

# Mitigación del cambio climático con biomasa: potenciales técnicos y factores que afectan su implementación

Mitigation of Climate Change with Biomass: Technical Potentials and Factors Affecting Implementation



**Dr. James Amonette**

Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA  
jim.amonette@pnnl.gov

**Dr. Dominic Woolf,**

Cornell University, Ithaca, NY

**Dr. F. Alayne Street-Perrott,**

Swansea University, Swansea, UK

**Dr. Johannes Lehmann**

Cornell University, Ithaca, NY

**Dr. Stephen Joseph**

University of New South Wales, Sydney, AU

## Palabras CLAVE

Biocarbón, carbón vegetal, biomasa, mitigación del cambio climático, pirólisis, bioenergía  
Biochar, bioenergy, biomass, mitigation of climate change, pyrolysis, bioenergy

Editado por Fedepalma a partir de la grabación de video y la presentación en power point.

## Resumen

La producción de carbón vegetal formado por la pirólisis de biomasa y su almacenamiento en los suelos, se han sugerido como un medio de disminuir el cambio climático por el secuestro de carbono, mientras que simultáneamente proporciona la energía y el aumento de rendimiento de los cultivos. Sin embargo, existe un alto grado de incertidumbre en relación con el impacto, la capacidad y la sostenibilidad del biocarbón a nivel global. En este trabajo se estima el potencial técnico máximo sostenible del biocarbón para mitigar el cambio climático. En la primera parte de este trabajo una estimación recientemente publicada del máximo potencial técnico sostenible de biochar (Woolf *et al.*, 2010, Nature Communications 1:56) se repasa. Esta estimación sugiere anuales netas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano y el óxido nitroso podrían reducirse en un máximo de 1,8 Pg  $\text{CO}_2\text{-C}$  equivalente ( $\text{CO}_2\text{-C}_e$ ) por año (12% de las actuales emisiones de dióxido de carbono causadas por el ser humano), y del total de las emisiones netas alrededor de 130 Pg  $\text{CO}_2\text{-C}_e$  durante un siglo, sin poner en peligro la seguridad alimentaria, el hábitat o la conservación del suelo. El biocarbón tiene un alto potencial de mitigación del cambio climático frente a la combustión de la biomasa para la bioenergía, excepto cuando los suelos fértiles se modifican mientras el carbón es el combustible que



se compensa. En la segunda parte de este trabajo, un análisis preliminar de la economía de biochar respecto a los de la bioenergía en sistemas de cultivo de maíz se presenta, junto con una estimación del máximo potencial económico sostenible. El análisis económico sugiere que bioenergía es más rentable que el biochar en el corto plazo en suelos muy pobres y en suelos muy fértiles. Biochar, mientras que finalmente más rentable que la bioenergía cultivo de maíz en todos pero los suelos más fértiles, es un poco menor retorno sobre la inversión para los primeros 20 a 30 años y es más rentable cuando se aplica a los suelos de fertilidad moderada. Restringir el potencial técnico asumiendo biochar sólo es económico en suelos de fertilidad moderada sugiere que el máximo potencial económico sostenible es de alrededor de la mitad del potencial técnico correspondiente. Inclusión de créditos de carbono a US\$ 200/Mg de CO<sub>2</sub>-C equivalente acorta el tiempo de recuperación de sólo unos pocos años, pero se esperaría que la aplicación de biochar en sistemas de cultivo del valor alto o formas muy tramadas ceda períodos de retorno mucho más cortos.

## Abstract

Production of biochar formed by pyrolysis of biomass, and its storage in soils have been suggested as a means of abating climate change by sequestering carbon, while simultaneously providing energy and increasing crop yields. Substantial uncertainties exist, however, regarding the impact, capacity and sustainability of biochar at the global level. In the first part of this paper a recently published estimate of the maximum sustainable technical potential of biochar (Woolf et al., 2010, Nature Communications 1:56) is reviewed. This estimate suggests that annual In this paper it is estimated the maximum sustainable technical potential of biochar to mitigate climate change annual net emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane and nitrous oxide could be reduced by a maximum of 1.8 Pg CO<sub>2</sub>-C equivalent (CO<sub>2</sub>-Ce) per year (12% of current anthropogenic CO<sub>2</sub>-Ce emissions; 1 Pg=1 Gt), and total net emissions over the course of a century by 130 Pg CO<sub>2</sub>-Ce, without endangering food security, habitat or soil conservation. Biochar has a larger climate-change mitigation potential than combustion of the same sustainably procured biomass for bioenergy, except when fertile soils are amended while coal is the fuel being offset. In the second part of this paper, a preliminary analysis of the economics of biochar relative to those of bioenergy for a maize cropping system is presented, along with an estimate of the maximum sustainable economic potential. The economic analysis suggests that bioenergy is more profitable than biochar in the short term both on very poor soils and on highly fertile soils. Biochar, while eventually more profitable than bioenergy for maize cropping on all but the most fertile soils, has a slightly lower return on investment for the first 20-30 years and is most profitable when applied to soils of moderate fertility. Constraining the technical potential by assuming biochar is only economic on soils of moderate fertility suggests that the maximum sustainable economic potential is about half of the corresponding technical potential. Inclusion of carbon credits at \$200/Mg CO<sub>2</sub>-C equivalent shortens the payback time by only a few years, but application of biochar in high-value cropping systems or highly engineered forms would be expected to yield much shorter payback periods.





## Introducción

Como se sabe, las plantas absorben dióxido de carbono a medida que crecen, y lo liberan de nuevo en el aire cuando mueren y se descomponen. Todo es parte del ciclo natural del carbono.

Como una forma de mitigar el cambio climático se ha propuesto bloquear esta última parte, quemando las plantas muertas de manera controlada, en una atmósfera de bajo oxígeno, mediante un método llamado “pirólisis”. Así es posible obtener *biochar* (carbón vegetal, biocarbón), que retiene el carbono durante miles de años. Hacerlo es muy fácil, pues la tecnología para ello es simple. La pirólisis se puede realizar en diferentes escalas, desde la industrial hasta la doméstica.

Cuando el biocarbón se añade a ciertos suelos, estos terminan liberando menos metano y óxido nitroso, dos potentes gases de efecto invernadero. Inclusive, puede hacerlos más fértiles y agilizar el crecimiento de los cultivos debido a que el carbón parece prevenir la lixiviación de nutrientes y aumentar la retención de agua.

En otras palabras, el carbón vegetal es un subproducto de la pirólisis de la biomasa, una forma de producción de bioenergía que, además del carbón, produce dos tipos de combustible: gasoil vegetal y syngas<sup>1</sup>, que pueden utilizarse como calefacción y energía o en agrocombustibles de segunda generación.

La producción de carbón vegetal combinada con su almacenamiento en el suelo se ha sugerido como un posible medio de reducir la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico. Su potencial se deriva principalmente de su naturaleza recalcitrante, lo que ralentiza la velocidad a la que se devuelve fotosintéticamente carbono fijado (C) a la atmósfera.

En la Figura 1 se explica el concepto para la producción sostenible de biocarbón. Muestra los insumos, procesos, productos, aplicaciones y efectos sobre el clima global. Dentro de

cada una de estas categorías, las proporciones relativas de los componentes son aproximadas por la altura y el ancho de los campos sombreados.

El CO<sub>2</sub> se elimina de la atmósfera por la fotosíntesis para producir biomasa. Una fracción sostenible de la biomasa total producida cada año, como los residuos agrícolas, cultivos de biomasa y productos agroforestales, se convierte por medio de la pirólisis en biocombustible, gas de síntesis y calor del proceso, junto con un producto sólido: el biocarbón. El biocombustible y el gas de síntesis se queman posteriormente para producir energía y CO<sub>2</sub>. Esta energía y el calor de proceso se utilizan para compensar las emisiones de carbono fósil, mientras que el biocarbón almacena carbono durante un período significativamente más largo de lo que hubiera ocurrido si se dejara que la biomasa original siguiera su rumbo natural.

Además de las compensaciones de energía fósiles y el almacenamiento de carbono, se evitan algunas emisiones de metano y óxido nitroso. Asimismo, la eliminación de CO<sub>2</sub> por la fotosíntesis se mejora cuando se añade biocarbón a los suelos previamente infértiles, lo que proporciona una retroalimentación positiva.

El CO<sub>2</sub> es devuelto a la atmósfera directamente mediante la combustión del biocombustible y del gas de síntesis a través de la lenta decadencia del carbón vegetal en los suelos, y mediante el uso de maquinaria para transportar la biomasa a la planta de pirólisis, y llevar el carbón vegetal desde la misma a su lugar de eliminación e incorporarlo al suelo.

En contraste con la bioenergía, en la que todo el CO<sub>2</sub> que se fija en la biomasa mediante la fotosíntesis se devuelve a la atmósfera tan rápido como se compensan las emisiones de carbono fósil, el biocarbón tiene el potencial para un impacto aún mayor en el clima

1. El syngas o gas de síntesis es una mezcla de gas combustible compuesto principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono, y muy a menudo, algo de dióxido de carbono. Su nombre proviene de su uso como intermediario en la creación de gas natural sintético (sng) y para la producción de amoníaco o metanol. El syngas es combustible y con frecuencia se utiliza como combustible de motores de combustión interna. La biomasa es uno de los métodos utilizados para producirlo.

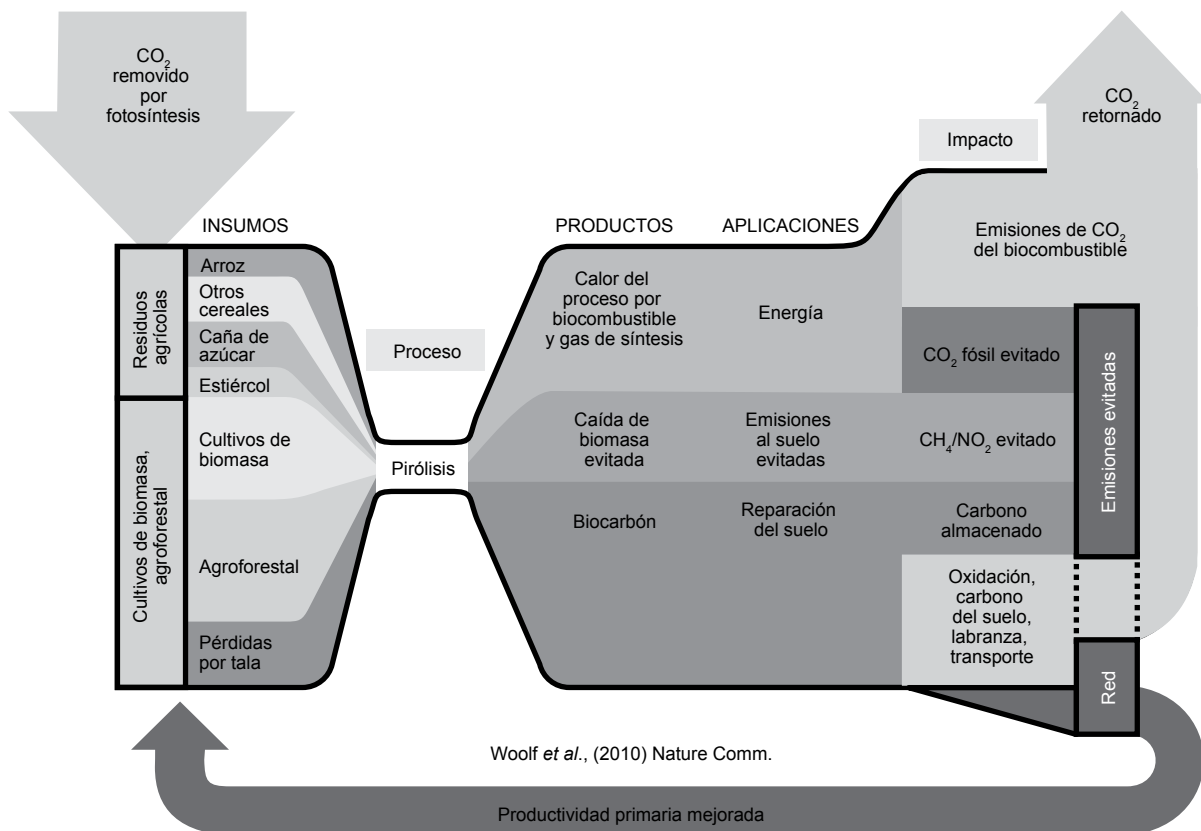


Figura 1. Concepto para la producción de biocarbón/bioenergía sostenible.

mediante la mejora de la productividad de los suelos infértiles y sus efectos sobre los flujos de gases de efecto invernadero del suelo.

### Criterios de sostenibilidad de la biomasa

Lo más difícil de todo el proceso es establecer cómo se puede producir la biomasa de una manera sostenible. De forma tal que se formularon unos criterios de sostenibilidad, cuales son:

- La biomasa debe provenir principalmente de los residuos de la agricultura y la silvicultura.
- Debe haber una mínima deuda de carbono por el cambio en el uso del suelo (10 años máximo de tiempo de amortización,  $<22 \text{ Mg CO}_2\text{-C}_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1}$ ).
- Para la producción de biocarbón no se deben convertir suelos que no hayan sido previamente intervenidos.

- Es deseable que se utilicen tierras de cultivo abandonadas.
- Se requiere el uso de tecnología de pirólisis moderna, de manera que se minimicen el hollín y las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y se capture la energía liberada como calor de proceso, biocombustible y gases inflamables.

### Escenarios de disponibilidad de biomasa que se pueden obtener de manera sostenible

Para su estudio, los investigadores analizaron las fuentes mundiales de biomasa que no han sido todavía intervenidas para producir comida. Como por ejemplo, el suministro de hojas y tallos de maíz, cáscaras de arroz, estiércol y residuos de jardín. Luego calcularon el contenido de carbono de esa biomasa y cuánto de cada fuente podría usarse en realidad para producir carbón vegetal.

**Tabla 1.** Resumen de los escenarios de disponibilidad de biomasa (Woolf *et al.*, 2010).

Materia prima	Disponibilidad de biomasa en el escenario (Pg yr <sup>-1</sup> )					
	Alfa		Beta		MSTP	
	DM	C	DM	C	DM	C
Residuos de cereal, excluyendo arroz	0,17	0,07	0,29	0,13	0,42	0,18
Residuos de arroz	0,52	0,22	0,60	0,25	0,67	0,28
Residuos de caña de azúcar	0,20	0,09	0,24	0,11	0,27	0,13
Estiércol	0,31	0,10	0,45	0,14	0,59	0,19
Cultivos de biomasa	0,63	0,3	0,94	0,60	1,25	0,60
Madera cosechada	0,05	0,03	0,13	0,07	0,21	0,10
Residuos forestales	0,29	0,14	0,29	0,14	0,29	0,14
Agroforestal	0,13	0,06	0,70	0,34	1,28	0,62
Basura verde	0,01	0,004	0,05	0,02	0,07	0,04
<b>Total</b>	<b>2,30</b>	<b>1,00</b>	<b>3,70</b>	<b>1,60</b>	<b>5,10</b>	<b>2,30</b>

Una vez hechos los cálculos, desarrollaron un modelo matemático para tres escenarios posibles de disponibilidad de la biomasa (Tabla 1).

En el primero (llamado alfa) la cantidad máxima posible de biocarbón se estableció mediante el uso de toda la biomasa sostenible disponible, haciendo pocos cambios en relación con las prácticas actuales para obtenerla.

Un segundo escenario (beta) implicaba alguna legislación e incentivos para promover las prácticas de uso sostenible del suelo y reducir la contaminación de los flujos de biomasa.

El tercer escenario que se denomina el máximo potencial técnico sostenible (MSTP), representa el enfoque más agresivo.

En resumen, el escenario máximo requería cambios significativos en la forma como el planeta entero gestiona la biomasa, mientras que el mínimo (alfa) limitaba la producción de biocarbón a usar, residuos de biomasa y otros disponibles, con pocos cambios en las prácticas actuales.

Los escenarios no contemplan los impactos del cambio climático, el crecimiento demográfico, la economía, o las costumbres sociales en la disponibilidad de biomasa. El objetivo general es proporcionar estimados conservadores “transparentes”, en la medida de lo posible.

## Estimaciones de las emisiones evitadas

Así las cosas, se encontró que el máximo escenario podría compensar hasta el equivalente de 1,8 petagramos<sup>2</sup> (Pg) o 1.800 millones de toneladas métricas de carbono emitidas por año, y un total de 130.000 millones de toneladas métricas a lo largo de los primeros 100 años (Figura 2).

Las emisiones evitadas incluyen gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.

Asimismo, se encontró que el biocarbón y los biocombustibles tienen un impacto

2. Un petagramo (1G) es igual a 1.000 millones de toneladas.

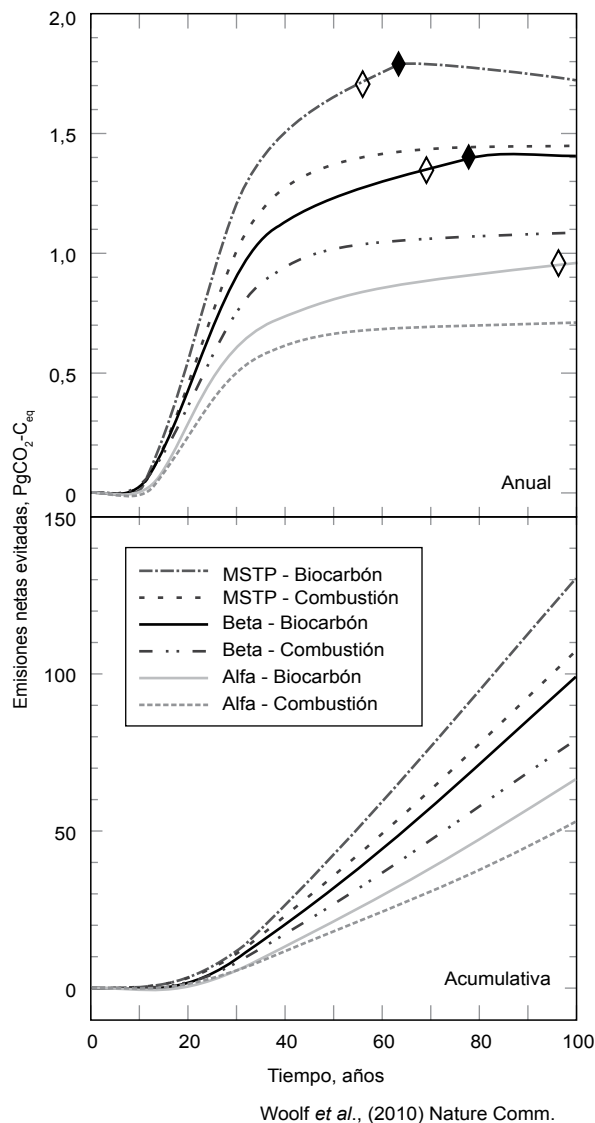


Figura 2. Estimaciones de las emisiones evitadas.

significativo, pero el primero es entre 22 y 27% más eficaz para combatir el cambio climático durante el primer siglo.

El máximo anual estimado de compensación es el 12 por ciento de los 15,4 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero que la actividad humana suma a la atmósfera cada año. Asimismo se calculó que el escenario mínimo podría secuestrar poco menos de 1.000 millones de toneladas métricas anuales y 65.000 millones de toneladas métricas durante el mismo periodo.

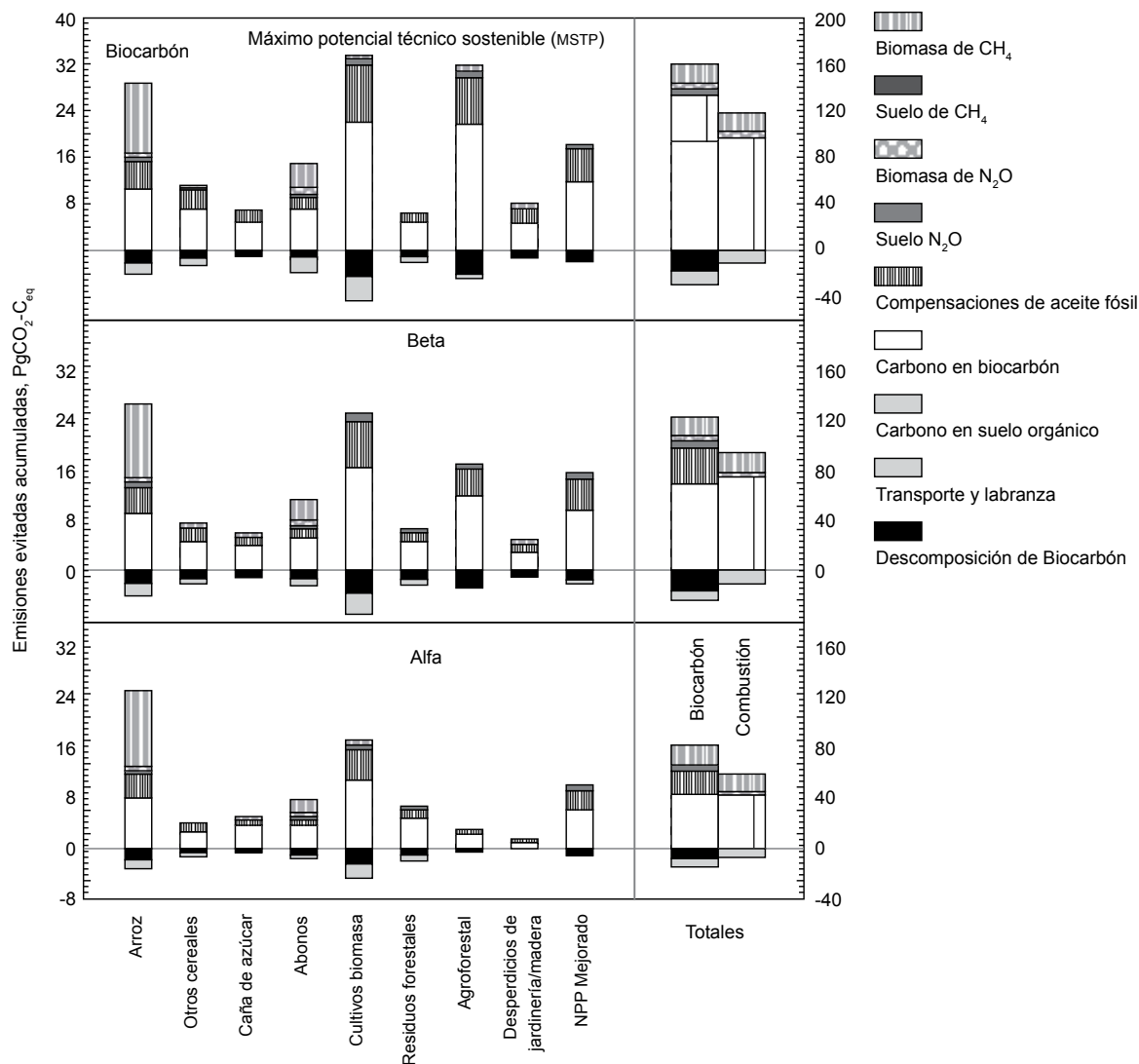
En la Figura 3 se desglosan los resultados, de acuerdo con el tipo de materia prima. De ellos se deduce lo siguiente:

- La principal contribución se obtiene por efecto del almacenamiento de carbono: le siguen las compensaciones de los carbones fósiles y las compensaciones de gases de efecto invernadero.
- Se advierte la descomposición del biocarbón y la disminución de los principales impactos negativos del carbono de los suelos orgánicos.
- Nótese el gran impacto en términos de metano que se registran en el arroz y en el estiércol.
- Los cultivos de biomasa (en tierras degradadas), agroforestería, estiércol, y la productividad primaria mejorada (NPP por su sigla en inglés) cuentan para establecer las principales diferencias entre los escenarios.
- La labranza y el transporte resultan insignificantes.
- Globalmente, se obtiene un menor impacto de mitigación total, pero se logran importantes condiciones locales.

La Figura 4 compara el biocarbón con la combustión, para ver cómo cambian los mecanismos de compensación, y de ello se concluye:

- La principal contribución corresponde a las compensaciones de carbono fósil y a la biomasa impedida de liberar gases de efecto invernadero.
- No hay almacenamiento de carbono, se pierde algo de SOM.
- No se presenta respuesta positiva de la productividad primaria neta mejorada.
- La labranza y el transporte son insignificantes.
- En el ámbito mundial es menor el impacto de la mitigación total, pero las condiciones locales son importantes.

La Figura 5 muestra de manera más simple las diferencias entre el biocarbón y la bioenergía (combustión) en los impactos sobre la mitigación del cambio climático a la intensidad actual del carbono en el suministro de energía.



Woolf *et al.*, (2010) Nature Comm.

**Figura 3.** Desglose de las emisiones evitadas por materia prima y escenario.

Como se ve, el biocarbón almacena carbono, pero con valores más pequeños de compensaciones FF, debido a la menor producción de energía; asimismo, la descomposición del biocarbón es en gran parte compensada por una mayor productividad primaria neta.

### ¿El biocarbón sí paga? Modelo económico

Para establecer si hacer biocarbón es rentable, se estableció un modelo económico simple, que contempló lo siguiente:

Los beneficios o pérdidas del biocarbón se deben a:

- Valor del cultivo
- Incremento en el rendimiento de los cultivos
- Energía producida
- Créditos de carbono por almacenamiento
- Créditos de carbono por el reemplazo del combustible fósil

Menos

- Costo de producción/transporte.

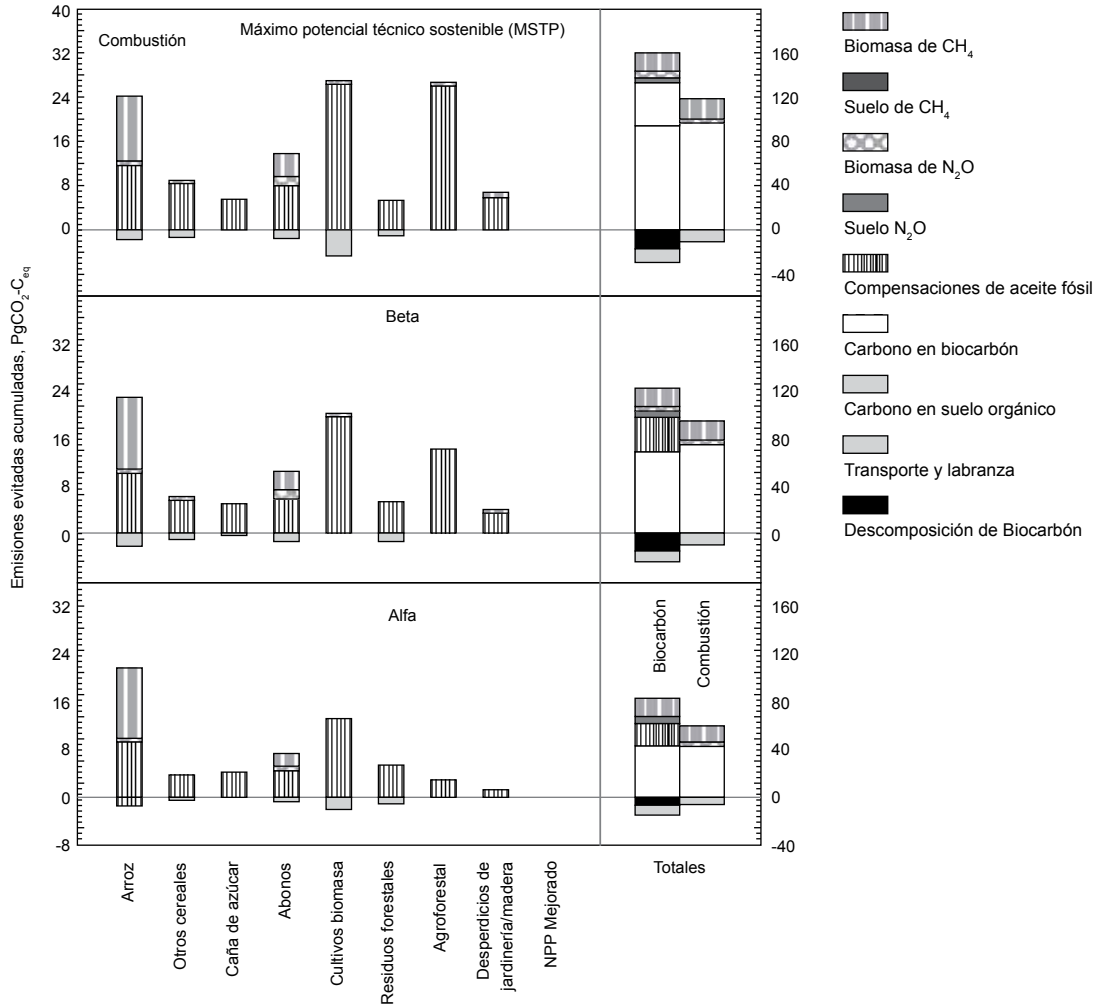


Figura 4. Comparación entre el biocarbón y la combustión (Wolf *et al.*, 2010).

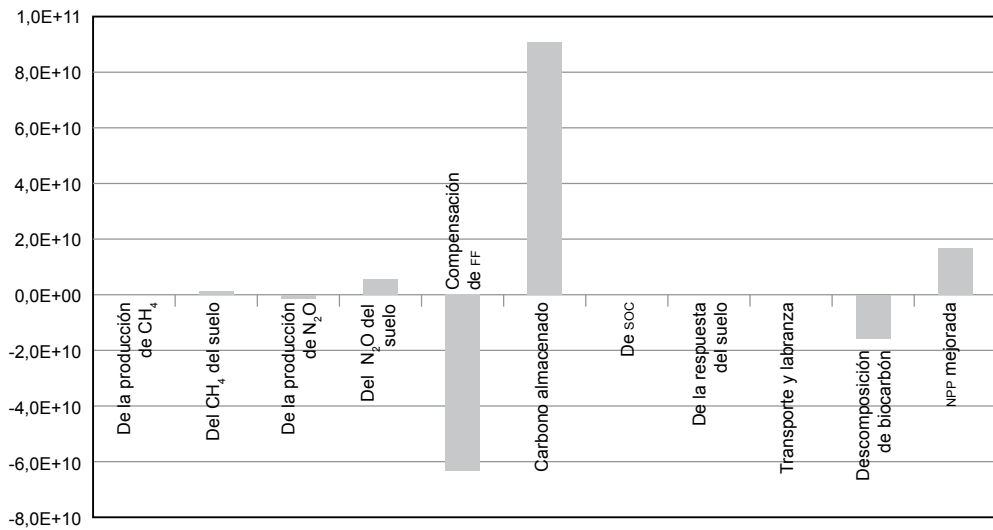


Figura 5. Diferencias entre biocarbón vs. combustión (pirólisis lenta óptima).





Los beneficios o pérdidas de la bioenergía se deben a:

- Valor de la energía
- Energía producida
- Créditos de carbono por el reemplazo de los combustibles fósiles
- Menos
- Costo de producción

### Supuestos

- Se hicieron basándose en el cultivo de maíz.
- Valor del cultivo de maíz: US\$300/Mg
- El incremento de la productividad se acumula con las mejoras producidas con el biocarbón.
- Monto de la biomasa: 1 Mg C/año; el biocarbón a partir de este, aplica a 1 hectárea por año.
- Intensidad del carbono del combustible fósil: 17,5 KGC/GJ
- Valor energético: US\$3.00/GJ
- Costo de producción/transporte:
- US\$70/pirólisis lenta MgC
- US\$50/MgC combustión
- Créditos de carbono: \$0-\$200/Mg C (u otro valor añadido)
- Factor de respuesta de la fertilidad del suelo: 0-1
- Periodo: 0-100 años

Como se puede ver en la Figura 6, en el largo plazo el biocarbón suele ser más rentable que la bioenergía; el beneficio depende del nivel inicial de la fertilidad del suelo y de la respuesta del suelo al biocarbón. No obstante, se requiere por lo menos una década antes de que sea rentable, mientras que la bioenergía es siempre rentable.

Al tomar en cuenta los créditos de carbono (Figura 7), el carbón vegetal y la bioenergía son siempre rentables, pero el primero lo es más en el largo plazo, si la fertilidad del suelo se mejora con las enmiendas producto de su implantación.

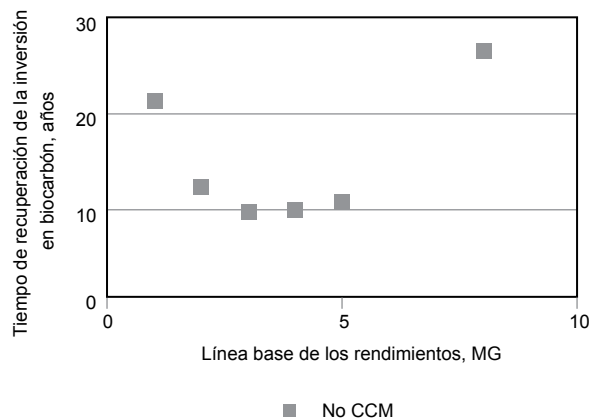
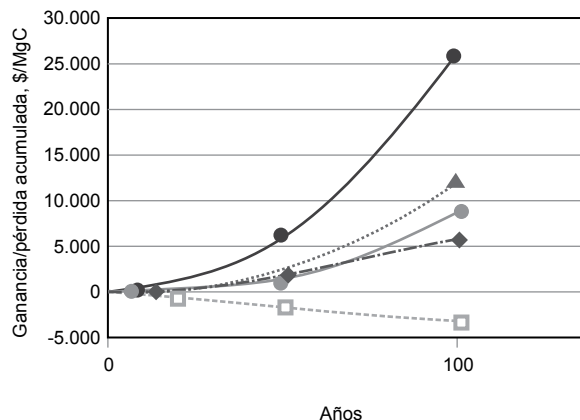
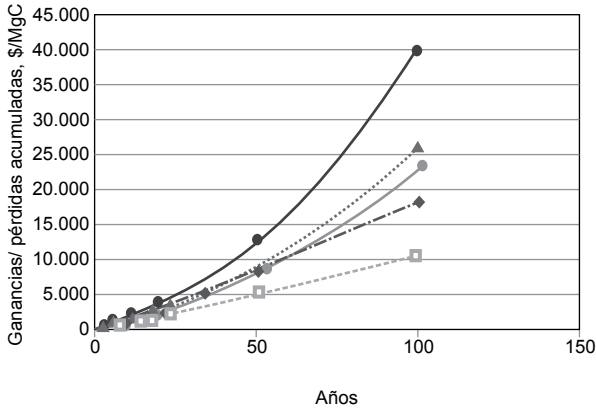


Figura 6. Economía sin créditos de carbono.

Ahora bien, si se mira la economía relativa del biocarbón y de la bioenergía, sin créditos de carbono (Figura 8), se puede coleccionar lo siguiente:

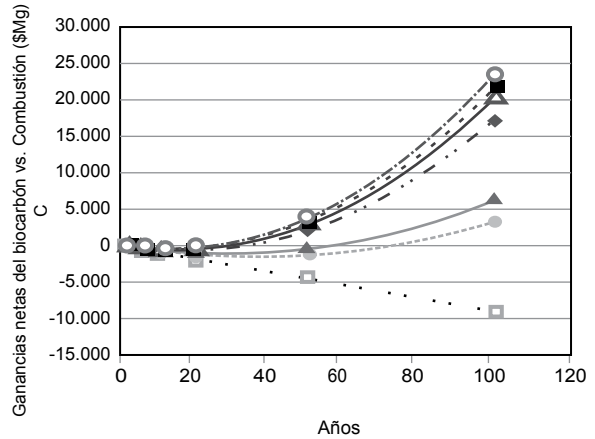
- La rentabilidad relativa del biocarbón depende en gran medida de los aumentos de productividad de los cultivos.
- Es más rentable en suelos de fertilidad media, en los que las respuestas de los rendimientos son más altas.



- 10 Mg/ha, SRF=0, \$200/MgC
- 8 Mg/ha, SRF=0,1, \$200/MgC
- 5 Mg/ha, SRF=0,38, \$200/MgC
- ▲ 1 Mg/ha, SRF=1,0, \$200/MgC
- ◆ Bioenergía, \$200/MgC
- Polinómica (10 Mg/ha, SRF=0, \$200/MgC)
- Polinómica (8 Mg/ha, SRF=0,1, \$200/MgC)
- ..... Polinómica (5 Mg/ha, SRF=0,38, \$200/MgC)
- ..... Polinómica (8 Mg/ha, SRF=1,0, \$200/MgC)

Figura 7. Impacto de los créditos de carbono sobre la economía.

- El período de amortización es de 27 años o más.
- El biocarbón nunca paga en suelo muy fértil, a menos que se encuentren otros ingresos. Si se asume (Figura 9) que se requiere un periodo de amortización menor de 40 años, entonces habrá que concentrarse en suelos de fertilidad de baja a moderada.



- 10 Mg/ha, SRF=0, No CCM
- 3 Mg/ha, SRF=0,7, No CCM
- 8 Mg/ha, SRF=0,1, No CCM
- ◆ 2 Mg/ha, SRF=0,85, No CCM
- ▲ 5 Mg/ha, SRF=0,38, No CCM
- ▲ 1 Mg/ha, SRF=1,0, No CCM
- 4 Mg/ha, SRF=0,5, No CCM

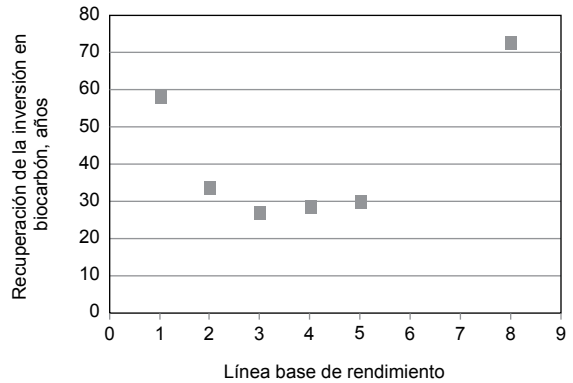
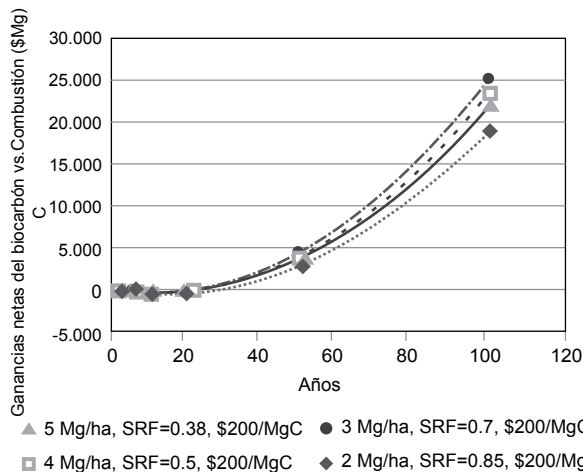


Figura 8. Economía relativa del biocarbón y de la bioenergía, sin créditos de carbono.



- ▲ 5 Mg/ha, SRF=0,38, \$200/MgC
- 3 Mg/ha, SRF=0,7, \$200/MgC
- 4 Mg/ha, SRF=0,5, \$200/MgC
- ◆ 2 Mg/ha, SRF=0,85, \$200/MgC

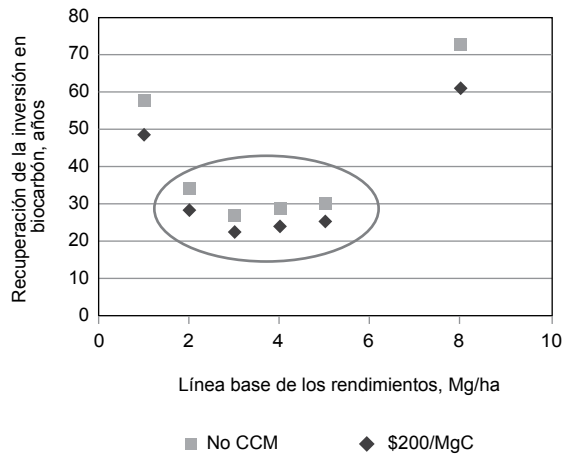


Figura 9. Impacto de las restricciones económicas sobre la implementación del biocarbón.



Los cortes disponibles en las tierras de cultivo están alrededor del 45%; se deben asumir las escalas de producción del biocarbón de manera similar.

La figura sugiere que el potencial económico global del biocarbón es aproximadamente la mitad del potencial técnico bajo el régimen actual de energía.

## Conclusiones

### Potencial técnico

- Tanto el biocarbón como la bioenergía (combustión) tienen efectos en la mitigación del cambio climático, cuando se implementan de manera sostenible.
  - El impacto anual del biocarbón es de 1,0-1,8 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>eq</sub>
  - El impacto acumulativo del biocarbón durante los primeros 100 años es de 66-130 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>eq</sub>
- El biocarbón es relativamente más eficaz en suelos infértiles y cuando la intensidad del carbono disminuye.
- La bioenergía tiene un mejor enfoque de mitigación en las zonas donde los suelos son fértiles y el carbón es el combustible fósil que se compensa.

### Análisis económico simple

- La retroalimentación exponencial del rendimiento del cultivo es el factor crítico que afecta la rentabilidad del biocarbón en relación con la bioenergía.
- Con maíz, el biocarbón es altamente rentable, independientemente del estado de los créditos de carbono, cuando se aplica

a suelos que van de moderada a altamente infértiles, pero requiere mínimo de 23 a 27 años para el retorno de la inversión (*payback*), en relación con la bioenergía.

- Los cultivos de mayor valor y el desarrollo de biocarbones diseñados para mejorar el crecimiento del cultivo pueden acortar el periodo de retorno.

### Potencial económico

- En las condiciones actuales, una estimación de primer orden del potencial global económico del biocarbón (Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>eq</sub>) está cercana al 50% de su potencial técnico.
  - El tiempo de recuperación de la inversión relativa es menor de 40 años en relación con el uso de la misma biomasa para bioenergía.
  - Se aplica solo para suelos que vayan desde poca a muy severas restricciones de fertilidad (SCR = 0,2-0,9)
- El potencial económico podría aumentar con:
  - El cambio a gran escala de fuentes de energía renovables y el posible desarrollo de nuevas fuentes baratas de energía de bajo carbono.
  - Proyección de mejorar la seguridad alimentaria (9.000 millones de personas, efectos del cambio climático).
  - La utilización de una tecnología rentable para disminuir el CO<sub>2</sub> en la atmósfera (350 ppm como objetivo), incluyendo almacenamiento en otros reservorios (por ejemplo, canteras y minas abandonadas, y suelos con pocas o con ninguna limitación de fertilidad).