgente Necesidad. Últimos artículos. Recuperado el 15 de Noviembre de 2005, del sitio Web del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: <http://www.minagricultura.gov.co/media/74842879.pdf>
- Banco de la República (2006). Base de datos del sector financiero. Recuperado el 28 de febrero de 2006 de <http://www.banrep.gov.co/economia/ctanal1sfin.htm>.
- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2002). *The Nature and Properties of Soils (13a Ed)*. Upper Saddle River, N.J., U.S.: Prentice Hall.
- Brown, S., (1997). Estimating biomass and biomass change in tropical forests: A primer, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.

- Cacho, O., Wise R. & K. MacDicken (2003). *Carbon monitoring costs and their effect on incentives to sequester carbon through forestry*. Carbon working paper CC08, Recuperado el 8 de Noviembre de 2005, del sitio Web de The University of New England: <http://www.une.edu.au/carbon/wpapers.php>
- Cole, C.V. (1997). Global Estimates of Potential mitigation of green house gases emissions by agriculture. *Nutrient Cycling and Agroecosystems*, 49 (1), 221-228
- Conrad, J.M. (1999). *Resource Economics*. New York, U.S.: Cambridge University Press
- 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*. Villavicencio, Colombia: CI La Libertad
- FAO (1983). Simple Technologies for Charcoal Production. Recuperado el 15 de septiembre de 2005, del Sitio Web de la FAO: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/X5328S/X5328S00.htm
- FAO (2006). FAOSTAT. Recuperado el 25 de abril de 2006 de <http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&hasbulk=0&subset=forestry>
- 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. *Biology and Fertility of Soils*, 35 (1), 219-230
- Hazell, P.B.R., & Norton, R. (1986). *Mathematical Programming For Economic Analysis In Agriculture*. N.J., U.S.: McMillan Publishing Co.
- Holmann et al. (2003) *Evolución de los Sistemas de Producción de Leche en el Trópico Latinoamericano y su interrelación con los Mercados*, CIAT. Recuperado el 17 de marzo de 2006, del sitio Web del CIAT: <http://www.ciat.cgiar.org/webciat/tropileche/articulos.pdf>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate Change: The Scientific Bases*. Cambridge U.K.: Cambridge Univ. Press.
- Izac, A. M. N. (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. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22 (2), 151-184

- Lecocq, F. & Capoor, K. (2005). Situación y tendencias del mercado de carbono 2005. Banco Mundial. Washington DC, USA.
- Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B. & Woods, W.I. (2003a). *Amazonian dark earth: Origin, properties, management*. Amsterdam, Holanda: Kluwer Academic Publishers.
- Lehmann, J., da Silva Jr., J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. & Glaser, B. (2003b). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249 (2), 343-357
- Lehmann, J., Rondón M. (2005). Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. En: Uphoff N., et al. (ed.) *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems* (517-530). Boca Raton, FL: CRC Press
- Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. (2006)., Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Recuperado el 19 de enero de 2006, de [DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5](https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5)
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2004). *Anuario Estadístico del Sector Agropecuario*. Bogotá, Colombia.
- Okimori, Y., Ogawa, M. & Takahashi, F. (2003). Potential of CO₂ Emissions Reductions by Carbonizing Biomass Waste From Industrial Tree Plantation in South Sumatra, Indonesia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 8 (3), 261-280.
- Pessenda, L.C.R., Gouveia, S.E.M. & 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., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Jastrow, J.D., McCarl, B.A., Amonette, J.E., Bailey, V. L., Jardine P.M., West, T.O., & Zhou, J. (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. *Climatic Change*, 54 (4), 471–495.
- Rivas, L., Holmann, F., & Garcia, J. A. (2005). Nuevos Sistemas Diversificados de Producción Agropecuaria, Incluyendo Componentes y Servicios Ambientales: Una Evaluación Económica en la Altillanura Colombiana. Manuscrito no publicado. CIAT, Cali, Colombia.

- Rondón, M., Ramírez, J.A., Amézquita, E., & Lehmann, J. (2003). *Effect of charcoal applications on crop/forage yield and fluxes of greenhouse gasses under glasshouse conditions*. CIAT, Annual report, Cali, Colombia.
- Rondón, M., Molina, D., Huratado, M., Ramírez, J.A., Amézquita, E., Major, J. & Lehmann J. (2005). Enhancing the productivity of crops and grasses through bio-char amendments to unfertile tropical soils. CIAT, Annual report, Cali, Colombia.
- Rubas, D., (2004). Technology Adoption: Who is likely to adopt and how does the timing affect the benefits? Tesis de Doctorado, Texas A&M University, Galvestone, USA. Recuperado el 25 de Abril de 2005, de <https://txspace.tamu.edu/bitstream/1969.1/1252/1/etd-tamu-2004B-AGEC-Rubas-2.pdf>
- Schneider, U.A. (2002). The Cost of Agricultural Carbon Savings. CARD Working Paper 02-WP 306, Iowa State University. Recuperado el 15 de mayo de 2005, del sitio Web de Iowa State University: <http://www.card.iastate.edu>
- Subarudi, Djaenudin D., & Cacho, O. (2003). *Growth and carbon sequestration potential of plantation forestry in Indonesia*. Carbon working paper CC08, UNE. Recuperado el 8 de diciembre de 2005, del sitio Web de The University of New England: <http://www.une.edu.au/carbon/wpapers.php>
- Tschakert, P. (2004). The costs of soil carbon sequestration: an economic analysis for small-scale farming systems in Senegal. *Agricultural Systems*, 81 (3), 227-253
- UNFCCC. (2006). Methodologies for CDM project activities. Recuperado el 8 de febrero de 2006 de: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies>.

Anexo 1. Información Utilizada

Tabla 1, Anexo 1. Cultivos en la rotación

Cultivo 1	Maíz
Cultivo 2	Soya
Forraje 1	Mulato
Bosque Plantado	<i>Acacia Mangium</i>
Disponibilidad de Tierra (ha)	400

Tabla 2, Anexo 1. 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; M: Maíz; S: Soya; AM: *Acacia Mangium*

Tabla 3, Anexo 1. 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 4, Anexo 1. 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
Termeros 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 5, Anexo 1. 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 6, Anexo 1. 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
Jomales/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 7, Anexo 1. 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
Jomales en carbonización (jomales/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 8, Anexo 1. 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 9, Anexo 1. Aplicación de CV

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

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

Tabla 10, Anexo 1. 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.

Anexo 2. Matriz de flujos financieros

	Tasa de Interés		0,02		Factor de descuento		0,98					
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	27	28		
Costo Cultivos	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	\$ 208,800	
Costo Pastos	\$ 76,950						\$ 76,950					
Costo Ganadería	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 23,041	\$ 24,139	\$ 24,139		
Compra de Ganado												
Costo Forestal	\$ 92,000	\$ 34,000	\$ 34,000	\$ 8,200	\$ 8,200	\$ 8,200	\$ 8,200	\$ 232,000	\$ 8,200	\$ 140,000		
Costo Redimir Créditos								\$ 97,788		\$ 97,788		
Costo Prod. CV								\$ 7,800		\$ 7,800		
Costo Aplic. CV								\$ 872		\$ 872		
MO Cultivos	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700		
MO Pastos	1200							1200				
MO Ganadería	4279	4279	4279	4279	4279	4279	4279	4279	4483	4483		
MO Forestal	1500	613	613	613	613	613	613	3187	613	1687		
MO Prod. CV								6000		6000		
MO Aplic. CV								42				
Beneficios Cultivos	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	\$ 61,925	
Beneficios incremento en cultivos								\$ 18,119	\$ 30,956	\$ 30,956		
Beneficios Ganadería	\$ -50,355	\$ 32,751	\$ 32,751	\$ 32,751	\$ 32,751	\$ 32,751	\$ -50,355	\$ 32,751	\$ 30,606	\$ 30,606		
Beneficios incremento en ganadería									\$ 3,706	\$ 3,706		
Beneficios Madera	\$ -99,695	\$ -37,146	\$ -37,146	\$ -11,346	\$ -11,346	\$ -11,346	\$ -11,346	\$ 670,704	\$ -11,346	\$ 770,399		
Beneficios Secuestro Carbono	0	356	4,936	13,640	20,115	21,888	20,126	\$ -72,023	\$ 20,126	\$ -81,060		
Beneficios venta de CV								\$ -38,580		\$ 19,420		
Venta de Ganado	\$ 44,018											
Suma Beneficios	\$ -44,107	\$ 57,885	\$ 62,465	\$ 96,969	\$ 103,445	\$ 105,217	\$ 20,349	\$ 672,896	\$ 135,972	\$ 835,952		
VP de los beneficios	\$ -44,107	\$ 56,750	\$ 60,039	\$ 91,376	\$ 95,567	\$ 95,299	\$ 18,069	\$ 585,796	\$ 79,661	\$ 480,149		
									VPN	\$ 3,756,195		

Fuente: Cálculos Propios. Valores constantes a 2005. Las rotaciones se repiten de manera similar entre los años 7 y 27 por lo cual no se amplía esta información.

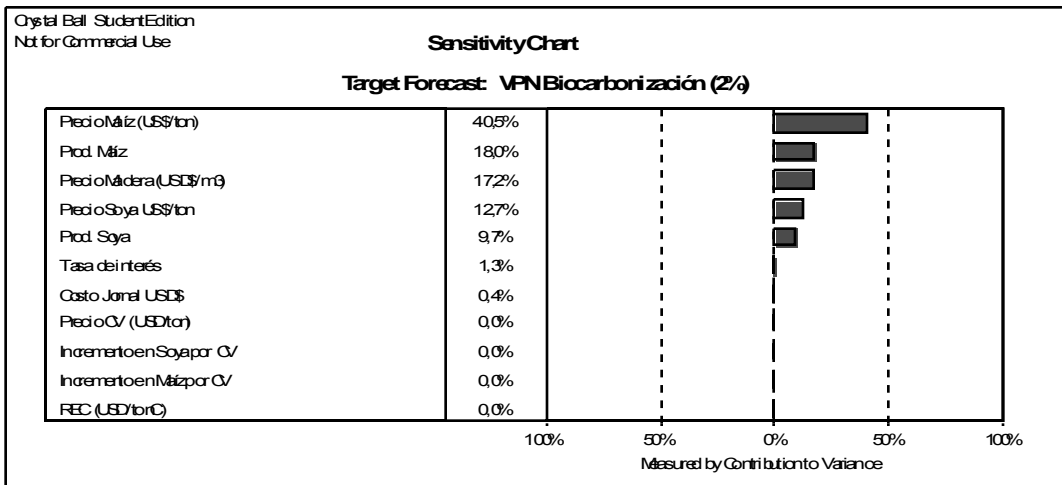
Anexo 3. Análisis de Riesgo y Sensibilidad

Tabla 1. 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

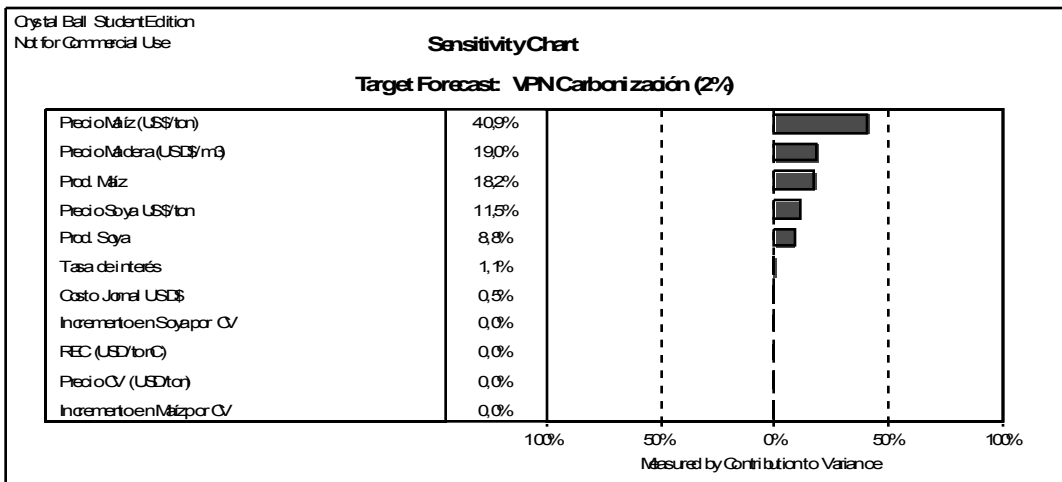
Fuente. Cálculos propios. Dólares corrientes de 2005

Gráfico 1. Análisis de Sensibilidad *Bio-carbonización*.



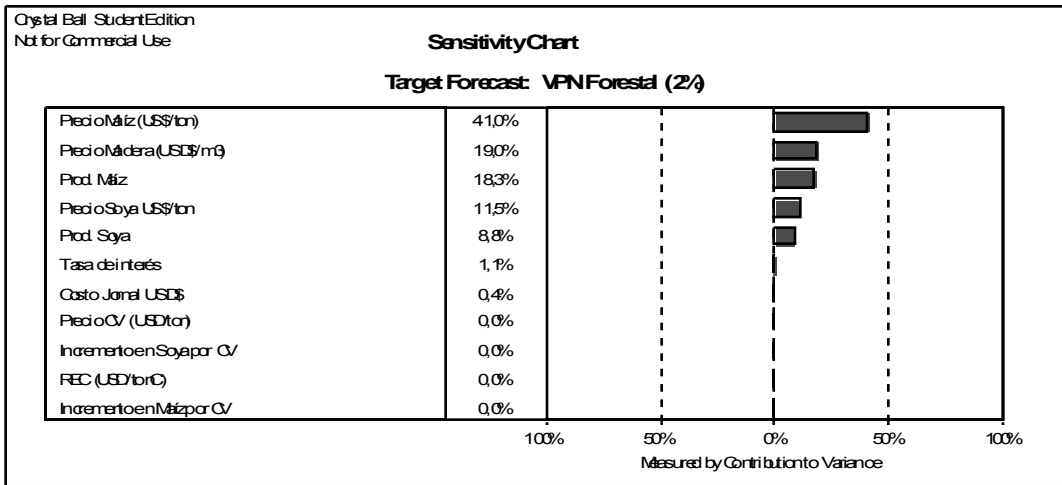
Fuente: Cálculo propios.

Gráfico 2. Análisis de Sensibilidad *Carbonización*.



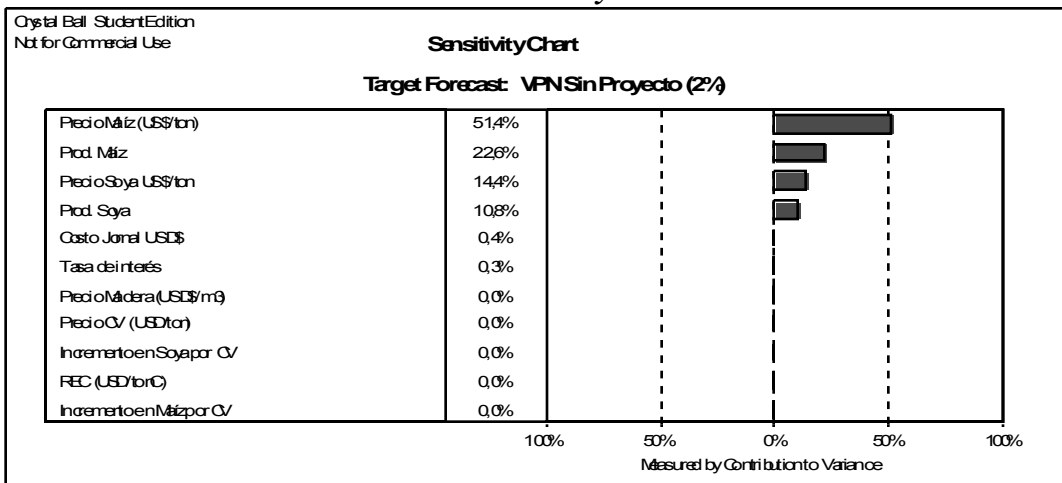
Fuente: Cálculo propios.

Gráfico 3. Análisis de Sensibilidad Forestal.



Fuente: Cálculo propios.

Gráfico 4. Análisis de Sensibilidad Sin Proyecto.



Fuente: Cálculo propios.