

## Capítulo 5

# Estudios de caso en tierras áridas

La mayoría de las investigaciones y estudios de caso sobre la captura de carbono en el suelo han sido conducidos en zonas templadas; menos trabajos se han realizado en las regiones en desarrollo, incluyendo las zonas áridas (Lal, 2002b). Con el fin de comprender el gran potencial que ofrecen las tierras áridas para el secuestro de carbono, es necesario identificar las prácticas específicas del suelo que restablecen el carbono orgánico del suelo en los suelos degradados. Este capítulo revisa estudios de caso específicos realizados en diferentes agroecosistemas representativos en tierras áridas, donde el potencial de almacenamiento de carbono es evaluado mediante diferentes usos y prácticas de manejo de la tierra, incluyendo el riego y los biofertilizantes.

### MODELOS PARA ANALIZAR LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS EN TIERRAS ÁRIDAS DE LOS TRÓPICOS

El RothC (RothC-26 3) (Coleman y Jenkinson, 1995; Jenkinson y Rayner, 1977) y el CENTURY 4.0 (Parton *et al.*, 1987; Parton, Stewart y Cole, 1988) son los modelos de simulación de carbono orgánico del suelo más extensamente utilizados. Han sido probados en una gran variedad de ensayos de campo a largo plazo y también han sido usados en una gran variedad de zonas climáticas, incluyendo las regiones de tierras áridas. También ambos han sido adoptados para el uso en los principales proyectos para la evaluación del carbono. Los dos modelos varían en su complejidad. El RothC requiere menos entradas de datos y, por consiguiente, es más fácil establecer parámetros. Sin embargo, trabaja solamente con procesos del suelo y, por lo tanto, el carbono de los residuos de las plantas es un insumo requerido. El modelo para agroecosistemas CENTURY tiene fuentes de carbono orgánico del suelo similares a las del RothC, pero tiene la ventaja de submodelos adicionales. Si bien es capaz de manejar una cantidad mayor de opciones que el RothC, requiere una serie de variables de insumos a los que se les deben establecer los parámetros. Esto es importante porque la capacidad de cualquier modelo para predecir con exactitud depende de la precisión y confiabilidad de los datos usados para establecer los parámetros.

### ENFOQUE ADOPTADO PARA ESTABLECER LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS ROTH C Y CENTURY

Los datos para establecer los parámetros de los modelos pueden dividirse en tres grupos: climáticos, manejo del suelo y manejo de la tierra. Los estudios que contienen datos suficientemente detallados para modelar son escasos, particularmente en las regiones áridas. Donde se han desarrollado investigaciones y se ha recolectado información, los datos primarios que son vitales para el modelo a menudo no están disponibles.

Los parámetros del clima pueden ser citados por los investigadores que reportan sobre los efectos del manejo de la tierra en los suelos, pero raramente se proporcionan grupos completos de datos. Sin embargo, los datos climáticos están disponibles de manera independiente, como p. ej. en FAOCLIM 2 (2000) que contiene una base de datos de más de 28 000 estaciones climáticas en todo el mundo.

La literatura contiene los resultados de muchas investigaciones que analizan las propiedades del suelo y el efecto de varios tratamientos y prácticas sobre estos. Sin embargo, existen menos estudios que combinan el análisis del suelo con el del manejo de la tierra, especialmente en períodos más largos. Específicamente, ha habido poca investigación sobre los sistemas de tierras áridas.

Para los estudios de caso examinados aquí, se establecieron los parámetros para CENTURY y se ejecutó el programa para establecer un equilibrio entre 2 000 y 5 000 años. Luego se aplicaron los escenarios que reflejan el pasado reciente y el actual. Aunque CENTURY puede utilizar muchas prácticas de cultivo, solo puede manejar un cultivo a la vez. Por lo tanto, los cultivos intercalados que se encuentran comúnmente en los sistemas agrícolas de tierras áridas, no podrían incorporarse en los escenarios.

El modelo RothC se ejecutó para establecer su equilibrio utilizando el estado actual del carbono del suelo después que inicialmente se utilizó en modo inverso para calcular las necesidades de aplicaciones de carbono de las plantas. Con el fin de modelar algunos de los escenarios futuros para analizar los efectos del manejo de la tierra sobre el carbono del suelo, se obtuvieron las aplicaciones de residuos de plantas a partir del submodelo de plantas del CENTURY y luego se utilizaron para establecer los parámetros de los ficheros de manejo de la tierra del RothC. Los resultados en el RothC frecuentemente predijeron niveles más altos de carbono del suelo que el CENTURY. Esto se ha notado anteriormente y se ha atribuido al hecho de que el carbono del suelo tiende a recuperarse más rápido en el modelo CENTURY que en el RothC y, consecuentemente, que RothC requiere menores cantidades de carbono para mantener el mismo contenido de carbono orgánico (Falloon y Smith, 2002). El submodelo de plantas del modelo CENTURY es bastante básico. Por lo tanto, donde se requieran estimaciones precisas de la producción de las plantas y del rendimiento de los cultivos, se deben utilizar modelos alternativos como el modelo completamente mecánico de productividad de las plantas WIMOVAC (Humphries y Long, 1995).

### SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS Y FUENTES DE DATOS

Los datos de cuatro sistemas diferentes de tierras áridas en Argentina, India, Kenya y Nigeria se utilizaron para modelar los cambios del carbono del suelo con diferentes prácticas y tecnologías agrícolas. Estos sistemas tenían diferentes contenidos de carbono en el suelo y habían perdido diferentes cantidades durante su explotación en el cultivo (Cuadro 11). Las aplicaciones de materia orgánica al suelo, por medio de abono de corral, abonos verdes, leguminosas en las rotaciones, composte de lombrices o el empleo de barbechos en las rotaciones, todas incrementaron el carbono del suelo

CUADRO 11

Resumen de los hallazgos sobre el contenido de carbono y tasas de acumulación y/o pérdidas en cuatro agrosistemas de tierras áridas

	Nigeria	India	Kenya	Argentina
Contenido de C del suelo antes de la labranza (toneladas/ha)	8-23	15-20	33-41	50-70
Contenido del C del suelo después de la labranza (toneladas/ha)	6-12	13-22	18-28	37-41
Efecto de las prácticas de labranza convencional sobre el C del suelo (toneladas/ha/año)	- 0,05 a - 0,01	- 0,07 a +0,06	- 0,3 a - 0,1	- 0,17 a - 0,19
Efecto del abono de corral, aplicaciones orgánicas, retención de residuos vegetales y barbechos en las rotaciones (toneladas/ha/año)	+ 0,1 a + 0,3	+ 0,2 a + 0,4	+ 0,4 a + 0,9	-
Efecto de los árboles (toneladas/ha/año)	+ adicional 0,05 a 0,15	+ adicional 0,5 a 0,7	-	-
Efecto de la utilización de fertilizantes inorgánicos como única fuente de nutrientes para el C del suelo (toneladas/ha/año)	- 0,12 a + 0,08	- 0,01	- 0,3	-
Efectos de la labranza cero (LC)				
LC sola				+ 0,02
LC + abonos verdes o abono de corral				+0,1 a 0,25 +0,04
LC + fertilizantes inorgánicos				

<sup>1</sup> Los efectos del cultivo convencional son promedios de los últimos 100 años para cada sitio, excepto Kenya, donde las tasas se calcularon a partir del asentamiento (30 - 50 años).

y los rendimientos agrícolas. Los árboles como parte de los sistemas agroforestales favorecieron el incremento del contenido de carbono en el suelo. El fertilizante inorgánico utilizado por sí sólo para incrementar el suministro de nutrientes a los cultivos, produjo una disminución en el carbono del suelo en todos los sistemas o sólo pequeños incrementos si se utilizaron con labranza cero. La labranza cero incrementa el carbono del suelo, si bien la acumulación es mayor donde se añade materia orgánica al suelo.

Los distintos escenarios muestran que el secuestro de carbono en las tierras áridas tropicales puede ser efectiva en diferentes sitios. Las prácticas de manejo de la tierra fueron seleccionadas por estar en concordancia con los sistemas agrícolas actuales. Así, por ejemplo, las dosis de aplicación de materia orgánica están de acuerdo con las cantidades que podrían estar disponibles para los agricultores. Sin embargo, a nivel de campo, diferentes factores pueden impedir la adopción de mejores estrategias para el secuestro de carbono. Los residuos de cultivos pueden ser necesarios para la alimentación del ganado o como combustible en lugar de devolverse a los campos, o pueden venderse en tiempos difíciles. El estiércol puede utilizarse como combustible. Muchos factores socioeconómicos interactuarán para determinar que escenario o combinación de escenarios se implementa en cada ciclo de cultivo.

Algunos de los resultados predicen que el carbono del suelo puede restaurarse a los niveles previos al cultivo o, en ciertas circunstancias, aún más altos. El verdadero nivel de carbono del suelo con frecuencia es difícil de establecer en aquellos sistemas donde la actividad agrícola ha estado presente durante varios siglos o milenios, tales como los casos de Nigeria y Kenya. Para lograr cantidades de carbono del suelo por encima de los «niveles naturales», implica que el sistema agrícola tiene una mayor productividad que el sistema nativo, asumiendo que el carbono no está siendo introducido al sistema desde otro lugar. Los escenarios que predicen las mayores tasas de secuestro de carbono, a menudo están asociados con la introducción de árboles al sistema. Las aplicaciones de carbono a partir de los árboles son más resistentes a la descomposición que las de los cultivos herbáceos y, en consecuencia, pueden causar incrementos marcados en el nivel del carbono del suelo (Falloon y Smith, 2002).

## Estudio de Caso 1

# Nigeria – región de Kano

Nigeria incluye algunas de las áreas más densamente habitadas del oeste semi-árido de África. Este no es un fenómeno reciente, puesto que hay indicaciones de actividad humana que remontan a más de mil años. Como consecuencia, los suelos de esta región han sido sometidos a largos períodos de cultivo. Sin embargo, en los últimos 40 años el área cultivada del norte de Nigeria ha aumentado del 11 por ciento al 34 por ciento del territorio (Harris, 2000). En particular, el nivel de intensidad agrícola en la zona de asentamiento cerrada (ZAC) está entre las más altas en las regiones semiáridas del oeste de África.

Las investigaciones en los sistemas agrícolas de esta región y su efecto sobre la fertilidad del suelo han sido conducidas por la organización *Drylands Research*, en el Reino Unido. Sus estudios han encontrado una estrecha correlación entre la intensidad del cultivo y la adopción de las técnicas de manejo de la fertilidad del suelo. La producción vegetal en el Sahel generalmente está limitada por la lluvia o los nutrientes (Breman y De Wit, 1983). Sin embargo, la economía e infraestructura del norte de Nigeria no es apta para la aplicación de insumos externos, tales como fertilizantes. Por consiguiente, las unidades agrícolas de los pequeños agricultores operan como sistemas de bajos insumos, siendo el estiércol vacuno la forma más común de abono orgánico.

### ASPECTOS FÍSICOS

La región semiárida tiene una estación lluviosa desde mayo-julio hasta septiembre. Sin embargo, la lluvia es errática (Mortimore, 2000) y hace particularmente difícil la agricultura. Los suelos son principalmente ferralíticos tropicales, arenosos, con poca capacidad de retención de agua y bajos niveles de nutrientes y materia orgánica (Harris, 2000). Los balances de nutrientes pueden variar entre los distintos años puesto que el crecimiento del cultivo fluctúa con la lluvia. La vegetación natural es sabana forestal abierta con tendencia al incremento de la pradera abierta donde la lluvia es más escasa.

### SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

El norte de Nigeria ha sido clasificado en tres categorías de sistemas agrícolas: intensivo, menos intensivo y extensivo (Mortimore, 1989). Los sistemas intensivos tienen cultivos permanentes anuales o bianuales con una intensidad de cultivo de más del 60 por ciento. Los sistemas menos intensivos operan un régimen de arbustos/arbustos pequeños-barbecho y la intensidad de cultivo es de 30-60 por ciento. El sistema extensivo puede ser con arbustos grandes – barbecho y áreas no cultivadas, donde la intensidad de cultivo es típicamente menos del 30 por ciento.

Los cultivos principales son mijo, sorgo, maní, ajonjolí y caupí. Puesto que los sistemas son de bajos insumos, los rendimientos de los cultivos son de alrededor de una tonelada/ha. Principalmente se emplean las aradas en surcos y el cultivo con azada es muy común. Las aplicaciones de estiércol tienen que ser realizadas con sumo cuidado para evitar «quemar» los cultivos y las aplicaciones son de 1 a 7 toneladas/ha. Los residuos de cultivo se colectan para forraje o se dejan para ser pastoreados en el campo.

El barbecho se practica en los sistemas menos intensivos, aunque la tierra se explota por medio del pastoreo, la cosecha de madera y otros productos. La agrupación nocturna del ganado es el método más efectivo de recolectar el estiércol. Las leguminosas como

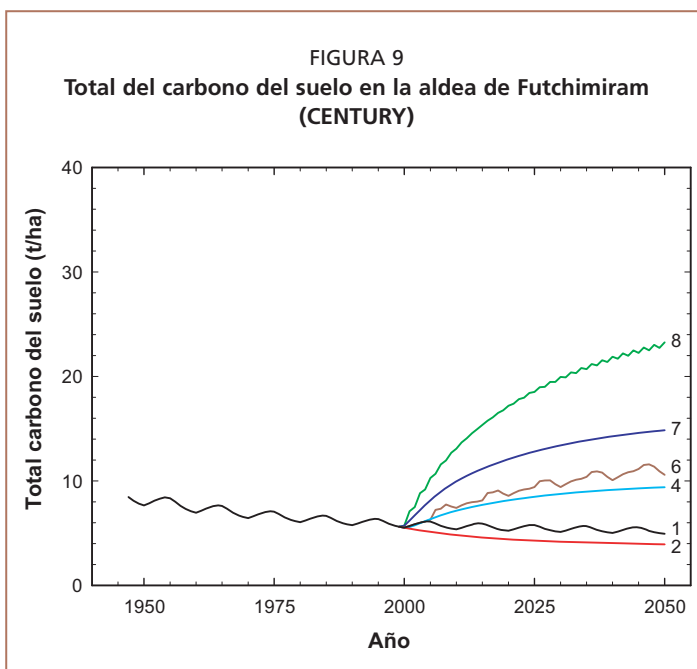
el caupí se siembran principalmente en sistemas altamente intensivos para facilitar el ingreso de nitrógeno. Los fertilizantes inorgánicos son escasos y rara vez están disponibles en el momento óptimo.

**SITIOS DE ESTUDIO**

Los sitios de estudio cubren un amplio rango de densidad poblacional e incluyen las tres categorías de intensidad agrícola. Los suelos y cultivos sembrados son similares en todas las categorías (Harris, 2000). Inicialmente, al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros con un sistema natural de pastos, bosque y pastoreo. Se programó un fuego de intensidad media durante 10 días y ocurría un evento relacionado con un fuego de alta intensidad cada 30 días. Hace mil años, comenzaron los episodios de tala y quema y se incorporaban dos campañas de cultivo de mijo, de forma repetida cada 60 años. En el siglo XIX, la frecuencia de eventos de cultivo se incrementó a un ciclo de 30 años y luego a una vez cada 15 años a comienzos del siglo XX.

**i. Futchimiram, estado de Borno**

Es un sistema agropastoral de baja intensidad o extensivo, variable en las prácticas de cultivo. Algunas tierras han quedado degradadas en la actualidad. El modelo CENTURY se ejecutó para los últimos 60 años con ciclos alternos de cinco años de pastoreo y cultivo de mijo. Los residuos de cultivo son pastoreados y no existen otras aplicaciones. Esta práctica actual produce un declive gradual y persistente en el carbono del suelo (Figura 9). El nivel estimado está ligeramente por encima del valor del carbono medido para los suelos cultivados que promedian entre 3,5 y 4,4 toneladas/ha. El modelo RothC también predice que la práctica actual disminuirá ligeramente el carbono del suelo en los próximos 50 años (Cuadro 12). Los escenarios que se muestran en la Figura 9 y que se detallan en el Cuadro 13, comparan las prácticas actuales



Escenarios descritos en el Cuadro 13.

CUADRO 12

**Contenido total de carbono del suelo en la aldea Futchimiram**

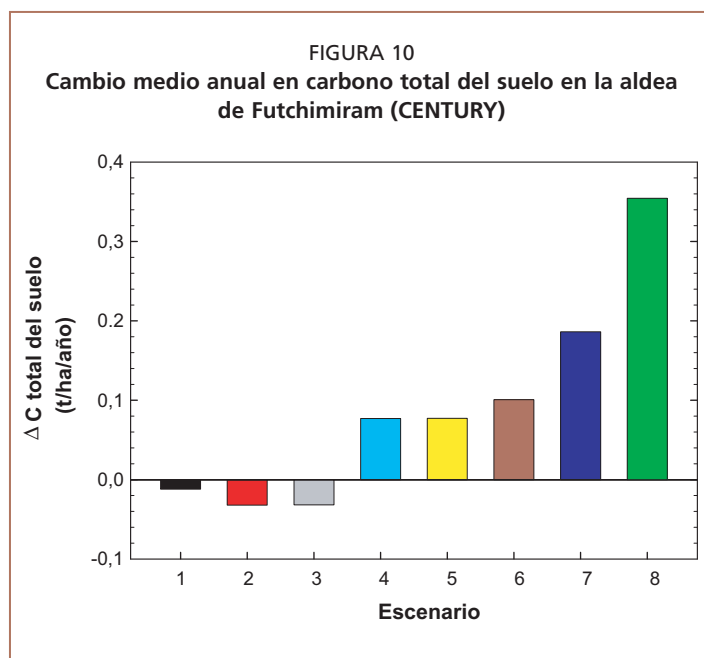
Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	5,54	4,94	-10,8	5,38	5,18	-3,7
2		3,93	-29,1		3,72	-30,9
5		9,40	69,7		9,70	80,3
6		10,57	90,8		12,45	131,4

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 13.  
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 13

**Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Futchimiram**

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Cultivo continuo
3	Cultivo continuo, sin pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente
4	Fertilizante inorgánico solamente (100 kg/ha de urea), no pastoreo
5	Promedio de residuos vegetales 0,5 toneladas/ha/año, no pastoreo de residuos
6	5-años de barbecho, 5-años de cultivo, 2 aplicaciones de abonos orgánicos 3 toneladas/ha, pastoreo de residuos
7	Cultivo continuo, abonos orgánicos corral 1,5 toneladas/ha/año, pastoreo de residuos
8	Cultivo continuo, abonos orgánicos 1,5 toneladas/ha/año Residuos vegetales 0,5 toneladas/ha/año, sin pastoreo

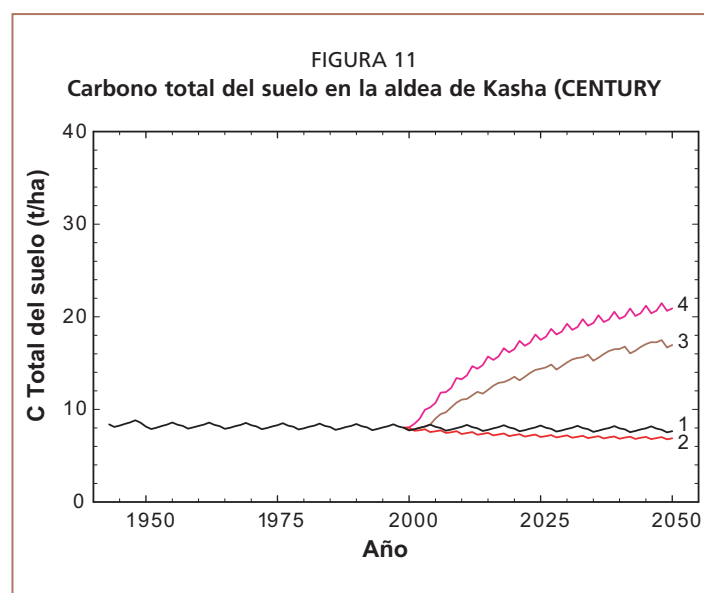


Escenarios descritos en el Cuadro 13.  
Fuente: Modelos CENTURY y RothC

(dos aplicaciones de 3 toneladas/ha en el ciclo de cultivo cada cinco años, promedio de 0,6 toneladas/ha/año) tiene un efecto positivo sobre el C del suelo, indicando un incremento de 5 – 7 toneladas de C/ha en los próximos 50 años (0,08 toneladas de C/ha/año). Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados de escenarios futuros utilizando diferentes combinaciones de barbecho y aplicaciones orgánicas. El incremento gradual en el carbono del suelo ocurre con los abonos orgánicos, retención de los residuos vegetales y evitando el pastoreo después de la cosecha. En este caso, el contenido de C del suelo se eleva de seis a 24 toneladas de C/ha en 50 años.

#### *Efecto de los fertilizantes inorgánicos*

El uso de fertilizantes inorgánicos sin ninguna otra aplicación orgánica, y sin pastoreo o barbecho (Escenario 4), conduce a un incremento modesto de la captura de carbono (0,08 toneladas de C/ha/año).



con aplicaciones de fertilizante inorgánico, abono de corral, residuos de plantas y pastoreo. La Figura 10 ilustra el cambio promedio anual esperado en el carbono del suelo en un período de 50 años.

#### *Efectos de la pérdida del barbecho*

Eliminar el período de barbecho (Escenario 2) produce como resultado un declive mayor del carbono del suelo en la medida que transcurren los años. Ambos modelos pronosticaron reducciones similares (Figura 9 y Cuadro 12). Prevenir el pastoreo de los residuos de cultivo bajo estas condiciones (Escenario 3) tiene muy poco efecto sobre el carbono del suelo (Figura 10).

#### *Efecto de las aplicaciones orgánicas*

La aplicación de abonos de corral

#### *Resumen*

Este sistema no produciría un balance positivo en el carbono del suelo sin aplicaciones orgánicas. Aunque los fertilizantes inorgánicos pueden conducir a la captura de carbono, estos acarrear un costo que dará como resultado un balance total negativo del contenido de carbono.

#### **ii. Kasha, estado de Yobe**

Es un sistema agropastoral de baja intensidad que cubre las tierras bajas, las tierras altas y algunas áreas de tierras húmedas. Aquí solo se modelan los suelos de las tierras bajas. Existen cultivos intercalados de



leguminosas y granos, y los residuos de cultivos se usan como alimento para el ganado. La aplicación de abono a los campos es baja y se realizan barbechos prolongados con presencia de arbustos.

Los parámetros se establecieron para los últimos 50 años, con un ciclo de siete años, que comprendió cuatro años de pastoreo y tres años de cultivo de mijo-caupí-mijo. Se aplicó abono de corral (0,75 toneladas/ha) en el primer año de cada ciclo de cultivos. Los suelos cultivados poseen contenidos de carbono de 4,5-7,0 toneladas/ha. El modelo CENTURY calculó un contenido actual de carbono de 7,7 toneladas/ha (Figura 11) y el RothC provee un resultado similar (Cuadro 14). Ambos modelos sugieren que con la práctica actual el sistema está próximo a un estado de equilibrio.

**Efecto de los barbechos y las aplicaciones orgánicas**

Eliminar el barbecho de la práctica actual (Escenario 2) conduce a un ligero declive del carbono del suelo en los años subsiguientes (Figuras 11 y 12). Aplicar 3 toneladas/ha de abono de corral a cada cultivo de mijo (promedio 1,3 toneladas/ha/año durante un ciclo de siete años) produciría un incremento marcado en el carbono del suelo (Cuadros 14 y 15) representando una tasa de secuestro de carbono de 0,18 toneladas/ha/año (Figura 12). Este incremento podría mejorar más si se eliminara el barbecho debido a que la dosis de aplicación de abono promediaría entonces dos toneladas/ha/año (Figuras 11 y 12).

**Resumen**

Los escenarios establecidos para Kaska ilustran el efecto de los períodos de barbecho sobre el contenido de carbono del suelo. Cuando el régimen de cultivo añade poca materia orgánica al suelo, los barbechos a menudo tendrán un efecto positivo siempre que se manejen correctamente. Sin embargo, si la práctica de cultivo está acumulando cantidades significativas de materia orgánica en el suelo, cualquier interrupción, como es el caso del barbecho, disminuiría el potencial total de secuestro de carbono.

**iii. Dagaceri, estado de Jigawa**

Es una región que experimenta una rápida intensificación. Es un sistema agropastoral con barbechos

CUADRO 14  
Contenido total de carbono en la aldea Kaska

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	7,73	7,64	-1,2	7,33	7,87	7,4
3		16,94	119,1		15,57	112,4

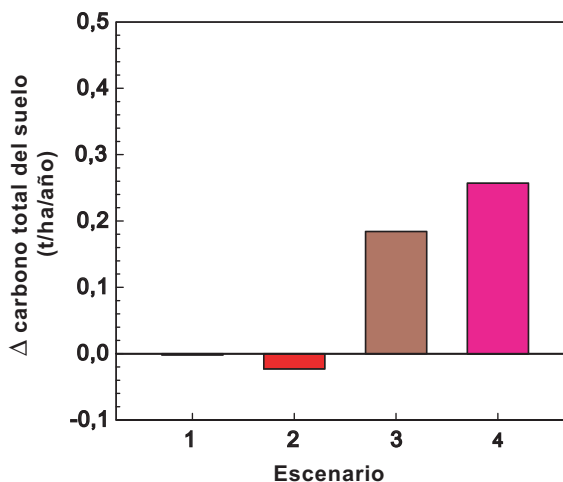
<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 15.  
Fuente: Modelos CENTURY y RothC.

CUADRO 15  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Kaska

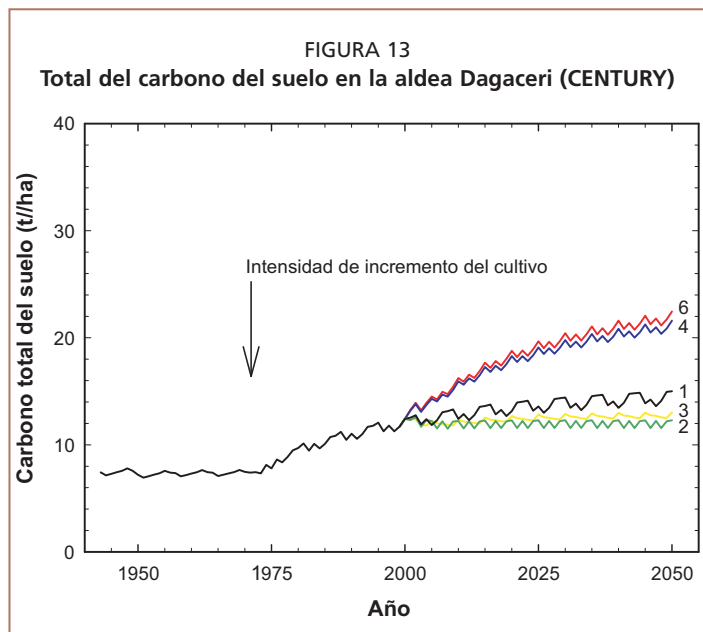
Escenario	Land management
1	Práctica actual
2	Cultivo continuo, mijo - caupí
3	Cultivo- barbecho, AC 3 toneladas/ha a mijoo
4	Cultivo continuo, AC 3 toneladas/ha a mijo

AC - Abono de corral.

FIGURA 12  
Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea de Kaska (CENTURY)



Escenarios descritos en el Cuadro 15

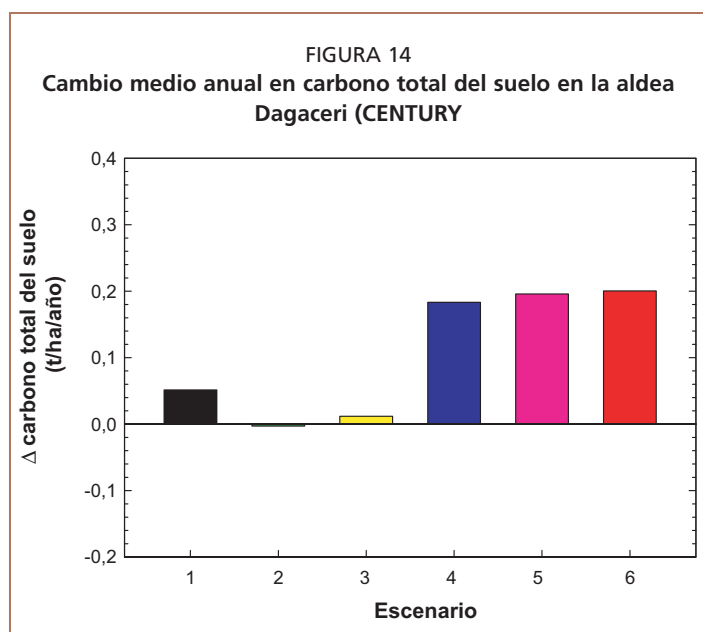


1Escenarios descritos en el Cuadro 17.

CUADRO 16  
**Contenido total de carbono en la aldea Dagaceri (modelos CENTURY y RothC)**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	12,43	15	20,7	14,69	20,43	39,1
5		22,22	78,8		29,55	101,2

1Escenarios descritos en el Cuadro 17.



Escenarios descritos en el Cuadro 17.

de arbustos o arbustos pequeños. El período de duración del barbecho ha disminuido en la medida que se ha expandido la tierra arable. Se siembran, tanto leguminosas como granos pero la degradación de la tierra constituye un problema. En la medida en que se acortan los períodos de barbecho, los campesinos dependen cada vez más de los abonos para mantener la fertilidad del suelo.

El establecimiento de los parámetros para el modelo CENTURY inicialmente fue el mismo que para la región Kaska, pero luego, alrededor de 30 años atrás, en el modelo el cultivo se incrementó a cinco años de cada siete. El mijo y el caupí se sembraron de forma alterna con 1,5 toneladas/ha de abono añadidos a cada cultivo de mijo (promedio 0,64 toneladas/ha en un ciclo de siete años).

La aplicación de abono adicional está asociada con el incremento de los resultados en la intensidad de cultivo y el incremento correspondiente del carbono del suelo, pronosticado por ambos modelos, continúa en los años subsiguientes (Figura 13 y Cuadro 16). Las mediciones de campo varían según la intensidad de cultivos previa y promedian entre tres y siete toneladas de C/ha.

*Efectos de los barbechos y las aplicaciones orgánicas*

La aplicación de abono a cada cultivo de mijo se incrementó a tres toneladas/ha en todos los escenarios (2-6). Las tasas de fijación de carbono de 0,18-0,20 toneladas/ha pueden lograrse con pequeñas diferencias, dependiendo de si el barbecho es retenido y los residuos de cultivos son pastados o no (Escenario 4 - 6, Figura 13 y 14, Cuadro 17). Sin embargo, si la eliminación del barbecho está acompañada de la cosecha de todo el material que está sobre el suelo

(Escenario 3), el secuestro de carbono es virtualmente detenida, incluso si se mantienen las aplicaciones de estiércol.



La eliminación total de los árboles del sistema, produce como resultado una pérdida neta del carbono del suelo, a pesar de la aplicación adicional de abono orgánico.

**Resumen**

Este sistema muestra que la materia orgánica del suelo puede mantenerse e incrementarse, incluso con la intensificación del cultivo, siempre que existan leguminosas en la rotación. Sin embargo, el manejo cuidadoso de los residuos de cultivo es vital, de la misma forma que lo es la preservación de los árboles.

**iv. Tumbau, aldea cercana a Kano**

Es un área agrícola sumamente intensiva. Toda la tierra está cultivada, aunque la degradación afecta, según se informa, menos del 10 por ciento del área. Hay un sistema altamente integrado de producción de cultivos y ganado, con cultivos intercalados de leguminosas, uso intensivo de abonos y fertilizantes inorgánicos. Virtualmente no existen tierras de pastoreo, por lo que los animales tienen que alimentarse de residuos de cultivos y del forraje de los campos adyacentes.

Se ejecutó el modelo CENTURY durante los últimos 50 años con una rotación de mijo-caupí, seis toneladas/ha de abono aplicadas al mijo (promedio tres toneladas/ha/año) y cosecha de todo el material vegetal sobre el suelo. Este sistema se encuentra ahora cercano al punto de equilibrio en cuanto a su contenido de carbono en el suelo con 9,8 toneladas de C/ha (Figura 15).

Esto es comparable a un promedio de  $10,5 \pm 1,7$  toneladas de C/ha medidas en sitios cultivados. El modelo RothC calcula un valor de 11,4 toneladas/ha para el 2000, pero predice que se alcanzará un mayor contenido total de carbono en el suelo para el 2050 (Cuadro 18).

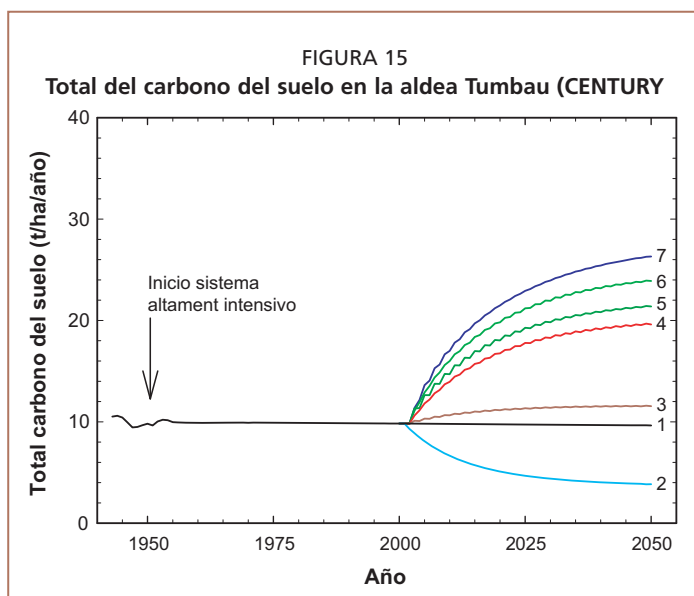
**Efectos de las aplicaciones orgánicas**

La aplicación adicional de abono de corral tiene un impacto marcado sobre el carbono del suelo, especialmente cuando alcanzan el máximo (7 toneladas/ha) normalmente aplicado en esta región, o sea, una aplicación anual de 6,75 toneladas/ha (Cuadro 19) daría como resultado una retención de 0,20 toneladas de C/ha/año en los próximos 50

**CUADRO 17**  
**Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Dagaceri**

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Eliminación de los árboles
3	No pastoreo de los residuos, cosecha de todo el material vegetal que existe en la superficie
4	Cultivo continuo, mijo-caupí
5	AC promedio 1,29 toneladas/ha/año, barbecho, pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente
6	No pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 19.

**CUADRO 18**  
**Carbono total del suelo en la aldea Tumbau (CENTURY y RothC)**

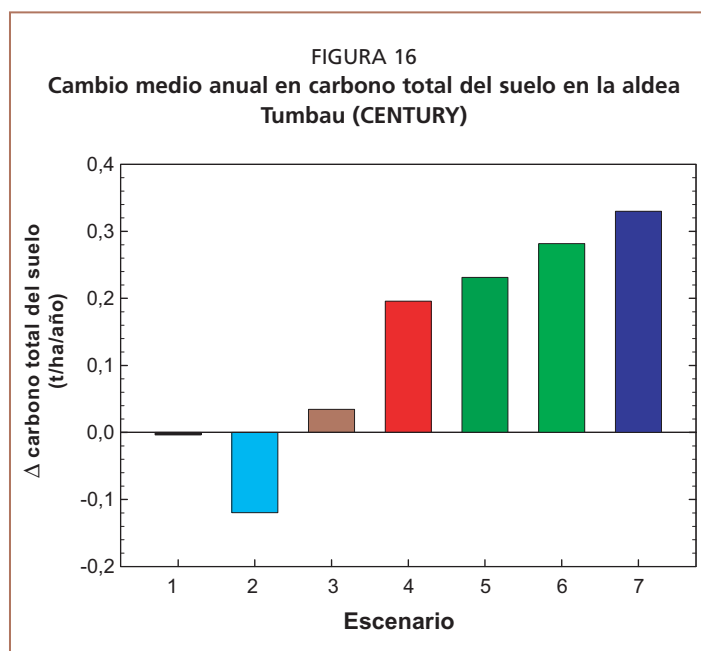
Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	9,82	9,64	-1,8	11,3	13,39	18,5
3		11,54	17,5		14,96	32,4
6		23,9	143,4		31,7	180,5

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 19.

CUADRO 19  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Tumbau

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Fertilizante inorgánico (110 kg/ha urea)
3	AC 3,75 t/ha/año
4	AC 6,75 t/ha/año
5	AC 3,75 t/ha/año, agregar árboles fijadores de nitrógeno
6	AC 6,75 t/ha/año, residuos de plantas 2t/ha/año
7	AC 6,75 t/ha/año, las cosechas de granos

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 19.

años (Figura 16). Aunque adicionar árboles fijadores de nitrógeno y residuos de plantas a los campos incrementaría el carbono del suelo, los requerimientos de los primeros para la alimentación del ganado, pueden exceder la capacidad del sistema agrícola actual.

#### *Efecto del fertilizante inorgánico*

Reemplazar la aplicación de abono en este sistema con fertilizante inorgánico (urea 100 kg/ha, Escenario 2) produce una gran reducción del carbono del suelo, disminuyendo el contenido en más de 0,1 toneladas de C/ha/año.

#### *Resumen*

Siempre que retorne una cantidad adecuada de materia orgánica al suelo, estos sistemas de agricultura intensiva deberán mantener el carbono del suelo y también existen posibilidades de secuestro de carbono. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el campo, que no muestran evidencia de disminución en la materia orgánica del suelo, a pesar del incremento en la presión de cultivo. Sin embargo, la habilidad para descifrar el secuestro de carbono futuro dependerá de

un balance cuidadoso entre el cultivo y la cría de ganado y la capacidad total del sistema. Mantener los rendimientos del cultivo mediante la aplicación de fertilizantes inorgánicos como única opción, probablemente producirá pérdidas sustanciales de materia orgánica del suelo.

#### **Conclusiones sobre los casos del norte de Nigeria**

La modelación de los datos de las fincas ubicadas en las tierras áridas del norte de Nigeria muestra que el contenido de carbono del suelo puede incrementarse a partir de las cantidades básicas con las diversas tecnologías y prácticas disponibles para los agricultores.

La cantidad total de carbono que puede fijarse utilizando leguminosas, períodos de barbecho, abonos de corral y retención de residuos vegetales, varía entre 0,1 y 0,3 toneladas C/ha/año. Esta cantidad se eleva cuando también se cultivan árboles.

El carbono del suelo se pierde cuando se utilizan solamente fertilizantes inorgánicos para mantener la fertilidad del suelo – alrededor de 0,1 toneladas C/ha/año en los sistemas intensos de la zona Kano. El cultivo continuo produce pérdidas pequeñas de carbono año tras año, donde no se realizan aplicaciones adicionales de materia orgánica. A pesar de la intensificación considerable de los sistemas actuales (acortamiento de los períodos de barbecho), los productores mantienen el contenido de carbono de sus suelos. Los beneficios de mantener árboles en el entorno se muestran en los escenarios modelados.

## Estudio de Caso 2

# India – estados de Andhra Pradesh y Karnataka

Más de la mitad de los agricultores de la India viven en regiones climáticas que pueden describirse como semiáridas. En las décadas recientes se han encontrado incrementos en los rendimientos de los cultivos que se han atribuido a la revolución verde. Sin embargo, las tecnologías asociadas, por ejemplo el riego y los fertilizantes inorgánicos son caros y no están fácilmente disponibles para los agricultores de menores recursos que habitan las áreas rurales. Estas prácticas pueden conducir a una disminución en la fertilidad del suelo y además dependen de la energía de combustibles fósiles (Butterworth, Adolph y Satheesh, 2002). De hecho, casi dos tercios de la tierra arable en la India dependen únicamente de la lluvia para la producción agrícola. El Instituto de Recursos Naturales (Reino Unido), la Sociedad Deccan para el Desarrollo y el Instituto BAIF para el Desarrollo Rural (India) han estudiado el manejo de la fertilidad del suelo en el distrito Medak en Andhra Pradesh y en el distrito Tumkur en Karnataka. Los trabajos de estas instituciones han demostrado que existe una sensibilización creciente respecto a las tecnologías para mantener y mejorar la fertilidad del suelo e identificaron al menos 14 prácticas diferentes, que van desde el cultivo de leguminosas hasta la producción de composte de lombrices. La mayoría de ellas están relacionadas con el mantenimiento y mejoramiento del contenido de materia orgánica del suelo. Estos estudios proveen una oportunidad para investigar el efecto que pueden tener estas técnicas de mejoramiento de la fertilidad del suelo sobre el secuestro de carbono.

### ASPECTOS FÍSICOS

El distrito Medak forma parte del altiplano de la Meseta Deccan que se extiende desde Andhra Pradesh hasta Karnataka. El clima consiste en un período de invierno suave («rabi», noviembre-febrero), un verano cálido y seco (marzo-mayo) y el monzón del suroeste, que es el momento en que se produce más del 80 por ciento de la lluvia («kharif», junio-octubre). El promedio de lluvia es de menos de 900 mm. El mes más caluroso es mayo, justo antes del comienzo de las lluvias, cuando la temperatura máxima diurna puede alcanzar 40 °C. Por el contrario, las temperaturas de la noche pueden disminuir hasta 6 °C en diciembre. La disponibilidad de humedad para el crecimiento de los cultivos está entre 120 y 150 días.

Los principales tipos de suelo son los alfisoles y los vertisoles. Los primeros incluyen suelos rojos lateríticos que comprenden suelos areno francos, franco arenosos y franco arcillo arenosos y generalmente no son salinos. Los vertisoles, o suelos negros, son potencialmente más productivos y con una mayor capacidad de retención de agua, moderadamente alcalinos y con un contenido de sales altamente solubles. Estos comprenden los franco arcillosos, las arcillas y los arcillo limosos. El contenido de materia orgánica de los suelos en el área usualmente es 0,5-1 por ciento. La tierra yace entre los 500-600 m sobre el nivel del mar y queda muy poca vegetación natural. El bosque tropical seco caducifolio ha sido talado casi en su totalidad, excepto en las tierras protegidas por el gobierno.

### SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Los sistemas agrícolas en esta región tienen un alto grado de integración entre el ganado, los cultivos y los árboles (Pound, 2000). Existe una gran diversidad agrobiológica que

es combinada con las actividades no relacionadas con la agricultura, particularmente en el distrito de Medak. Esta situación genera un uso eficiente de los recursos limitados de la tierra y actúa como un seguro contra las impredecibles condiciones meteorológicas, un problema frecuente en las tierras áridas. El tamaño promedio de las fincas es 2,6 ha (Butterworth, Adolph y Satheesh, 2002). Los pequeños productores marginales cultivan al menos ocho variedades de cultivos en media hectárea. La pequeña población ganadera ha ido en descenso de manera continua desde la década de 1980. Esto tiene implicaciones importantes para la agricultura, no sólo porque los desechos animales son una fuente importante de materia orgánica para los suelos, sino también debido a que los bueyes hacen una contribución vital como animales de tiro, no sólo en el transporte del estiércol de los corrales. La labranza comúnmente se lleva a cabo con implementos muy rudimentarios. El mayor cambio hacia la mecanización de los cultivos se ha observado en Karnataka.

Los cultivos predominantes que se siembran en el distrito Medak son arroz, sorgo y maíz, mientras que la caña de azúcar con riego es un cultivo comercial importante. Los cultivos principales que se siembran en Karnataka son arroz, sorgo, mijo africano, mijo perla, frijol gandul, frijol mungo y maní (Reddy, 2001).

Los agricultores dan alta prioridad al mantenimiento de la fertilidad del suelo, mientras que los fertilizantes inorgánicos se clasifican como pobres para ello. Sin embargo, muchos agricultores los usan debido a que las alternativas orgánicas a menudo no están disponibles y a que los fertilizantes inorgánicos son subsidiados. La importancia relacionada con la fertilidad del suelo puede tener consecuencias imprevistas, tales como la venta de abono de corral por los productores de menores recursos. El efecto de esto sería un incremento en la fertilidad y el contenido de carbono de algunos suelos mientras se degradan las áreas vecinas.

### MODELACIÓN DEL CARBONO DEL SUELO EN LAS ALDEAS EN ESTUDIO

Al modelo de agroecosistemas CENTURY se le definieron los parámetros utilizando datos del clima y el suelo. Para lograr su equilibrio se ejecutó comenzando con un sistema de pastos/bosque para representar la vegetación de esta región. Se incluyeron en el ciclo el pastoreo de baja densidad y los fuegos que ocurrían cada 30 años. Hace mil años, los efectos de la interferencia humana se introdujeron con eventos de tala y quema, conjuntamente con el cultivo de granos. La frecuencia de estos eventos se incrementó lentamente y hacia el comienzo del siglo XX se incluyeron períodos de cultivo de cuatro años de cada diez. A mediados del siglo XX, un año de barbecho con pastoreo fue seguido de cuatro años de cultivo (sorgo en «kharif», y caupí en «rabi»). El cultivo consistió de labranza a mano o arada con bueyes y la utilización de azada. El promedio de aplicaciones anuales de abonos de corral fue de 2,1 toneladas/ha durante un ciclo de cinco años y se cosechó todo el material superficial. En los últimos 30 años del siglo XX, se ajustó el cultivo para reflejar las prácticas actuales. El modelo RothC se ejecutó para establecer un equilibrio a mediados del siglo XX y luego se establecieron los parámetros utilizando las prácticas actuales y las cantidades de residuos vegetales calculados mediante el modelo CENTURY.

Los datos de cinco tipos de finca y localidades se presentan a continuación:

- i. finca extensa en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Lingampally);
- ii. finca pequeña en tierras áridas, sin ganado (Lingampally);
- iii. finca extensa con uso de riego (Yedakulapaly);
- iv. finca pequeña en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Metalkunta);
- iv. finca pequeña en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Malligere).

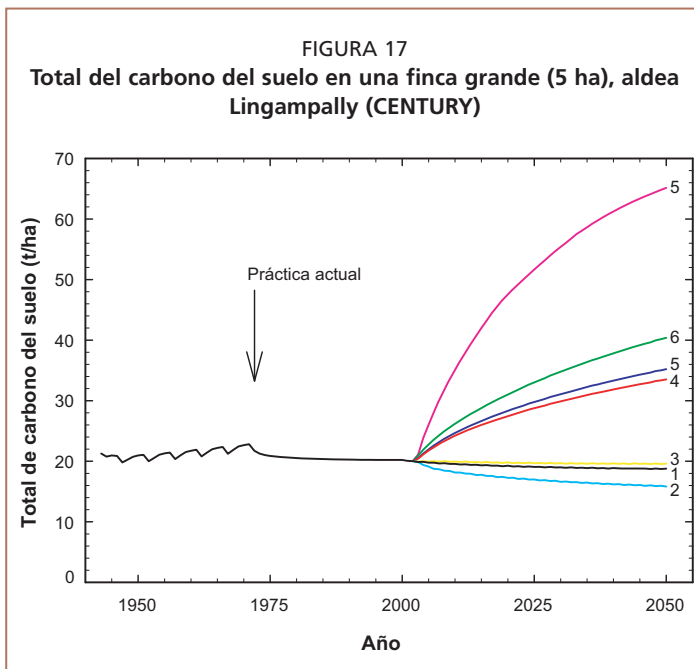
**i. Análisis del manejo de la tierra en una finca grande de explotación mixta, aldea Lingampally, distrito Medak**

Es una propiedad de algo más de cinco hectáreas sobre suelos predominantemente vertisoles. El ganado se alimenta con forraje y residuos vegetales de los campos. Por lo tanto, ningún material vegetal se devuelve al suelo. A los animales también se les permite pastar en las tierras locales. El ganado suministra estiércol (2-3 toneladas/ha/año). El fertilizante inorgánico se ha utilizado en los años recientes (30-45 kg/ha de fosfato di-amónico). Los cultivos sometidos a modelación son sorgo («kharif», de mayo a septiembre) y caupí («rabi», de octubre a enero).

El modelo CENTURY predice que la práctica agrícola actual está dando como resultado un contenido de carbono del suelo casi estable, de alrededor de 19 toneladas/ha, con una disminución en el año 2050 a casi 1,5 toneladas/ha (Figura 17). El modelo RothC muestra un contenido total de carbono del suelo más bajo, de 16 toneladas/ha en el año 2000, disminuyendo a 15 toneladas en el 2050 (Cuadro 20). Los escenarios que se muestran en la Figura 17 (detallados en el Cuadro 21) comparan las prácticas actuales con las aplicaciones de fertilizantes inorgánicos, abonos de corral, abonos verdes, composte de lombrices, residuos vegetales incorporados al suelo y el cultivo de árboles. La Figura 18 indica la variación promedio anual en el carbono del suelo en un período de 50 años.

**Efecto de los fertilizantes inorgánicos**

Si se detuviera la aplicación de fertilizante inorgánico y se incrementara la aplicación de abonos orgánicos para reemplazar la aplicación de nitrógeno y mantener los rendimientos (incrementar la aplicación de abono en alrededor de 0,6 toneladas/ha, Escenario 3), el carbono del suelo se incrementaría en solo 0,85 toneladas/ha para el 2050 (Figura 17) y no habría ganancia neta del carbono del suelo (Figura 18). Por el contrario, reemplazar todas las aplicaciones orgánicas con fertilizante inorgánico daría



Escenarios descritos en el Cuadro 21.

**CUADRO 20**  
Carbono total del suelo en una finca grande de la aldea Lingampally

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	20,2	18,8	-7,2	18,3	17,9	-2,3
4		33,5	65,9		28,3	54,2
6		40,4	100		31,0	68,8

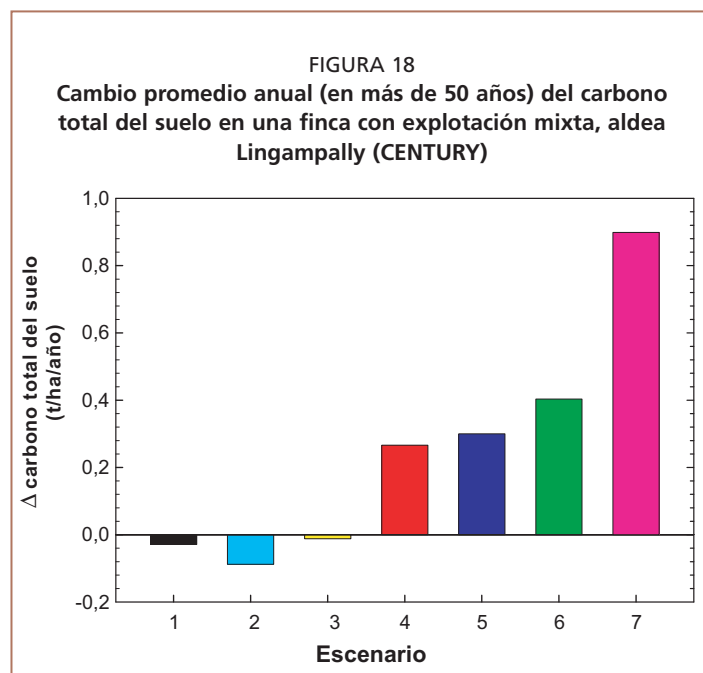
<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 21.

Fuente: CENTURY y RothC.

**CUADRO 21**  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra en una finca grande en la aldea de Lingampally

Escenario	Manejo de tierra
1	Práctica actual
2	AC 3 t/ha/año
3	AC 3 t/ha/año, abono verde 500 kg/ha/año, composte de lombrices 250 kg/ha/año
4	Como la práctica actual pero incorpora los residuos de suelo
5	AC 3 t/ha/año, dejar los residuos de las plantas
6	AC 3 t/ha/año, residuos de plantas, abono verde, composte de lombrices
7	AC 6 t/ha/año, residuos de las plantas, abono verde, composte de lombrices

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 21.

como resultado una disminución en el carbono del suelo de más de cuatro toneladas/ha para el 2050, una pérdida de 0,09 toneladas/ha/año (Escenario 2). De esta forma, el fertilizante inorgánico genera una caída en el carbono del suelo.

#### *Efecto del abono de corral*

Duplicar la aplicación actual de abonos de corral en un año, a 4-6 toneladas/ha (Escenario 4) sin aplicar fertilizante inorgánico tiene un efecto marcado sobre el carbono del suelo: se fijan 0,27 toneladas/ha/año en los próximos 50 años (Figura 18), sin que el sistema se encuentre todavía en un punto de equilibrio (Figura 17). De manera similar, el modelo RothC muestra un incremento continuo, alcanzando 28,3 toneladas/ha, aproximadamente en el mismo tiempo (Cuadro 20).

#### *Efecto de otros insumos orgánicos*

Adicionar solamente cantidades modestas de vermicompost (100 kg/ha) y abono verde (250 kg/ha) además de duplicar el abono de corral (Escenario 5) tiene un efecto limitado, mientras que aplicar dos toneladas/ha de residuos vegetales hace una mayor contribución, 0,4 toneladas/ha/año (Figura 18).

#### *Efecto de los árboles*

Esta finca tiene la capacidad de introducir árboles fijadores de nitrógeno, tales como *Glyricidia*, que crea el Escenario 7 cuando se le adiciona como práctica al abono y los residuos vegetales. Luego de 10 años, los árboles se cortan anualmente para obtener madera. El resultado es un incremento muy significativo en la captura de carbono con 0,4 toneladas/ha/año (Figure 18). Este incremento excede en unas cuatro veces el que se obtendría mediante el incremento de la aplicación de abono.

#### *Resumen*

Los dos modelos para el carbono del suelo muestran resultados muy similares para este sistema agrícola. La práctica actual es casi sostenible y muestra solo una pequeña disminución (< 2 por ciento) en el carbono del suelo como pronóstico para los próximos 50 años. Sin embargo, actualmente el ganado está pastando sobre otro suelo y por consiguiente, parte del carbono está siendo extraído de otro lugar.

Se requeriría un incremento modesto del material orgánico para remplazar los fertilizantes inorgánicos que se usan actualmente. Aplicaciones orgánicas adicionales podrían incrementar la captura de carbono del suelo de manera sustancial. La introducción de árboles es probable que tenga un efecto marcado sobre el carbono del suelo e incrementaría de forma simultánea el almacenamiento de carbono en la parte superior de las plantas.

Sin embargo, puede haberse introducido una mayor proporción de árboles que los que resultan factibles para el modelo y, por lo tanto, podría sobreestimarse el grado de secuestro de carbono que puede llevarse a cabo de forma efectiva en este sistema



**ii. Análisis del manejo de la tierra en una finca pequeña en un sistema de secano, aldea Lingampally, distrito Medak**

Esta propiedad tiene menos de una hectárea y el vertisol está muy degradado. En el pasado se criaron animales, pero luego fueron vendidos y actualmente el sorgo es el único cultivo importante. Todo el follaje es cosechado y sacado del campo. Se aplica abono de corral en diferentes momentos, equivalente a 3,9 toneladas/ha/año.

El modelo CENTURY muestra como las prácticas actuales han producido un declive marcado en el carbono del suelo, alcanzando alrededor de 13 toneladas/ha en el 2000 (Figura 19). Sin embargo, el sistema está alcanzando su punto de equilibrio y no se pronostica que la práctica actual de manejo de la tierra cause una disminución adicional del carbono del suelo en los próximos 50 años. El modelo RothC refleja un contenido de carbono ligeramente más alto en el 2000, pero pronostica un declive ligeramente mayor (1,8 toneladas/ha) para el 2050 (Cuadro 22).

**Efecto de los residuos retenidos**

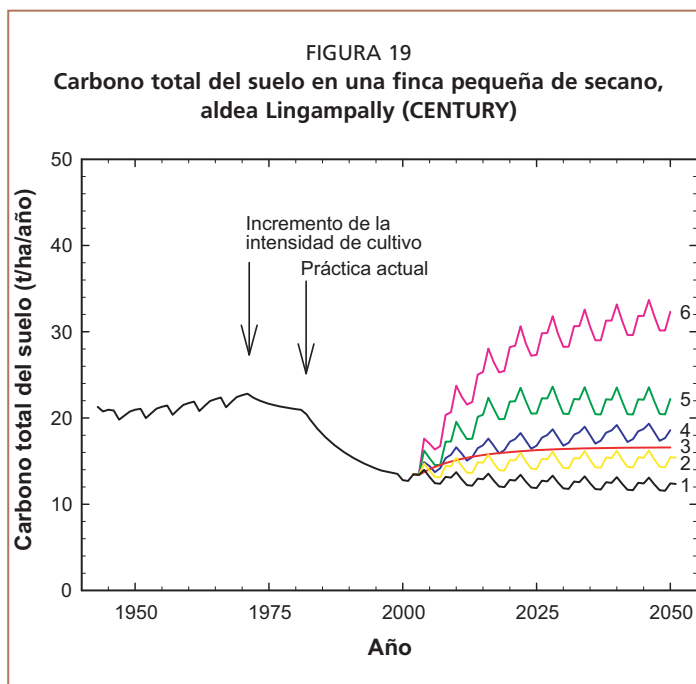
Cosechar solo los granos y luego incorporar los residuos de cultivo al suelo produciría un balance positivo de carbono, fijando 0,05 toneladas/ha/año (Figura 20 y Escenario 2, Cuadro 23).

**Efecto del abono de corral**

Incrementar la aplicación de abono de corral en un 50 por ciento a seis toneladas/ha/año incrementaría el carbono del suelo en alrededor de 3,8 toneladas/ha para el año 2050 (Figura 20 y Escenario 3). El modelo RothC pronostica un incremento de 3,0 toneladas/ha.

**Efecto de los cultivos de leguminosas**

Adicionar caupí a la rotación (cuatro toneladas de abono de corral/ha, cosechar solamente el grano, Escenario 4) fijaría 0,12 toneladas/ha/año. Introducir árboles fijadores de nitrógeno (cortarlos cada dos años después de los primeros 10 años) para el sistema sorgo como único cultivo, con abono orgánico a razón de cuatro toneladas/ha, produciría una tasa de retención de 0,19 toneladas/ha/año (Escenario 5).



Escenarios descritos en el Cuadro 23.

**CUADRO 22**  
**Carbono total del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	12,77	12,41	-2,8	16,07	14,92	-7,2
3		16,58	29,8		19,11	18,9

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 23.  
Fuente: CENTURY y RothC.

**CUADRO 23**  
**Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally**

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Solo cosecha de granos
3	AC 6 t/ha/año
4	Inclusión de leguminosas (caupi)
5	Inclusión de árboles, ej, <i>Glyricidia</i>
6	Todos los agregados

AC - Abono de corral.

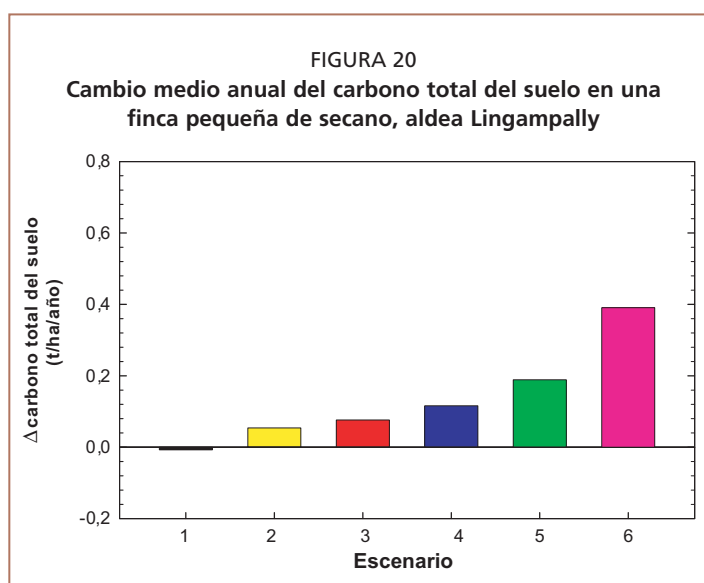
Combinar todos los tratamientos conduciría a una tasa de captura de carbono de 0,39 toneladas/ha/año (Escenario 6, Figura 20).

### Resumen

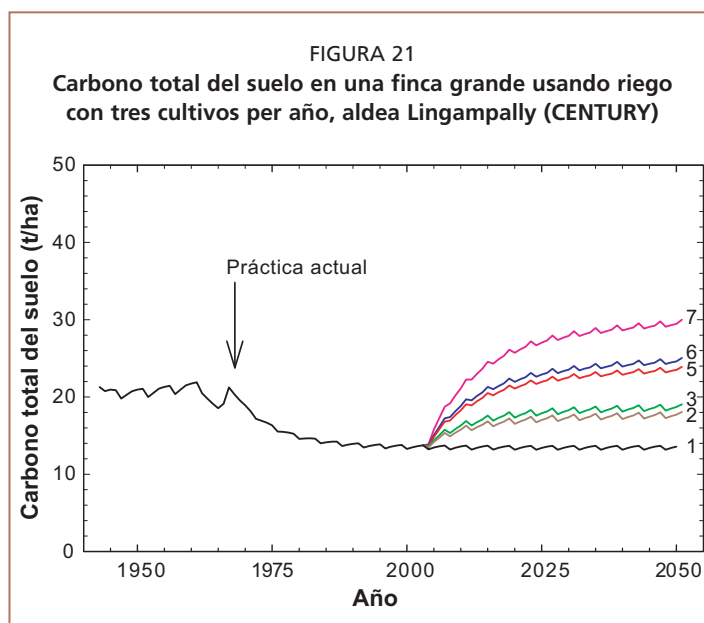
La modelación sugiere que la pérdida de carbono del suelo puede revertirse en este tipo de finca, incluso sobre el suelo degradado. Además de las aplicaciones directas, este ejemplo ilustra la importancia de los cultivos de leguminosas y la inclusión de árboles como *Glyricidia*.

### iii. Análisis del manejo de la tierra en una finca grande con uso de riego, aldea Yedakulapaly, distrito Medak

La finca comprende 4,5 ha de Vertisol con riego. El agua se bombea desde un pozo. Para los propósitos de modelación, se aplicaron cinco cm de agua cuando la capacidad de retención del suelo es < 25 por ciento durante el estado de crecimiento vegetativo del cultivo. Originalmente se criaba ganado, pero se vendió hace algunos años, debido a que no había suficiente personal para cosechar el forraje y atender al ganado durante el pastoreo. Actualmente, sólo se emplean fertilizantes inorgánicos –650 kg/ha/año de fosfato diamónico y 150 kg/ha/año de urea. Los cultivos se siembran en las tres estaciones (verano-sorgo, «Kharif» –leguminosas, «rabi»– leguminosas) y todo el material superficial se cosecha y se retira del campo. Para los propósitos de la modelación se utilizó caupí como cultivo de leguminosa.



Escenarios descritos en el Cuadro 23.  
Fuente: CENTURY y RothC.



El modelo CENTURY calculó que las prácticas actuales han agotado el carbono del suelo hasta 13,26 toneladas/ha y predice que no habrá una reducción adicional en los próximos 50 años (Figura 21).

El modelo CENTURY calculó que las prácticas actuales han agotado el carbono del suelo hasta 13,26 toneladas/ha y predice que no habrá una reducción adicional en los próximos 50 años (Figura 21).

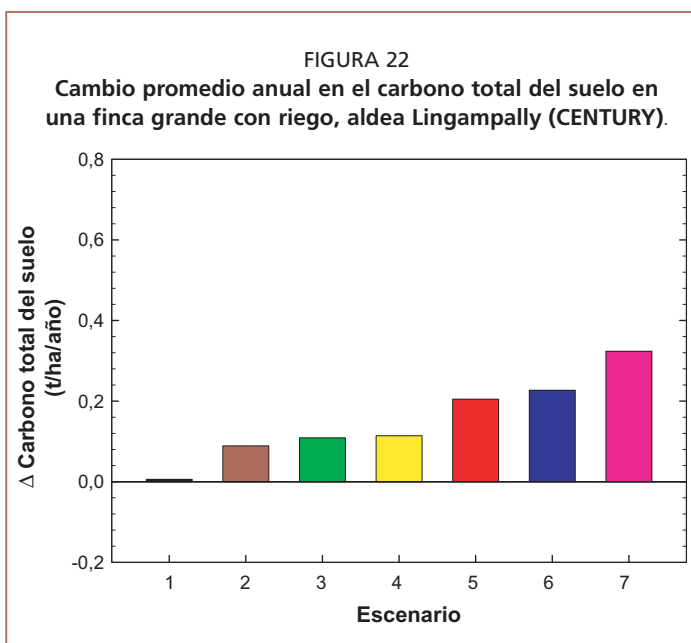
### Efecto de aplicaciones orgánicas

Adicionar tres toneladas de abono de corral/ha/año como en el Escenario 2 (Cuadro 24) incrementaría el carbono del suelo en 4,4 toneladas/ha para el 2050, fijando 0,09 toneladas/ha/año (Figura 22). Incluir 500 kg/ha/año de abono verde y 250 kg/ha/año de composte de lombrices (Escenario 3) incrementaría el carbono orgánico del suelo en una tonelada más, fijando 0,11 toneladas/ha/año (Figura 21). Un incremento similar en el carbono del suelo puede

obtenerse sin aplicaciones orgánicas extra, cosechando el grano y devolviendo los residuos vegetales al suelo (Figura 22). Cuando se aplican tres toneladas de abono de corral/ha/año y solo se cosecha el grano (Escenario 5), el carbono del suelo se incrementa en más de 10 toneladas/ha para el 2050, equivalente a 0,20 toneladas/ha/año. Realizar todas las aplicaciones orgánicas e incrementar el componente de abono de corral a seis toneladas/ha, fijaría 0,32 toneladas/ha/año.

**Resumen**

Una combinación de dejar los residuos del cultivo y añadir estiércol podría hacer una contribución significativa al carbono del suelo en este tipo de sistema de producción agropecuaria, en los cuales las prácticas actuales han causado un declive significativo en su contenido de carbono. Sin embargo, el fertilizante inorgánico y el riego continúan teniendo un costo de carbono, dando como resultado incrementos menos significativos en los diferentes escenarios. Las aplicaciones de abono de corral pueden compensar los nutrientes aplicados en los fertilizantes inorgánicos. Por ejemplo, eliminar el fertilizante inorgánico del Escenario 6 mantiene el rendimiento sin afectar el carbono del suelo. Eliminar el riego del escenario anterior no tiene un efecto perjudicial sobre el carbono del suelo, pero aparentemente tampoco parece haber un efecto sobre el rendimiento.



Escenarios descritos en el Cuadro 24

CUADRO 24

Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una finca grande de secano, aldea Lingampally

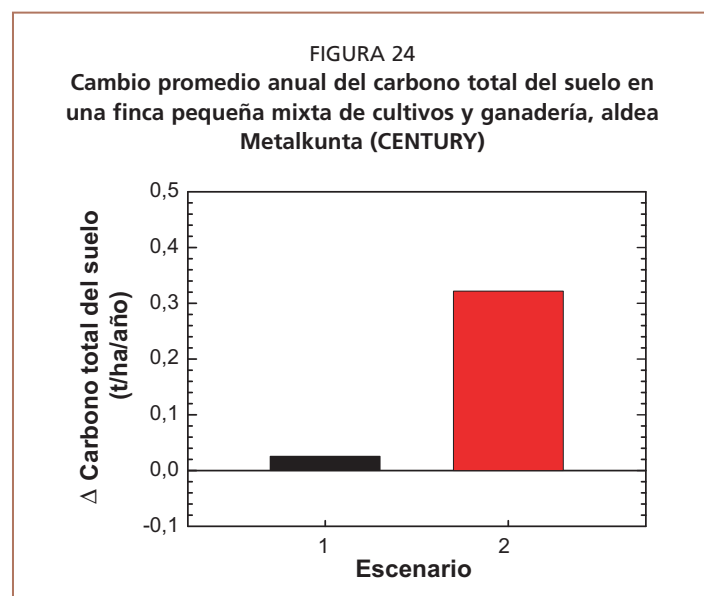
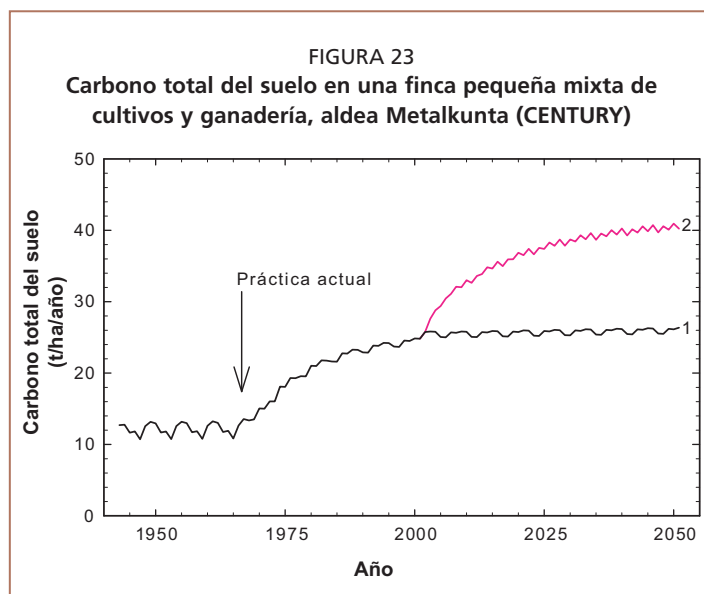
Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	AC 3 t/ha/año
3	AC 3 t/ha/año, abono verde 500 kg/ha/año + composte de lombriz 250 kg/ha/año
4	Como 1 + incorporación de residuos al suelo
5	AC 3 t/ha/año, dejar residuos de plantas
6	AC 3 t/ha/año, residuos plantas + abono verde + composte de lombriz
7	AC 6 t/ha/año, residuos plantas + abono verde + vermi compost

AC - Abono de corral.

**iv. Análisis del manejo del suelo en una finca pequeña con mezcla de cultivos y ganado, aldea Metalkunta, distrito Medak**

Esta propiedad de 2,7 ha tiene una gran variedad de cultivos sobre suelos rojos lateríticos. Hay ganado como parte de la propiedad, se practica un buen programa de siembra y también hay árboles alrededor de la finca. Se cosecha toda la producción sobre la superficie, de manera que los residuos vegetales puedan suministrarse como alimento a los animales. El ganado también pasta en tierras cercanas y el forraje se trae de otros lugares. La aplicación promedio anual de abono orgánico es de dos toneladas/ha y a la tierra se le añade composte de lombriz.

Al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros con una rotación de sorgo-caupí-mijo-caupí-maíz-caupí para reflejar el variado programa de cultivos. El modelo se ejecutó con este escenario desde finales de la década de 1960 y sugiere que este sistema de manejo de la tierra habría duplicado aproximadamente el contenido de carbono en el suelo a 25 toneladas/ha para el año 2000 y alcanzaría 26 toneladas de C/ha



CUADRO 25

**Contenido total de carbono del suelo en una pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	24,9	26,1	5,2	25,0	29,2	16,7
2		40,9	64,7		49,2	96,6

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 26.

Fuente: Modelos CENTURY y RothC.

para el 2050 (Figura 23). El modelo RothC estima unas 25 toneladas de C/ha en el 2000, incrementándose a 29,1 toneladas/ha en el 2050 (Cuadro 25 y 26). Este sistema con la integración de cultivos y ganado tiene un impacto positivo sustancial sobre el carbono del suelo.

#### *Efectos de la retención de residuos de cultivos*

La incorporación de los residuos de cultivos al suelo (Escenario 2) incrementaría significativamente el contenido de carbono, secuestrando 0,3 toneladas de carbono por ha/año en los próximos 50 años (Figura 24) y el contenido de carbono del suelo alcanzaría las 40,9 toneladas para el año 2050. El modelo RothC calcula que dejar los residuos de cultivos incrementaría el carbono del suelo a 49,2 toneladas/ha (Cuadro 25).

#### *Resumen*

El productor practica actualmente un buen manejo de la tierra y los modelos calculan que el contenido de carbono del suelo se ha incrementado ya de manera sustancial. Sin embargo, esto se está logrando en parte mediante el pastoreo del ganado sobre las tierras y el hecho de traer el forraje desde afuera. Esto significa que el carbono está siendo extraído de manera efectiva desde otra parte. De esta manera, aunque incorporar los residuos de cultivo al suelo hace una contribución posterior al carbono del suelo, esto requeriría traer más forraje para sustituir los residuos vegetales, lo cual implica nuevamente la extracción de carbono.

#### **v. Análisis del manejo de la tierra en una finca pequeña, aldea Malligere, distrito Tumkur, estado de Karnataka**

Esta finca cubre dos hectáreas en un suelo arenoso rojo. Para el transporte se alquilan tractores, se mantiene el ganado y a éste se le permite alimentarse de los residuos de los cultivos, pero se trae forraje adicional. Los cultivos «kharif» modelados son el sorgo y el mijo y el cultivo «rabi» es el caupí. Como promedio, se aplican tres

se alquilan tractores, se mantiene el ganado y a éste se le permite alimentarse de los residuos de los cultivos, pero se trae forraje adicional. Los cultivos «kharif» modelados son el sorgo y el mijo y el cultivo «rabi» es el caupí. Como promedio, se aplican tres

toneladas/ha/año de abono de corral. También se utilizan fertilizantes inorgánicos: 75 kg/ha/año de fosfato di-amónico y 75 kg/ha/año de urea.

La simulación con el modelo CENTURY muestra que las prácticas actuales están incrementando el carbono del suelo y que este continuará elevándose hasta unas 2,7 toneladas/ha en los próximos 50 años, alcanzando casi 20 toneladas de C/ha en el 2050 (Figura 25). El modelo RothC también muestra que la práctica actual está incrementando el carbono del suelo. El carbono del suelo en el año 2000 se predice que será de 19,8 toneladas/ha, elevándose hasta 24,3 toneladas/ha en el año 2050 (Cuadros 27 y 28).

**Efecto de las aplicaciones orgánicas**

El fertilizante inorgánico tiene un costo de carbono, por lo que reemplazar el nitrógeno suministrado captura carbono a 0,17 toneladas/ha/año. El nivel de carbono del suelo alcanza 25,7 toneladas en el 2050 (Figura 26, Escenario 2 en el Cuadro 27). El modelo RothC predice un efecto mucho mayor sobre el carbono orgánico del suelo al reemplazar el fertilizante con abono de corral: se pronostica que el carbono del suelo se eleve hasta 34,2 toneladas/ha para el año 2050.

**Efecto de los árboles**

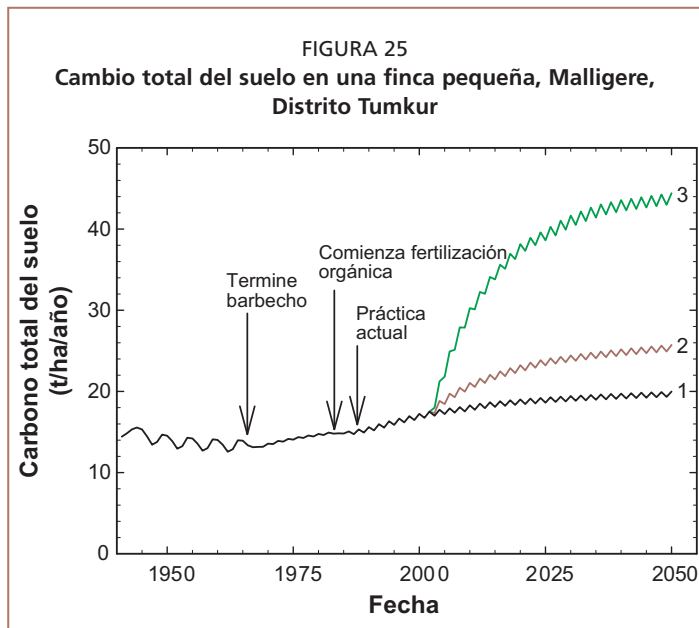
Los árboles, tales como *Glyricidia* (Escenario 3), son cosechados anualmente después de diez años para obtener madera. Añadir árboles produce una diferencia muy grande, incrementando la captura de carbono a 0,54 toneladas/ha/año (Figura 26).

**Resumen**

Ambos modelos muestran tendencias similares; el cambio de fertilizante inorgánico a orgánico incrementa el carbono del suelo de manera significativa. El modelo RothC predice un incremento mayor. El cese de las aplicaciones de fertilizante inorgánico elimina el balance negativo de carbono asociado con su producción, y la adición de árboles puede ser suficiente para compensar los ingresos de carbono que se generan del forraje obtenido fuera del sistema de la finca. Sin embargo, si se utilizan tractores para transportar el forraje, el balance de carbono del sistema probablemente será negativo.

**CUADRO 26**  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Residuos de hojas de plantas



Escenarios descritos en el Cuadro 28.

**CUADRO 27**  
Carbono total del suelo en una finca pequeña, aldea Malligere, Distrito Tumkur

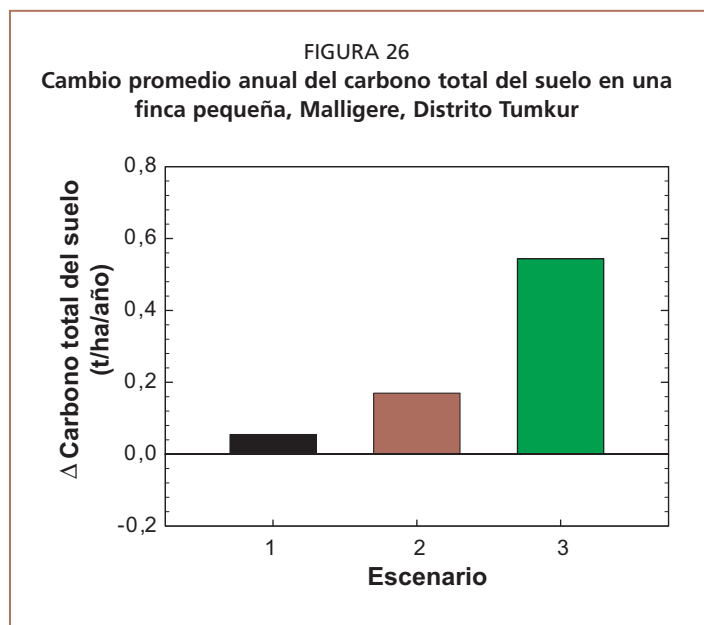
Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	17,24	19,97	15,8	19,82	24,32	22,7
2		25,73	49,2		34,2	72,6

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 28.  
Fuente: CENTURY y RothC.

**CUADRO 28**  
Escenarios para modelar practicas de manejo de la tierra en una finca pequeña, aldea Malligere

Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	Reemplazar fertilizante inorgánico con AC
3	Incluir árboles, Glyricidia

AC - Abono de corral



Escenarios descritos en el Cuadro 28.

### Conclusiones sobre los casos de la India

La modelación de los datos de las fincas para las tierras áridas de la India muestra que el contenido de carbono del suelo puede incrementarse con gran variedad de tecnologías y prácticas disponibles para los campesinos.

También muestra que algunas prácticas producen como resultado una disminución sustancial en el contenido de carbono, particularmente el uso de fertilizante inorgánico como la única fuente de nutrientes y el cultivo continuo de cereales. En la finca extensa (cinco ha) con tecnologías mixtas, el fertilizante inorgánico genera la pérdida de 0,1 toneladas/ha/año, mientras que el uso, tanto de abono de corral, como

de abono verde, vermicompost y/o residuos vegetales produce incrementos de 0,2-0,4 toneladas/ha/año.

La agroforestería incrementa sustancialmente el secuestro de carbono por debajo del suelo a 0,9 toneladas/ha/año. Los modelos muestran declives del carbono del suelo en las fincas pequeñas que cultivan solo sorgo y en aquellas que siembran tres cultivos con riego por año de manera intensiva – una pérdida de cinco toneladas de C/ha en un período de 25 años. Sin embargo, parece que estas caídas pueden revertirse en 5-10 años con la adopción de rotaciones con leguminosas, la aplicación de abono de corral y el cultivo de árboles.

La finca pequeña con tecnologías mixtas, con rotaciones de cereales y caupí y ganado, incrementa el carbono del suelo desde un contenido de 13 toneladas de C/ha a 24,8 toneladas de C/ha en 25 años. Este puede incrementarse hasta más de 40 toneladas de C/ha en los próximos 50 años si se adicionan residuos vegetales al suelo.

Para la cuantificación total del carbono utilizado o secuestrado en estas fincas, es importante considerar el alto costo de energía que se requiere para la elaboración del fertilizante nitrogenado (65,3 MJ/kg para el N, 7,2 MJ/kg para el fósforo, 6,4 MJ/kg para el potasio) (Pretty *et al.*, 2002), el uso de operaciones mecanizadas en las fincas, el costo del riego y el transporte mecánico y el aspecto relacionado con la transferencia de carbono en el alimento o del ganado mismo, desde una finca hacia otra o desde las áreas de pastoreo hacia los campos cultivados.

Existen beneficios evidentes para los productores y el carbono del suelo si se incluyen cultivos de leguminosas en las rotaciones y en los sistemas agroforestales.



## Estudio de caso 3

# Kenya – distrito Makueni

Las tierras áridas y semiáridas ocupan alrededor de dos tercios de la superficie de Kenya (FAO, 1999b). Los factores principales que limitan el desarrollo de los cultivos en estas áreas son las lluvias erráticas, el mal manejo del ganado y la decadente fertilidad del suelo causada por el cultivo continuo (Kenya Agricultural Research Institute, 1999). El Instituto de Investigaciones sobre las Tierras Áridas ha examinado la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en la región semiárida de Kenya, registrando los aspectos físicos del ambiente conjuntamente con las prácticas de manejo de la tierra en cuatro aldeas del distrito Makueni (Mbuji, 2000). Estas abarcan un conjunto de fechas de establecimiento entre las décadas de 1950 y 1970. Un problema de gran importancia para la agricultura en esta región ha sido la frecuencia con la que ha sido afectada por la sequía. Las sequías reducen las ganancias de los agricultores y, por consiguiente, tienen escasos incentivos para realizar inversiones en la fertilidad del suelo.

### ATRIBUTOS FÍSICOS

El clima de esta región se caracteriza por dos períodos lluviosos: las lluvias cortas, que producen la mayor parte de las precipitaciones en octubre-diciembre y las lluvias largas de marzo-mayo. Sin embargo, dentro del promedio de lluvia anual (600-670 mm) está la ocurrencia periódica de sequías (Gichuki, 2000). La temperatura media anual está en el rango de 21-24 °C. La altitud es de 800-1 600 m, y la vegetación natural es de praderas y tierras densamente pobladas de arbustos o bosques. El fuego afectó el área en el pasado y las praderas se utilizan para el pastoreo. Los suelos mayormente son ferrasoles (ródicos y xánticos) y naturalmente poseen bajo contenido de fósforo (Mbuji, 2000).

### SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Se practica el cultivo múltiple anual con la incorporación ocasional de barbechos de un año, aunque este último es cada vez menos común. Cada año hay dos campañas de siembra. Los cultivos principales son maíz y leguminosas para grano seco, con el mijo y el sorgo recomendados como cultivos de época seca. Los rendimientos varían considerablemente entre los distintos años dependiendo de la lluvia; como promedio el maíz produce una tonelada/ha, aunque las variedades modernas producen cuatro toneladas/ha (Mbogoh, 2000).

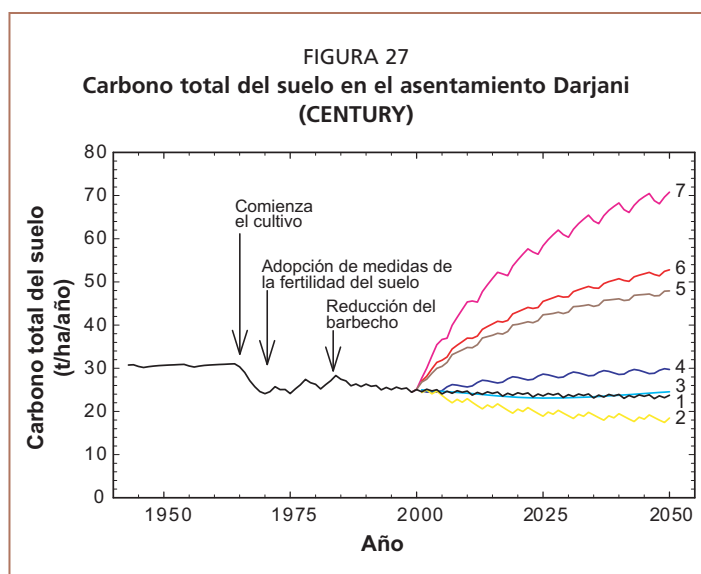
La población animal no es grande debido a que resulta difícil alimentarla adecuadamente durante los períodos de sequía. En consecuencia, el estiércol es muy escaso y muy valioso; en razón de esta escasez su aplicación a menudo se hace en forma rotativa. Se realizan pocas inversiones en las tierras de pastoreo y los animales se mantienen usualmente en corrales durante la época de lluvia. Se utilizan pocos fertilizantes, especialmente debido a que en la época de sequía causan «quemaduras» en los cultivos. Los residuos de cultivos son quemados, se les suministran a los animales como alimentos o se incorporan al suelo. La labranza se hace con arados simples tirados por bueyes; el uso del azadón y palas para cavar son también comunes. La fuerza de trabajo es escasa y constituye una limitación para los campesinos. Se utilizan un conjunto de técnicas de manejo de los residuos de los cultivos y de labranza para conservar la humedad y para proteger los suelos contra la erosión (Pretty, Thompson y Kiara, 1995; Gichuki, 2000).

Los bosques están siendo eliminados, aunque la tala selectiva se practica con frecuencia para salvar aquellas especies que suministran productos útiles. Muchos

campesinos también plantan árboles, especialmente frutales y otros como la morera para la producción de gusanos de seda (Gichuki, 2000). Las aldeas en estudio están ubicadas a lo largo de un gradiente de precipitación, que decrece desde Kymausoi a través de Kaiani y Darjani, hasta Athi Kamunyuni. El modelo CENTURY se ejecutó para establecer su equilibrio, utilizando un escenario de praderas – árboles con quema de pastos cada 10 años y fuegos más extensos cada 30 años.

### i. Darjani

Los cultivos principales en este asentamiento son: mijo, henequén, caupí y sorgo y el pasto natural puede sostener un pastoreo de baja intensidad. El establecimiento de la aldea tuvo lugar en la década de 1960. El contenido promedio de carbono en los suelos donde se encuentran los arbustos es de  $37,6 \pm 7,5$  toneladas/ha y para los suelos cultivados es de  $33,7 \pm 2,8$  toneladas/ha (Mbuvi, 2000).



Escenarios descritos en el Cuadro 30

CUADRO 29

#### Carbono total del suelo en el asentamiento de Darjani

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	25,04	23,74	-5,2	34,57	34	-1,6
5		47,92	91,4		59,3	71,5
6		52,79	110,8		65,67	90,0

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 30.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 30

#### Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, asentamiento Darjani

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Remoción del barbecho
3	Solo fertilizante inorgánico, quema de residuos, sin barbecho
4	Solo fertilizante inorgánico, quema de residuos, barbecho
5	AC 4,5 t/ha/año, quema de residuos, barbecho
6	AC 4,5 toneladas/ha/año, sin quema de residuos, barbecho
7	AC 6,75 t/ha/año, sin quema de residuos, barbecho

AC - Abono de corral.

Una ejecución del modelo CENTURY para establecer su equilibrio suministró un valor de carbono del suelo de 31,0 toneladas/ha en 1964. Este se encuentra justamente dentro del rango esperado para los suelos vírgenes. El modelo se ejecutó luego para unos 35 años adicionales, reproduciendo el manejo actual del suelo. Este comenzó con un ciclo de seis años de cultivos alternos de maíz y mijo durante cuatro años, seguido de dos años de barbecho. La labranza se hizo con arado de reja y el deshierbe fue manual. Los residuos de cultivo se quemaron. En 1971, comenzaron las aplicaciones de abono de corral, promediando 1,5 toneladas/ha en un ciclo de seis años y comenzaron a adoptarse las medidas de conservación. En 1983, el período de barbecho se redujo a un año de cada seis y para el 2000 el carbono del suelo modelado fue de 24 toneladas/ha (Figura 27). Esta reducción de siete toneladas/ha a partir del nivel modelado para el suelo vírgen no cultivado, es mayor que la disminución de cinco toneladas/ha medida en el campo. La continuación de esta práctica de manejo lleva a predecir una pérdida adicional de 1,3 toneladas de C/ha para el año 2050 (Figura 27 y Cuadros 29 y 30).

El modelo RothC se ejecutó para establecer su equilibrio, utilizando el nivel actual del carbono de un suelo de arbustos y luego se utilizó para predecir el efecto de manejo

de la tierra utilizando insumos de las plantas, calculados mediante el modelo CENTURY. El modelo RothC predijo que el carbono del suelo sería 34,6 toneladas/ha en 1999, el cual se encuentra dentro del valor medido de una tonelada/ha. En los próximos 50 años, el modelo RothC pronostica una disminución adicional de 0,6 toneladas de C/ha (Cuadro 29).

#### *Efecto de la eliminación del barbecho*

El modelo CENTURY predice que eliminar el barbecho de la práctica actual daría como resultado una reducción del carbono del suelo (6,6 toneladas/ha) para el año 2050 (Escenario 2, Figura 27).

#### *Efecto de los abonos orgánicos*

Añadir un promedio de 4,5 toneladas/ha/año de abono de corral durante el ciclo de cultivo – barbecho de seis años, conduce a una tasa de secuestro de carbono de 0,5 toneladas/ha/año (Escenario 5, Figura 28). Si se incorporan los residuos de cultivo al suelo en lugar de ser quemados, unas 4,9 toneladas de C/ha adicionales pueden acumularse para el 2050, representando una tasa de retención de 0,6 toneladas/ha/año (Figura 27 y 28). El modelo RothC predice incrementos similares (Cuadro 29). El incremento de las aplicaciones de abono de corral a 6,75 toneladas/ha/año elevaría la tasa de retención a 0,9 toneladas/ha/año (Figura 28).

#### *Efecto del fertilizante inorgánico*

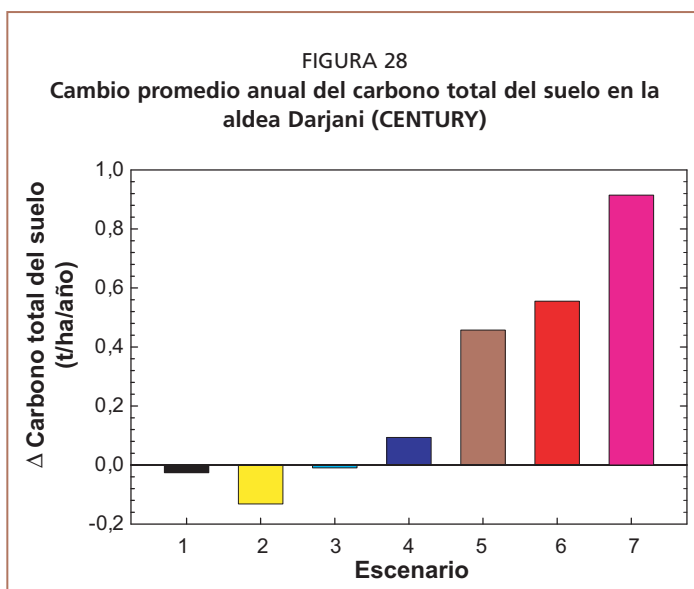
El reemplazo de todas las aplicaciones orgánicas con fertilizante inorgánico (100 kg de N/ha/año, Escenario 4) da como resultado solo un incremento moderado en el secuestro de carbono del suelo (0,09 toneladas/ha/año). Sin embargo, la cantidad de nitrógeno aplicado es equivalente a alrededor de cinco veces la que se añadió en el abono de corral para el escenario de prácticas agrícolas actuales. Si el período de barbecho se elimina y solo se añade fertilizante inorgánico (Escenario 3), el sistema se comporta en forma muy similar al escenario de las prácticas actuales, a pesar del nitrógeno adicional.

#### *Resumen*

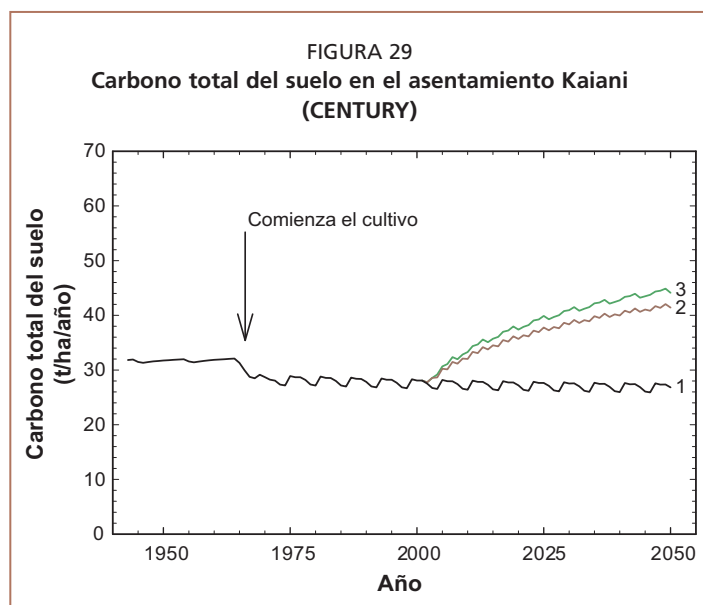
La importancia del abono de corral como un insumo orgánico está demostrada, de la misma forma que lo es la incorporación de residuos al suelo en lugar de quemarlos. Aunque la adición de fertilizante inorgánico puede incrementar el secuestro de carbono, la elevación del carbono por unidad de nitrógeno añadida es mucho menos eficiente que si se añade el abono de corral. La energía indirecta contenida en el fertilizante nitrogenado constituye un costo adicional de carbono.

#### **ii. Kaiani**

El asentamiento de Kaiani tiene un sistema agrícola similar al de Darajani. El modelo CENTURY subestimó el contenido bruto actual del carbono del suelo en casi 32 toneladas/ha comparado con los valores medidos de  $41,5 \pm 3,1$  toneladas/ha. El modelo CENTURY se ejecutó nuevamente con un escenario para reflejar los últimos



Escenarios descritos en el Cuadro 30.



CUADRO 31

**Carbono total del suelo en la aldea de Kaiani**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	28,07	26,81	-4,5	42,32	43,89	3,9
2		41,4	47,5		62,82	48,8
3		42,73	52,2		65,16	54,3

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 32.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 32

**Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, aldea Kaiani**

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	AC 2 t/ha/año
3	AC 2 t/ha/año, residuos de plantas 0,3 t/ha/año

Abono de corral.

El modelo RothC predice incrementos proporcionales muy similares en el carbono del suelo (Cuadro 31).

**Resumen**

Los modelos sugieren que el sistema actual está cerca o, de hecho, está en su punto de equilibrio. Es posible alcanzar tasas razonables de secuestro de carbono (0,3 toneladas/ha/año) con incrementos modestos en las aplicaciones de abono orgánico.

**iii. Kymausoi**

Kymausoi está situada en una zona algodonera marginal, donde se cultivan también maíz, frijol gandul y henequén. Se practica la cría de ganado y la aldea se estableció en la década de 1950. El promedio del contenido de carbono de los suelos vírgenes es de  $38,4 \pm 4,8$  toneladas/ha, mientras que para los suelos cultivados el promedio es de 33,5 toneladas/ha con un rango de 17,4–38,9 toneladas/ha. Se ejecutó el modelo de agroecosistemas CENTURY para establecer su equilibrio y suministró un nivel de

40 años de cultivo utilizando un sistema mijo-caupí, con pastoreo de los residuos vegetales y aplicación de 4,5 toneladas/ha de abono orgánico, una vez en el ciclo de seis años. Hubo un año de barbecho. Se calculó que la labranza había reducido el contenido de carbono del suelo a 28,1 toneladas/ha para el año 2000, el cual se comparó con el valor medido para un suelo cultivado de  $30,5 \pm 4,8$  toneladas/ha. Se predice que el contenido de carbono del suelo pueda decrecer a algo más de una tonelada/ha en los próximos 50 años (Figura 29, Cuadros 31 y 32).

Después del establecimiento de los parámetros del contenido de carbono para los suelos vírgenes, el modelo RothC muestra muy poco efecto de la labranza cuando se utilizan los insumos de las plantas calculadas por el modelo CENTURY. A diferencia del modelo CENTURY, el modelo RothC predice una ligera elevación en el carbono del suelo para el 2050 (Cuadro 31).

**Efecto de los insumos orgánicos**

Incrementos modestos en las dosis de aplicación de abono de corral (0,75 toneladas/ha/año a 2 toneladas/ha/año) dan como resultado una acumulación marcada de carbono en el suelo (Figuras 29 y 30). Añadir residuos vegetales adicionales incrementa mucho más aún la tasa de secuestro a 0,3 toneladas/ha/año.

carbono para los suelos vírgenes de 28,5 toneladas/ha en 1955, lo cual está por debajo de la concentración media para los suelos de esta área. El modelo se ejecutó después para reflejar el sistema agrícola desde que se estableció la aldea. Esto incluyó cultivo continuo de maíz con pastoreo de los residuos de cultivo y una dosis promedio de aplicación de abono orgánico de 0,75 toneladas/ha/año. El manejo de la conservación y fertilidad del suelo comenzó a finales de la década de 1960, incrementando la dosis de aplicación promedio de estiércol a una tonelada/ha para reflejar esto. El modelo CENTURY estimó el contenido de carbono del suelo en 17,6 toneladas/ha para el año 2000, el cual está entre los valores más bajos medidos. Se prevé que ocurra una disminución de menos de una tonelada de C/ha en los próximos 50 años.

**Efecto de los insumos orgánicos**

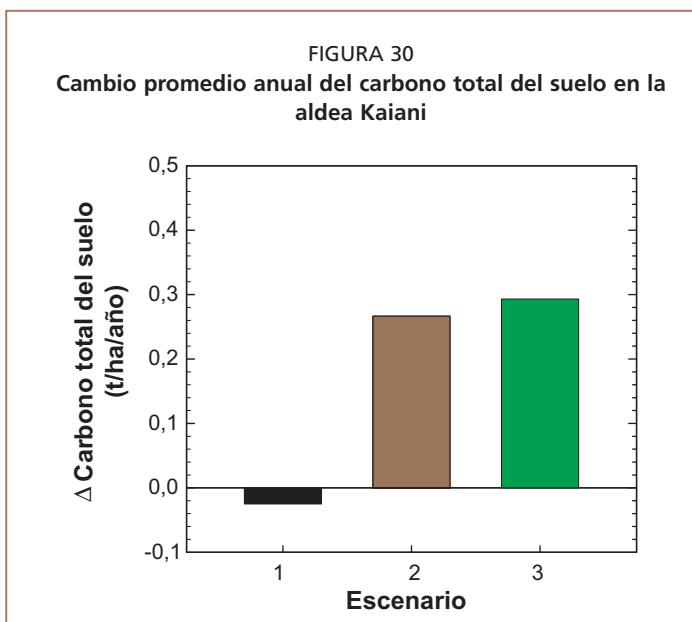
Aplicar residuos vegetales adicionales e incrementar la dosis de aplicación de abono de corral a 1,5 toneladas/ha/año (Escenarios 2 y 3) incrementará los niveles de carbono del suelo por lo menos en un 50 por ciento (Cuadro 33).

**Efecto de los cultivos de leguminosas**

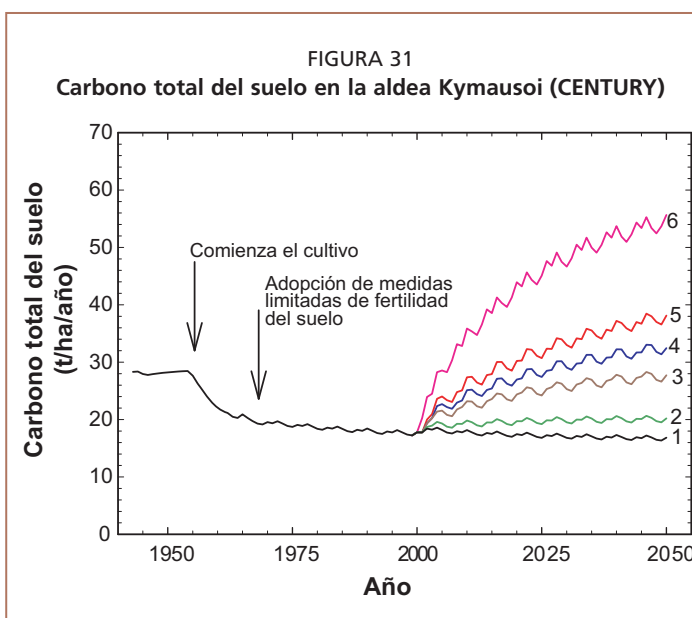
Introducir un cultivo de leguminosa como el caupí en el sistema, puede producir un mejoramiento significativo en la captura de carbono (Escenarios 4-6, Figuras 31 y 32), incrementando la tasa de 0,2 a 0,3 toneladas/ha/año con las mismas dosis de aplicación de abono de corral.

**Resumen**

Este ejemplo ilustra la ventaja de incluir cultivos de leguminosas en la rotación. Un sistema agrícola que utiliza cuatro toneladas/ha/año de abono de corral, manteniendo los residuos vegetales en el campo y con



Escenarios descritos en el Cuadro 32.

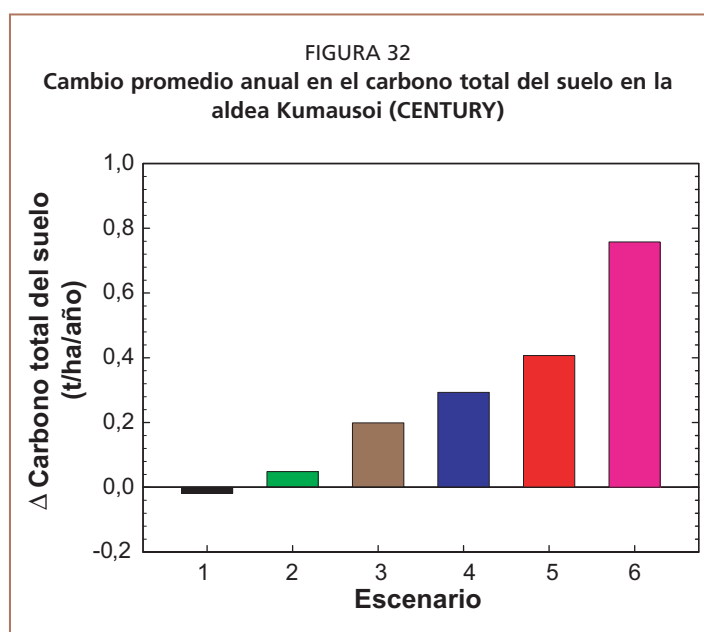


Escenarios descritos en el Cuadro 33.

**CUADRO 33**  
**Carbono total del suelo en la aldea Kymausoi**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	17,76	16,82	-5,3	35,69	34,79	-2,5
2		20,18	13,6		43,4	21,6
3		27,7	56,0		58,86	64,9

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 34.  
Fuentes: CENTURY y RothC



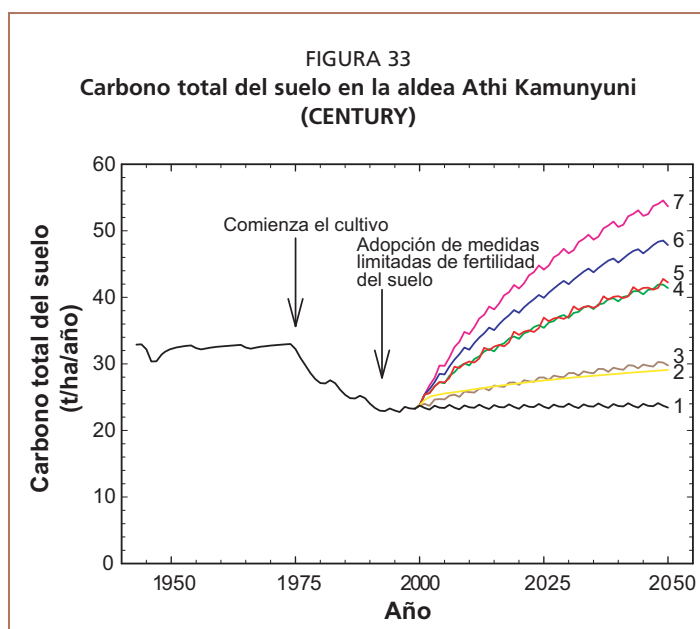
Escenarios descritos en el Cuadro 34.

**CUADRO 34**

**Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, asentamiento Kymausoi**

Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	Residuos de plantas 0,3 t/ha/año
3	AC 1,5 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año
4	AC 1,5 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)
5	AC 2 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)
6	AC 4 t/ha/año, residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 35

una leguminosa en la rotación, puede acumular 0,7 toneladas/ha/año. La práctica actual está reduciendo el contenido total de carbono del suelo.

#### iv. Athi Kamunyuni

Esta aldea está situada en una zona agroecológica ubicada en tierras bajas. Las fincas solo sustentan una baja densidad de animales de pastoreo y el área está en el límite para la producción de mijo, caupí y henequén de secano. El asentamiento se estableció en la década de 1970. Al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros para el comienzo del cultivo/pastoreo durante los últimos 30 años. Se sembró mijo y se aplicó un promedio de 0,75 toneladas/ha durante los últimos seis años.

El valor del carbono del suelo modelado por el sistema CENTURY coincidió con el nivel actual de los suelos vírgenes ( $33,2 \pm 3,2$  toneladas C/ha). El modelo CENTURY calculó que hubo una disminución en el carbono del suelo de alrededor de nueve toneladas/ha después de 25 años del comienzo del asentamiento. Este es un valor muy cercano a las mediciones actuales que muestran que los suelos cultivados contienen  $24,0 \pm 3,0$  toneladas de C/ha. Continuando este escenario en el siglo XXI resulta que el sistema casi ha alcanzado un nuevo estado de equilibrio (Figura 33). El modelo RothC calcula un efecto más bajo de la labranza sobre el carbono del suelo, prediciendo un valor de 29,7 toneladas de C/ha en el 2000 y una ligera disminución en los próximos 50 años (Cuadros 35 y 36).

#### Efecto de los insumos orgánicos

Incrementar la dosis media actual de aplicación de abono de corral de 0,75 toneladas/ha/año a 1,25 o 2,25 toneladas/ha/año (Escenario 3 y 4) incrementa las tasas de secuestro de carbono en 0,12 – 0,37 toneladas/ha/



año (Figura 33 y 34). Si se dispone de abonos orgánicos adicionales para posteriores aplicaciones se podría producir un incremento en las tasas de secuestro de carbono de hasta 0,6 toneladas/ha/año.

**Efecto de los barbechos**

Reducir el período de barbecho de dos años a uno (Escenario 5) tiene muy poco efecto sobre el carbono del suelo, suponiendo que se mantengan los insumos orgánicos. Usar esta región solamente para la cría de animales daría como resultado un incremento en el carbono del suelo puesto que el sistema retornó a condiciones similares que existían antes de comenzar la labranza (Escenario 2). La tasa de captura de carbono es muy similar a la del Escenario 3, donde se añadió un promedio de 1,25 toneladas/ha de abono de corral anualmente. El modelo RothC predice un incremento mucho menor en el carbono del suelo cuando se retorna a la cría de ganado. Esto refleja el hecho de que este modelo inicialmente calculó una disminución menor en el total de carbono del suelo, después del inicio de la labranza.

**Resumen**

El nivel de carbono del suelo en este sistema recientemente establecido, podría restablecerse a los niveles iniciales y luego elevarse más mediante la aplicación de abono de corral. Las condiciones en esta localidad no son ideales para la labranza y un retorno al sistema de pastoreo por si solo también podría restablecer el carbono del suelo al nivel previo a la instalación del asentamiento.

**Conclusiones de los casos de Kenya**

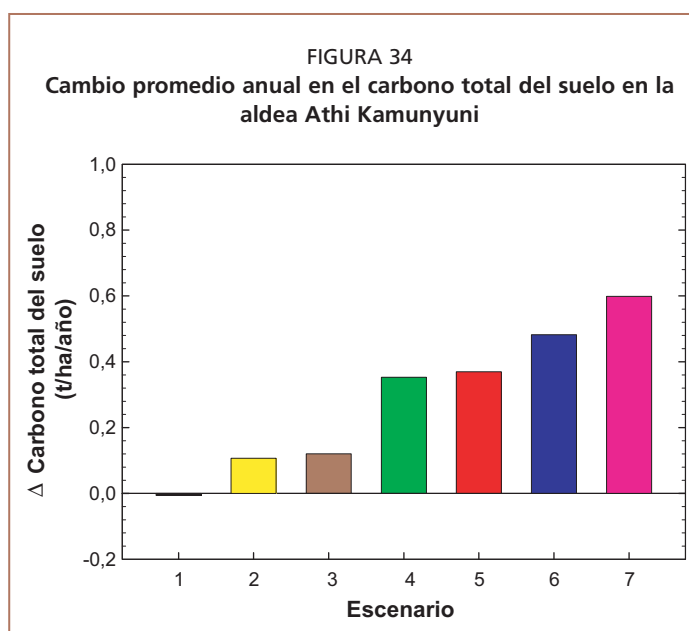
La modelación de los datos de cuatro fincas en comunidades del Distrito semiárido Makueni, nuevamente muestra que el contenido de carbono puede incrementarse cuando se utilizan una serie de tecnologías y prácticas que ya están disponibles para los productores.

Aplicaciones modestas de material orgánico en forma de abono de corral y residuos vegetales pueden conducir al secuestro de carbono, particularmente cuando los

CUADRO 35  
Carbono total del suelo en el asentamiento Athi Kamunyuni

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	23,75	23,45	-1,3	29,68	28,29	-4,7
2		29,09	22,5		31,40	5,8
3		29,77	25,3		42,76	44,1

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 36  
Fuente: CENTURY y RothC.



Escenarios descritos en el Cuadro 36.

CUADRO 36  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en la aldea Athi Kamunyuni

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Pastoreo
3	AC 1,25 t/ha/año
4	AC 2,25 t/ha/año
5	AC 2,27 t/ha/año, barbecho solo un año
6	AC 3,3 t/ha/año
7	AC 3,9 t/ha/año, residuos de plantas 0,3 t/ha

AC - Abono de corral.

sistemas están o se encuentran cerca del estado de equilibrio del contenido de carbono del suelo.

La eliminación de los períodos de barbecho de los sistemas existentes da como resultado pérdidas de 0,1 toneladas de C/ha/año. Los fertilizantes inorgánicos nuevamente son una elección ineficiente para suministrar nutrientes a las plantas cuando el carbono del suelo constituye un problema. Quemar los residuos vegetales no resulta provechoso.

La combinación de las leguminosas en las rotaciones, 2-4 toneladas/ha/año de abono de corral, además de 0,6 toneladas/ha/año de residuos vegetales, produce la tasa más alta de secuestro de carbono en todos los casos de tierras áridas -0.7 toneladas de C/ha/año. A dosis menores de abono de corral, pero manteniendo los barbechos, combinados con las leguminosas en la rotación, se pueden lograr incrementos en el carbono del suelo de 0,3 a 0,4 toneladas/ha/año.

## Estudio de caso 4

# Argentina – provincias de Catamarca, Córdoba y Tucumán

En los años recientes, Argentina ha experimentado un rápido crecimiento en la adopción de la labranza mínima y la labranza cero, especialmente en las regiones de tierras áridas. Este cambio ha sido provocado por el deterioro de la calidad de suelos y la disminución de los rendimientos de los cultivos. Muchos suelos locales no se ajustan a la labranza pesada y a las prácticas de labranza introducidas por los colonizadores europeos.

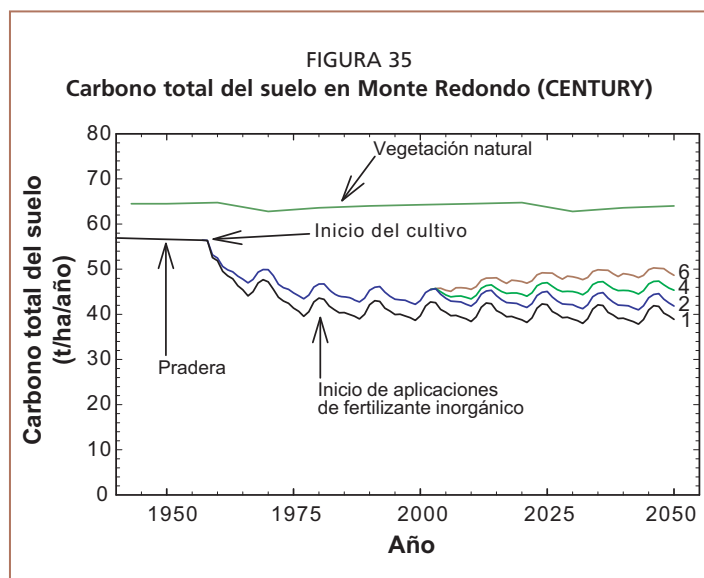
La Pampa Argentina tiene ahora poca vegetación natural. La vegetación xerofítica como *Prosopis algarrobilla* y *Larrea divaricata* aún se puede encontrar en las regiones más áridas. Las prácticas agrícolas se iniciaron con la llegada de los colonizadores en el siglo XVI. Se introdujeron animales ungulados para pastar en las praderas que hoy en día han sido en su mayoría resemebradas. Quedan muy pocos árboles, excepto en los alrededores de las fincas. Inicialmente se cultivaba el trigo y los cultivos en hileras se han incrementado con el tiempo. En muchas partes, predominaban las pasturas hasta la década de 1990, pero desde entonces ha habido un incremento marcado en la siembra de cultivos anuales de verano como el maíz, el girasol y la soya (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). La Pampa Argentina ha sido reconocida como una región con potencial para incrementar la producción siempre que se puedan mejorar los suelos (Álvarez, 2001). Los rendimientos de los cultivos han disminuido en muchas regiones. Esta disminución ha estado estrechamente correlacionada con una reducción en el contenido de materia orgánica del suelo (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). Esto ha impulsado la necesidad de cambio en las prácticas existentes para el manejo de la tierra. Los efectos negativos del cultivo intenso sobre la materia orgánica del suelo condujeron a la puesta en marcha de los experimentos de labranza cero en la década de 1960 en un intento por desarrollar un sistema agrícola más sostenible. Actualmente, alrededor de 13 millones de hectáreas, o sea casi la mitad del área agrícola de Argentina, se encuentra bajo alguna forma de sistema de labranza reducida. La fertilización de los cultivos se logra fundamentalmente mediante el empleo de fertilizantes inorgánicos, con una tendencia a la conservación del material orgánico para su uso en los sistemas hortícolas.

### ESTUDIOS DE MODELACIÓN DE LABRANZA CERO

Se revisaron tres estudios de caso para modelar el carbono del suelo bajo un grupo de sistemas convencionales y de labranza cero en las provincias de Tucumán, Catamarca y Córdoba.

#### i. Monte Redondo, provincia de Tucumán

Es una región semiárida que naturalmente propicia el desarrollo de vegetación xerofítica. Las prácticas agrícolas incluyen praderas pastoreadas y cultivos en hileras, siendo rotados con frecuencia los dos sistemas. En este sitio el proceso productivo consiste de siembras durante siete años, seguido de cuatro años como pradera de pastoreo. La secuencia de cultivos es trigo/soya, maíz, soya, trigo/soya, maíz, soya, trigo y cuatro años de pradera. Se practican tanto la labranza convencional como la labranza cero. En el sistema de labranza convencional, se utilizan el arado de disco y de cincel para la preparación de suelos, mientras que el sistema de labranza cero utiliza la misma secuencia de cultivos sin labranza.



Escenarios en el Cuadro 37

CUADRO 37

**Carbono total del suelo en Monte Redondo**

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
Pradera	55,40	54,50	-1,6	43,95	43,21	-1,7
Cultivo	40,43	39,27	-2,9	32,57	27,58	-15,3
Labranza cero	43,64	42,23	-3,2	35,33	33,58	-5,0
5		48,23	4,4		41,89	18,6

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 38.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 38

**Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Monte Redondo**

Escenario	Manejo del suelo
1	Labranza convencional, fertilizantes inorgánicos
2	Sin labranza, fertilizantes inorgánicos
3	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizantes inorgánicos
4	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizantes inorgánicos
5	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, sin fertilizantes inorgánicos
6	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/año, sin fertilizantes inorgánicos

AC - Abono de corral.

Después de una fase de equilibrio entre pasturas y árboles, con quemas cada 60 años, se establecieron los parámetros al modelo CENTURY para ejecutarlo en un sistema de pradera mejorado desde mediados del siglo XIX. El modelo predice que el sistema de pradera se encuentra perdiendo carbono a razón de 0,06 toneladas/ha/año bajo el régimen actual, pero con un contenido total de 55,4 toneladas de C/ha, está sobreestimando el nivel actual de 48,8 toneladas de C/ha.

Se planificó la siembra comenzando en la década de 1950 (Figura 35). Las aplicaciones de urea como fertilizante a razón de 110 kg/ha comenzaron en 1980. Se compara en dos escenarios el efecto de la labranza convencional con la labranza cero. El modelo pronostica una diferencia de menos de tres toneladas de C/ha consistente entre los dos sistemas. Esto es menos de la diferencia de seis toneladas/ha de carbono que se detectó realmente en el campo. El modelo CENTURY predice que esta diferencia entre los dos sistemas se mantendrá en el futuro, aunque ambos continúan perdiendo carbono del suelo. El patrón de caída y elevación del carbono del suelo ocurre, debido a que la parte que incluye los cultivos en las rotaciones produce pérdidas de carbono del suelo, mientras que el regreso a la condición de pradera incrementa este componente.

El modelo RothC calcula niveles más bajos de carbono del suelo, pero

predice un mayor diferencial de seis toneladas/ha para el año 2050, debido principalmente a una pérdida mayor de carbono de los sistemas con labranza (Cuadro 37 y 38).

**Efecto de la labranza cero y los abonos orgánicos**

Las aplicaciones de abono verde (10 toneladas/ha/cultivo) o de abonos de corral (1,5 toneladas/ha cada año de siembra) para el sistema de labranza cero, conducen ambas a incrementos en la captura de carbono (Escenarios 3 y 4; 0,029–0,034 toneladas/ha/año) (Figura 36). Una combinación de estas aplicaciones sin fertilizante inorgánico produce un resultado similar (Escenario 5). El cese del uso de fertilizante inorgánico y el empleo de abonos de corral como una fuente de sustitución de nitrógeno produce una tasa más alta de secuestro de carbono (Escenario 6), 0,1 toneladas/ha/año (Figura 36).

### Resumen

Ambos modelos registran el mejoramiento que genera la labranza cero sobre el contenido de carbono del suelo. Sin embargo, si se quiere revertir el declive del contenido de carbono del suelo, se requieren aplicaciones adicionales de materia orgánica - ya sea de abonos de corral o sembrar abonos verdes en la rotación. Un incremento de la fase de pradera en la rotación también incrementará el contenido total de carbono del suelo.

### ii. Río Valle Santa María, provincia de Catamarca

Es una región árida, con un promedio anual de lluvia de 400 mm y temperaturas entre 7 y 32 °C. La vegetación nativa es xerofítica y está compuesta por arbustos de creosota (*Larrea divaricata*) y árboles como *Prosopis algarrobilla*. En las áreas cultivadas, se explotan viñedos y los cultivos incluyen plantaciones alternas de pimiento rojo y cebada. El contenido de carbono medido es alto, de 3,9 por ciento.

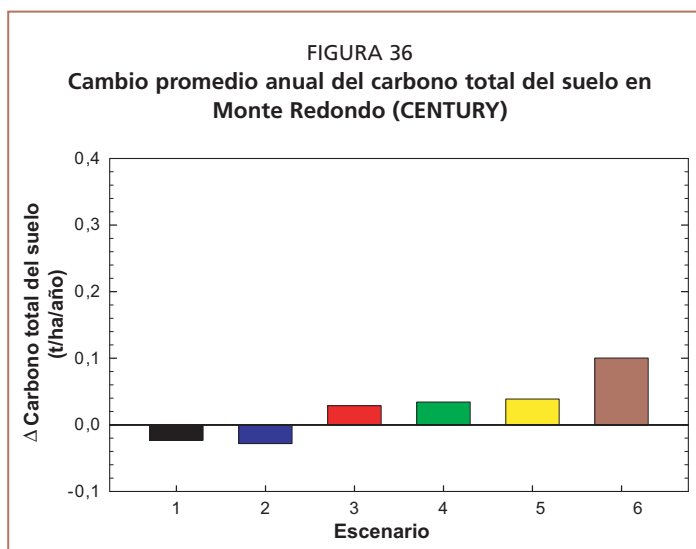
Luego de alcanzar el estado de equilibrio con la vegetación natural, se ejecutó el modelo CENTURY con un escenario de pradera desde mediados del siglo XIX e inicio de las siembras a finales de la década de 1950 utilizando la labranza convencional (arado de disco). Se inició una rotación de algodón –cebada en 1980. El modelo CENTURY calculó que el carbono del suelo habría decrecido a dos tercios de su valor inicial para el año 2000 (Figura 37). Las mediciones en la región confirman las disminuciones en el carbono del suelo en las áreas cultivadas entre 33-66 por ciento.

Por lo tanto, la estimación del modelo está en el punto máximo de este rango. Sin embargo, se prevé que el sistema alcance un nuevo punto de equilibrio y se estima una disminución de tres toneladas/ha del carbono del suelo en los próximos 50 años.

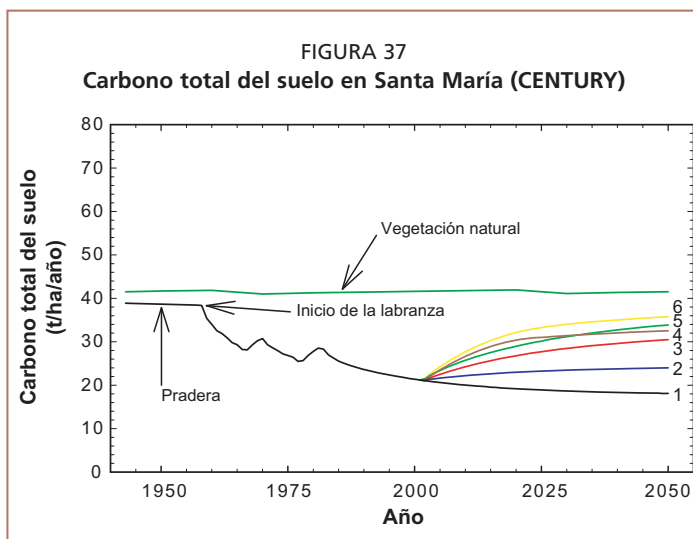
El modelo RothC, al cual se le establecieron los parámetros medidos de carbono del suelo más altos y con el que se utilizaron las cantidades de residuos vegetales calculados con el modelo CENTURY, muestra un efecto proporcionalmente menor que la práctica de cultivo actual sobre el carbono del suelo (Cuadros 39 y 40).

### Efecto de la labranza cero

Adoptar un sistema de labranza cero no solo detiene la pérdida de carbono del suelo predicha por el modelo CENTURY sino que también conduce a una baja tasa de secuestro de carbono de 0,05 toneladas/ha/año en los próximos 50 años (Figuras 37 y 38). El modelo RothC es menos sensible a este escenario (Cuadro 39).



Escenarios descritos en el Cuadro 38.



Escenarios descritos en el Cuadro 40.

CUADRO 39  
Carbono total del suelo en Santa María

Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
Pradera	37,11	35,75	-3,7	70,68	74,71	5,7
Labranza	21,39	18,11	-15,3	51,46	47,36	-8,0
Sin labranza		24,00	12,2		53,53	4,0
3		30,49	42,5		58,71	14,1

<sup>1</sup>Escenarios descritos en el Cuadro 40  
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 40  
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa María

Escenario	Manejo de la tierra
1	Labranza convencional, fertilizante inorgánico
2	Sin labranza, fertilizante inorgánico
3	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizante inorgánico
4	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/año, sin fertilizante inorgánico
5	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizante inorgánico
6	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, abono verde 10 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico

AC - Abono de corral.

### Efecto de los abonos orgánicos

Las aplicaciones de materiales orgánicos como abonos de corral y abono verde (Escenarios 3 y 5) conducen ambas a incrementos marcados en las tasas de captura de carbono de 0,18 – 0,25 toneladas/ha/año (Figura 37 y 38). El modelo RothC muestra nuevamente un efecto menor (Cuadro 39).

### Efecto del fertilizante inorgánico

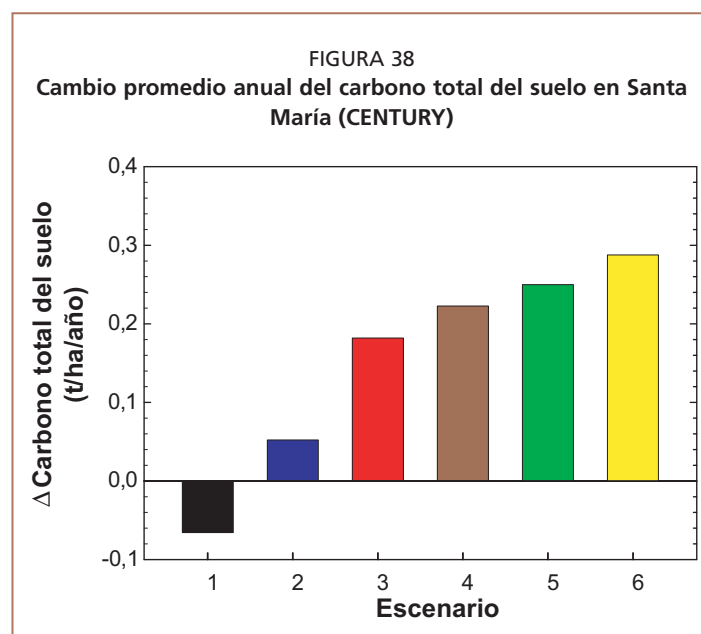
Reemplazar el fertilizante inorgánico con abono de corral (Escenario 4) promueve el secuestro de carbono (0,22 toneladas/ha/año). Combinar el abono verde y las aplicaciones de abono de corral produce la mejor tasa de incremento de carbono, 0,29 toneladas/ha/año (Escenario 6, Figuras 37 y 38). El fertilizante inorgánico es insuficiente, debido al alto costo de energía para su elaboración.

### Resumen

Ambos modelos sugieren que la adopción de la labranza cero detendría la disminución en el carbono del suelo. Sin embargo, para incrementar el secuestro de carbono son necesarias aplicaciones orgánicas más altas (abonos verdes y abonos de corral), las que pueden utilizarse para reemplazar las aplicaciones de fertilizante inorgánico.

### iii. Provincias de Córdoba, Buenos Aires y La Pampa

A continuación de un período de equilibrio con vegetación natural y condiciones subsecuentes en la fase de pradera desde la década de 1800, se establecieron los parámetros para el modelo CENTURY con un



Escenarios descritos en el Cuadro 40.

régimen de cultivo comenzando en la década de 1950. Este incluyó cuatro años de siembra (trigo – soya – maíz – soya) y cuatro años en la fase de pradera con aplicaciones de fertilizante inorgánico (100 kg/urea/ha) comenzando en 1985. En 1987, se aplicó un sistema con rotación y otro sin ésta, que es similar a las prácticas de cultivo que se llevan a cabo en el campo. La secuencia de cultivos en rotación fue forraje de invierno-soya-maíz-soya-trigo-soya-maíz-cuatro años de pradera y forraje de invierno-trigo-soya-maíz-soya-maíz-pradera. La secuencia sin rotación de cultivos fue similar, pero sin los intervalos de pradera.



Los resultados modelados para el sistema de cultivos sin rotación muestran una caída brusca en el carbono del suelo a 37 toneladas/ha en el año 2000 y pérdidas posteriores en los años subsiguientes (Figura 39). El modelo RothC estima una caída proporcionalmente mayor a partir de un contenido básico más alto (Cuadro 41 y 42). El sistema de rotación cultivo-pradera no muestra el mismo descenso agudo en el carbono del suelo que el sistema sin rotación y oscila alrededor de un nivel de poco más de 40 toneladas/ha (Figura 39). Sin embargo, el modelo RothC estima una disminución ligeramente proporcional en el carbono para el sistema de rotación de cultivos. Ambos modelos calculan diferencias pequeñas entre los sistemas con y sin rotación en el año 2000, en comparación con la diferencia de 8,5 toneladas/ha medida en el campo.

**Efecto de la labranza cero**

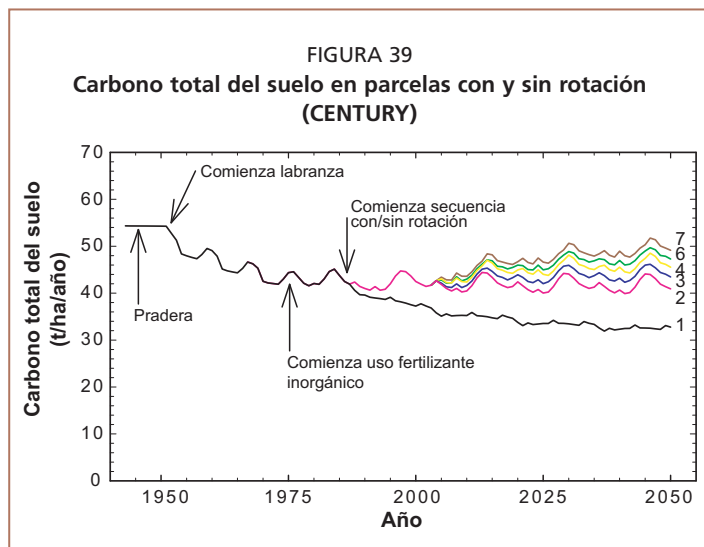
La adopción de un régimen de labranza cero para el sistema de parcelas con rotación, incrementa el contenido de carbono del suelo en 2,5 toneladas/ha en los próximos 50 años, representando una tasa de secuestro de carbono de 0,02 toneladas/ha/año (Figura 40). La tasa se incrementa a 0,1 toneladas de C/ha/año si se emplean abonos verdes y abono de corral en lugar de fertilizantes.

**Efecto de los abonos orgánicos**

Las aplicaciones de abono verde y abono de corral con o sin un fertilizante inorgánico pueden conducir a tasas de captura de carbono de 0,06-0,13 toneladas/ha (Figura 39 y 40). El material orgánico puede remplazar exitosamente al fertilizante inorgánico.

**Resumen**

La inclusión de intervalos de pradera en el sistema de cultivo es un factor importante para reducir la disminución del carbono del suelo. Sin embargo, los modelos muestran que la labranza cero y las aplicaciones orgánicas son necesarias si se desea capturar carbono en este sistema.



Escenarios descritos en el Cuadro 42.

**CUADRO 41 Carbono total del suelo en parcelas con y sin rotación modelados con CENTURY y RothC**

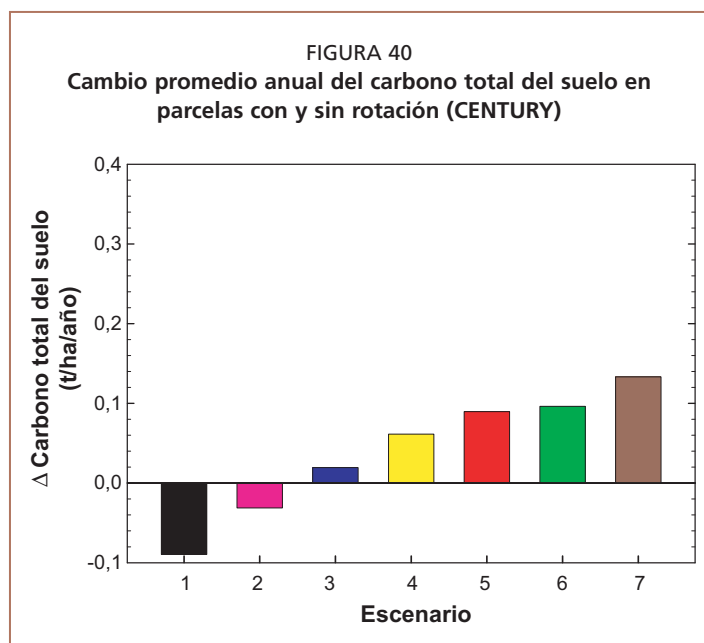
Escenario <sup>1</sup>	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)					
Parcelas sin rotación	37,22	32,74	-12,0	50,61	41,17	-18,7
Parcelas con rotación	42,47	40,91	-3,7	54,62	49,53	-9,3
4		45,54	7,2		62,86	15,1

\*Escenario descritos en el Cuadro 42

**CUADRO 42 Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa María**

Escenario	Manejo del suelo
1	Parcelas sin rotación, fertilizante inorgánico
2	Parcelas con rotación, fertilizante inorgánico
3	Parcelas con rotación, sin labranza, fertilizante inorgánico
4	Parcelas con rotación, sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, abono verde 10 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico
5	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizante inorgánico
6	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizante inorgánico
7	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 42

### Conclusiones de los casos de Argentina

La modelación de los datos agrícolas de las tres provincias en tierras áridas de Argentina muestra que el contenido total de carbono ha decaído de manera sustancial desde que se comenzaron a utilizar las praderas para el cultivo. En las tres localidades ha habido caídas bruscas en el contenido de carbono con pérdidas de alrededor de 15 toneladas/ha. Sin embargo, la adopción de sistemas de labranza cero en los años recientes ha detenido estos procesos y ha dado como resultado incrementos anuales pequeños del carbono del suelo de 0,02 toneladas/ha/año. Las rotaciones con períodos significativos de retorno a praderas

(p. ej. 4 años en 11) produjeron un incremento posterior de carbono en el suelo. Las tasas más altas de fijación (0,1 – 0,25 toneladas/ha/año) ocurren cuando los sistemas de labranza cero incluyen también el cultivo de abonos verdes y aplicaciones de abono de corral.

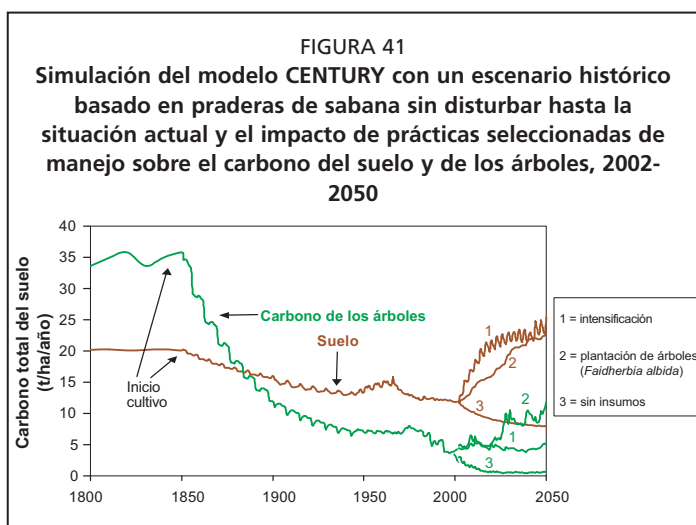
## Estudio de caso 5

# Senegal – cuenca «Old Peanut»

El área de estudio de Senegal, la cuenca «Old Peanut», está ubicada en la parte centro-occidental del país. El clima es semiárido con precipitaciones anuales que oscilan entre 350 y 700 mm. Casi toda la tierra arable se utiliza para la agricultura de secano. El mijo, el maní, el sorgo y el caupí son los cultivos principales. La estación lluviosa usualmente dura desde julio a septiembre/octubre. Sin embargo, tanto la variación espacial como temporal de la lluvia es alta, por lo que las malas cosechas son comunes. La vegetación natural, incluyendo *Faidherbia albida* y muchos otros árboles se han degradado, principalmente debido a la larga historia agrícola y a la creciente presión de población.

Según describió Tschakert (2004b), las simulaciones del modelo CENTURY sugieren que el carbono del suelo en el área en estudio decreció desde 20,1 toneladas de C/ha en un ambiente de sabana nativa en 1851 a 11,9 toneladas de C/ha en el 2001. Esto indica una pérdida anual de carbono del suelo de 0,055 toneladas de C/ha/año. El carbono de los árboles descendió desde 33,6 toneladas/ha a 4,2 toneladas/ha, correspondiendo a un decrecimiento de 0,2 toneladas de C/ha/año. Bajo condiciones de manejo mejoradas (asumiendo un período de 50 años), el carbono del suelo podría incrementarse en 0,3–13,5 toneladas/ha, o 0,006–0,27 toneladas/ha/año. Las ganancias de carbono en los árboles podrían triplicarse (de 4,2 a 11,8 toneladas/ha), asumiendo una conversión de las tierras de cultivos a pasturas - plantaciones de árboles. Dado que la mayor parte de las ganancias de carbono se logran en los primeros 25 años, los incrementos anuales para este período oscilan de 0,02 a 0,43 toneladas de C/ha/año, lo cual es más alto que las estimaciones suministradas por Lal, Hassan y Dumanski (1999). Bajo condiciones de manejo inadecuado, en este caso una rotación de un año de mijo – sorgo sin insumos y con eliminación y poda permanente de los recursos suministrados por los árboles, tanto el contenido de carbono del suelo como el de los árboles continua descendiendo, alcanzando un nivel mínimo absoluto de 7,9 toneladas/ha y 0,6 toneladas/ha, respectivamente (Figura 41).

El Cuadro 43 muestra las diferentes prácticas de manejo mejorado con los cambios anticipados en el carbono del suelo en dos períodos (2002–2026 y 2027–2050) tal como lo discute Tschakert (2004b). Como se ilustra, las ganancias más altas de carbono del suelo pueden lograrse en los primeros 25 años, excepto para el escenario de plantaciones de árboles. Sin embargo, en algunos casos estas ganancias no pueden sostenerse en el segundo período de 25 años y se deben esperar pérdidas si no se aplican insumos adicionales. Esto es particularmente cierto para los escenarios de barbecho.



CUADRO 43

**Efectos de las prácticas de manejo o uso de la tierra sobre el potencial de secuestro de carbono en la Cuenca «Old Peanut», Senegal**

Opciones tecnológicas*	Cambio en el C del suelo (t/ha/año) 2001–2026 (primeros 25 años)	Cambio en el C del suelo (t/ha/año) 2027–2050 (segundos 25 años)
Composte (2 toneladas)	0,02	-0,01
Conversión de las tierras de cultivo a pasturas + pastoreo	0,06	0,02
3 años de barbecho + 2 toneladas de abono orgánico en la rotación con 4 años de siembra	0,14	-0,05
Estiércol vacuno (4 toneladas)	0,10	0,01
Conversión de las tierras de cultivo a pasturas	0,17	0,04
Estiércol vacuno (4 toneladas) fertilizante mineral (250 kg en mijo; 150 kg en maní)	0,12	0,01
Estiércol de ovejas (5 toneladas)	0,13	0,01
3 años de barbecho + ramas de Leucaena (2 toneladas) en rotación con 4 años de cultivos	0,18	-0,05
Conversión de las tierras de cultivos a pasturas con protección de árboles	0,10	0,04
Estiércol de ovejas (10 toneladas)	0,17	0,01
10 años de barbecho + 2 toneladas de abono orgánico en rotación con 6 años de cultivo	0,25	-0,04
10 años de barbecho + ramas de Leucaena (2 toneladas) en rotación con 6 años de cultivos	0,25	-0,04
Conversión de tierras de cultivos a pasturas + plantación de árboles (Faidherbia albida)	0,23	0,21
Intensificación agrícola (mijo mejorado, abono orgánico, ramas de Leucaena, fertilizante mineral, tracción animal, 1 año de barbecho)	0,43	0,11

\* Todas las opciones tecnológicas calculadas para 1 ha. Rotación anual de mijo y maní para los escenarios de cultivos.

Fuente: Tschakert (2004b).

## Estudio de caso 6

# Sudán – provincia de Kordofán del Norte

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Kordofán, norte de Sudán, un área con predominio de los suelos de textura gruesa de origen Eólico, localmente llamados *Qoz*. El sitio de estudio es representativo en términos de suelos, clima y tipo de vegetación para una gran región que se extiende desde la costa atlántica hasta las alturas etíopes (Olsson y Ardö, 2002; Olsson y Tschakert, 2002).

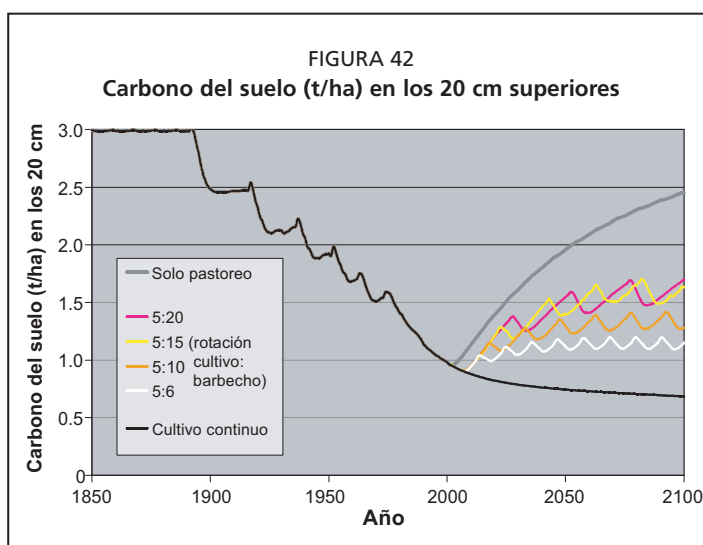
El clima es semiárido con lluvias anuales que oscilan desde menos de 200 mm en el norte hasta alrededor de 350 mm en el sur. El uso de la tierra se caracteriza por un incremento gradual de la intensidad de precipitación pluvial. En la parte norte, solamente es posible el pastoreo muy extensivo de camellos debido a la falta de fuentes permanentes de agua. El cultivo, especialmente mijo, y en menor grado ajonjolí y maní, predominan en la medida en que la lluvia y los recursos hídricos se incrementan hacia el sur. El pastoreo de ganado vacuno, ovejas y cabras también es un factor importante en las partes cultivadas del área.

Las entrevistas y la literatura indican que las prácticas de uso de la tierra han cambiado de manera significativa de un sistema de rotación con períodos largos de barbecho (15 – 20 años), intercalados con períodos cortos de cultivo (4 – 5 años), a una práctica de siembra más continua en las últimas tres a cuatro décadas. En el mismo período, los rendimientos de los cultivos han decrecido, principalmente debido a la marcada disminución de las lluvias, pero también en cierto grado debido al abandono de los períodos de barbecho.

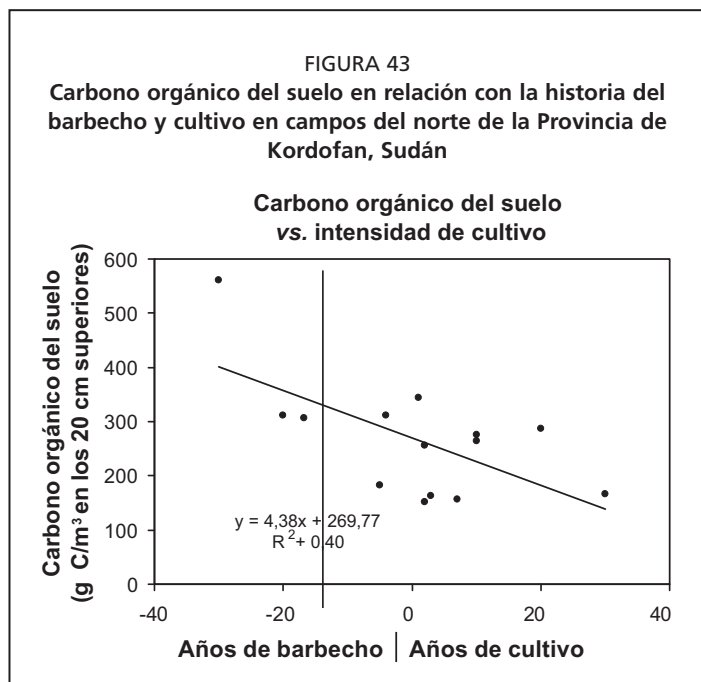
La demanda creciente de alimentos como resultado del incremento de la población combinada con la disminución de los rendimientos, ha forzado a los productores a extender su área cultivada, reduciendo principalmente los períodos de barbecho.

Con el fin de investigar el potencial para incrementar el contenido de carbono del suelo a través de los cambios en el manejo de la tierra, se simuló un conjunto de escenarios futuros. Primero, se estableció el nivel de equilibrio ejecutando el modelo para 2000 años sin uso de la tierra, y luego se simuló seis escenarios diferentes de manejo de la tierra para el período 2000 – 2010. Los escenarios de manejo de la tierra fueron: cultivo continuo, cultivo – barbecho en proporciones de 5:6, 5:10, 5:15, 5:20, y cero cultivo, pero con pastoreo. La Figura 42 presenta los resultados de las simulaciones.

Mientras que los resultados de la Figura 42 provienen de simulaciones, la Figura 43 muestra el resultado de la investigación empírica, usando el muestreo de suelo, vinculando períodos de barbecho con niveles incrementados de carbono orgánico del suelo. Con el fin de investigar la función de los períodos de barbecho, se muestrearon campos en diferentes estados de la rotación de cultivos y se determinaron los niveles de carbono orgánico del suelo correspondientes



Fuente: Olsson y Ardö (2002).



(Olsson y Ardö, 2002). El gráfico confirma en gran medida los resultados del modelo y muestra que no existe potencial significativo para incrementar el carbono orgánico del suelo, incluso en estos suelos arenosos secos.

La Figura 43 muestra que incrementar los períodos de barbecho, es decir disminuir la relación cultivo: barbecho, causa un incremento en el contenido de carbono del suelo proporcional a la relación (es decir, mientras más largo es el barbecho mayor es el contenido de carbono).

Un cambio en el uso de la tierra de cultivo de mijo a pastoreo, se estima que incremente el contenido de carbono del suelo alrededor de 1,5 toneladas/ha a 2,5 toneladas/ha en 100 años. Esto es el 82 por ciento

de la fase de equilibrio previa al cultivo de mijo. Si se continua el cultivo de mijo en el futuro, se espera un decrecimiento adicional en el contenido de carbono del suelo de 0,68 toneladas/ha en el 2100. El cambio del cultivo continuo a relaciones de cultivo: barbecho de 5:6, 5:10, 5:15 y 5:20 incrementarían el contenido de carbono del suelo de acuerdo con la Figura 42 a 1,15, 1,28, 1,63 y 170 toneladas/ha, respectivamente, para el año 2100.



## Capítulo 6

# Proyectos de secuestro de carbono

Los resultados obtenidos en los estudios de caso de Senegal y Sudán presentados en el Capítulo 5 se analizaron con el fin de ilustrar algunos aspectos del secuestro de carbono. Incrementar el carbono del suelo puede producir beneficios locales, nacionales y globales. La Figura 44 representa estos tres niveles. También muestra que estos beneficios pueden ocurrir en las fincas individuales bajo forma de incremento de los rendimientos de cultivos, madera y ganado como resultado del aumento de la fertilidad del suelo, o en la forma de beneficios sociales fuera de la finca en los tres niveles. A nivel local, este segundo tipo de beneficio constituye una mejor base de recursos de tierra y suelo para las generaciones futuras. Los beneficios a escala nacional se refieren principalmente a un mejoramiento en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola. A nivel global, los beneficios anticipados del manejo del carbono del suelo son: mejoramiento de la biodiversidad, incremento en el secuestro del carbono y mitigación del cambio climático. De esta manera, la captura de carbono en las tierras áridas podría constituir una situación de ganancias netas.

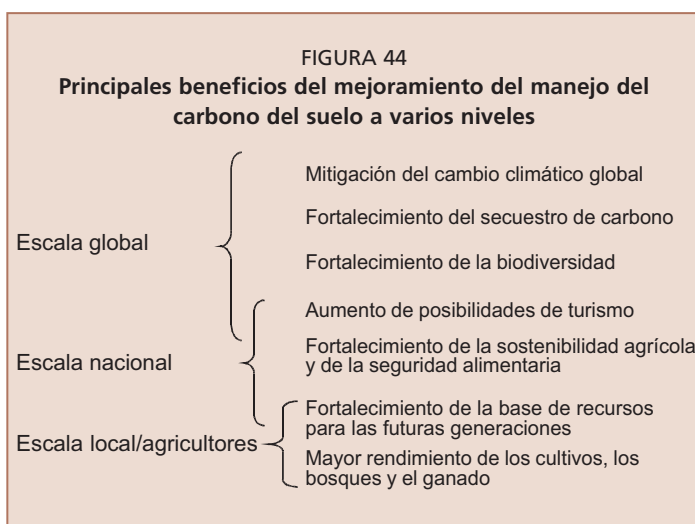
Sin embargo, según destacó Izac (1997), se requiere precaución, puesto que los costos serán principalmente locales, mientras que los beneficios serán locales, nacionales y globales. Desde el punto de vista de costo/beneficio, sería racional para los productores manejar sus recursos de carbono con respecto a los beneficios de la finca, a pesar de que ignoren los beneficios sociales fuera de la finca. En otras palabras, en ausencia de intervenciones políticas y de apoyo financiero externo, los propietarios locales utilizarían las prácticas mejoradas de manejo a niveles individuales óptimos, pero a niveles subóptimos desde el punto de vista social. Las siguientes secciones suministran un panorama de los costos y beneficios anticipados, tanto del comercio de carbono (intervención política), como de la inversión directa a nivel local.

Sin embargo, según destacó Izac (1997), se requiere precaución, puesto que los costos serán principalmente locales, mientras que los beneficios serán locales, nacionales y globales. Desde el punto de vista de costo/beneficio, sería racional para los productores manejar sus recursos de carbono con respecto a los beneficios de la finca, a pesar de que ignoren los beneficios sociales fuera de la finca. En otras palabras, en ausencia de intervenciones políticas y de apoyo financiero externo, los propietarios locales utilizarían las prácticas mejoradas de manejo a niveles individuales óptimos, pero a niveles subóptimos desde el punto de vista social. Las siguientes secciones suministran un panorama de los costos y beneficios anticipados, tanto del comercio de carbono (intervención política), como de la inversión directa a nivel local.

### BENEFICIOS DEL COMERCIO DE CARBONO

Uno de los beneficios anticipados para los pequeños propietarios que aprovechan los esquemas de secuestro de carbono es la ganancia que podría lograrse a partir del comercio de carbono. Actualmente, los valores de los créditos de carbono según se establece por los sistemas de intercambio y comercio, oscilan entre \$EE.UU. 1 y \$EE.UU. 38 por tonelada de carbono (FAO, 2001b).

Con el fin de poner la ganancia estimada por la captura de carbono en la perspectiva de los productores, se compararon los precios de los productos agrícolas y los precios asumidos del carbono como mercancía negociable, para los estudios de casos de Senegal y Sudán. En ambos casos, se asumió que los productores utilizan una práctica de manejo mejorada o tipo alternativo de uso de la tierra en todas las tierras cultivables



Fuente: Izac (1997)

CUADRO 44

## Beneficios económicos esperados a partir del comercio de carbono (1 tonelada de C = \$EEUU 15)

Práctica de manejo	Retención de C (toneladas/ha)	Ganancias anuales TP pobre (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP promedio (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP rica (\$EE.UU.15)	% del valor anual de la producción
Composte (2 toneladas)	0,02	0,73	1,93	2,28	0,2
Conversión de tierras cultivables a pasturas + protección de los árboles	0,10	3,65	9,63	11,39	0,9
Estiércol vacuno (4 toneladas) + fertilizante químico	0,12	4,38	11,55	13,66	1,1
Estiércol de ovejas (10 toneladas)	0,17	6,20	16,36	19,36	1,6
Rotación 10 años de barbecho - <i>Leucaena</i> (2 toneladas) y 6 años de cultivos	0,25	9,12	24,07	28,46	2,3
Intensificación agrícola	0,43	15,68	41,39	48,96	4,0

TP = Tipo de Propiedad

Fuente: Tschakert (trabajo de campo).

actuales (Cuadros 44 y 45). Las cantidades totales de tierras cultivables varían dependiendo de la riqueza de las poblaciones estudiadas. Los incrementos actuales del carbono, según se estima por el modelo CENTURY, se asumió que generarían \$EE.UU. 15/ha, dando como resultado ganancias financieras por grupo de propiedad. Estas ganancias financieras se compararon luego con el valor promedio de los alimentos y cultivos importantes que sembrarían los productores en estas tierras si no existiera otra alternativa.

En el caso de Senegal, las dimensiones promedio de las fincas en las aldeas en estudio varían entre 3,2 y 15,5 ha, de las cuales 2,8–8,9 ha son cultivadas (Tschakert, 2004a). Si se retuviera el carbono en estas tierras siguiendo las prácticas de manejo del Cuadro 43, las ganancias financieras potenciales a partir del comercio de carbono promediarían \$EE.UU. 1,4 a \$EE.UU. 31 por año. Se espera que tales ganancias sean significativamente bajas para las propiedades pobres en comparación con las propiedades medias y ricas. Esto es debido a que las propiedades pobres tienen menos tierra que la que podría utilizarse para las prácticas de manejo y/o usos de la tierra alternativos. Como se muestra en el Cuadro 44, las ganancias máximas anuales cuantificarían alrededor de \$EE.UU. 16 para las propiedades pobres, \$EE.UU. 41 para las propiedades medias y \$EE.UU. 49 para las propiedades ricas. Una comparación de los beneficios esperados del comercio de carbono con el valor actual del mijo y el maní -los principales cultivos en las áreas en estudio- indica que los beneficios anticipados promediarían entre menos del uno por ciento y cuatro por ciento de los valores de los cultivos anuales. Estos valores son extremadamente bajos y, por lo tanto, es poco probable que representen un incentivo financiero suficiente para que los pequeños propietarios participen en el programa de secuestro de carbono.

En el ejemplo de Sudán, cálculos similares realizados sobre la importancia económica potencial del secuestro de carbono son bastante diferentes. Debido al mayor tamaño de las fincas y los bajos insumos económicos en este caso, el carbono orgánico del suelo podría tener una función más significativa.

En base al censo de dos aldeas respecto a las propiedades y prácticas agrícolas (Warren y Khatir, 2003), se asumieron dos categorías de propiedad para el cálculo de los elementos económicos de la captura de carbono del suelo: una finca grande de cinco hectáreas de mijo y dos hectáreas de ajonjolí y una propiedad chica con cinco hectáreas de mijo. Si se retuviera carbono en estas tierras de acuerdo con las estimaciones realizadas anteriormente por el modelo CENTURY, la ganancia económica potencial sería como se muestra en el Cuadro 45. Con un precio de \$EE.UU. 15/tonelada, la

CUADRO 45

**Ganancia económica anual derivada de la adopción de cambios en el manejo de la tierra para producir mijo, con respecto a diferentes niveles de precios de carbono**

Opciones de manejo (relación cultivo:barbecho)	Fijación de C (kg/ha)	Ganancias anuales TP pobre (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP rica (\$EE.UU. 15)	% del valor de la producción anual (pobre)	% del valor de la producción anual (rica)
Pastoreo	15,00	1,15	1,56	16,6	3,8
05:20	7,20	0,55	0,75	8,0	1,8
05:15	6,50	0,50	0,68	7,2	1,7
05:10	3,00	0,23	0,31	3,3	0,8

TP= Tipo de Propiedad

Fuente: Olsson y Ardö (2002).

ganancia económica que se obtiene de convertir tierras de cultivo en tierras de pastoreo, sería de alrededor del 17 por ciento y 4 por ciento del rendimiento del cultivo que se obtiene normalmente en las fincas pobres y la ricas, respectivamente.

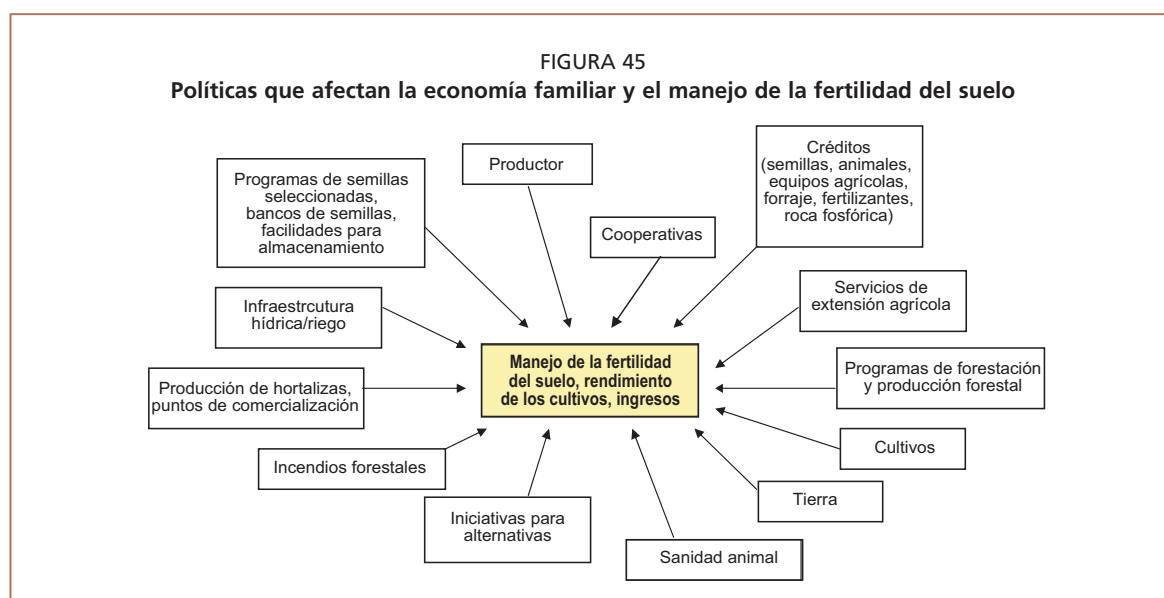
Sin embargo, cuando se tienen en cuenta los costos y la mano de obra requeridos para producir el cultivo, la ganancia del secuestro de carbono orgánico del suelo es más significativa. Un estudio realizado en una región cercana (International Fund for Agricultural Development, 1988) mostró que las ganancias económicas de varios cultivos fueron negativas. Como promedio, el estudio mostró que solo los ingresos obtenidos a partir de la producción de melones y carcadé suministró ganancias, mientras que cuesta más producir mijo, sorgo, ajonjolí y maní que el ingreso que se obtiene de vender su producción. Esta comparación económica indica que el nivel al cual se hace económicamente importante el secuestro de carbono es muy bajo para los productores en el estudio de caso de Sudán.

Los resultados de los dos estudios de caso sugieren que los beneficios de comercializar el carbono por parte del agricultor, son relativamente bajos. Una alternativa de ingresos netos que debería considerarse por parte de los pequeños propietarios durante las negociaciones del proyecto con las instituciones, podría ser una infraestructura comunal nueva o mejorada, como escuelas, servicios de bienes y salud.

### COSTOS Y BENEFICIOS LOCALES DIRECTOS

Los beneficios directos de los pequeños propietarios locales se espera que ocurran a nivel de campo, principalmente a través del incremento de la fertilidad del suelo y los rendimientos de los cultivos que, en cambio, contribuirán a un mejoramiento en sus medios de vida y seguridad alimentaria a escala nacional (Figura 45). Las prácticas que involucran animales para la producción de estiércol pueden combinarse con las actividades que generen ganancias, tales como la ceba y venta de animales, que crean también ingresos adicionales. Cambiar de la siembra a otras alternativas de uso de la tierra, como las praderas y las tierras de pastoreo, liberarían mano de obra agrícola, principalmente durante la campaña de siembra principal. Tales ganancias de tiempo y energía podrían utilizarse para las actividades en las áreas rurales y urbanas. Los sistemas agroforestales bien manejados pueden generar ingresos de la tala controlada de madera, de semillas y de la venta de frutos. Sin embargo, no es probable que tales ganancias ocurran en un tiempo corto. En el caso de las especies fijadoras de nitrógeno, si se introducen en los campos especies como *Faidherbia albida*, se pueden esperar impactos positivos sobre los rendimientos.

Respecto al costo, el uso de prácticas de manejo mejoradas o el cambio de una práctica de manejo a otra podría incluir costos de transacción significativos. Hoy en día, es poco probable que la mayor parte de los pequeños propietarios de las tierras áridas tengan los insumos necesarios para aplicar prácticas de manejo mejoradas como se asumió en el modelo CENTURY. Los costos a nivel local incluirían la compra de animales, forraje, equipo agrícola y mano de obra, dependiendo de la dotación de recursos que posean los



pequeños propietarios interesados en dicho esquema de secuestro de carbono. También es probable que los productores demanden compensación por las producciones anteriores, con respecto a las tierras cultivables que han sido transferidas a usos alternativos (praderas y tierras de pastoreo) y períodos de barbecho prolongados. Como en la mayoría de los casos, al menos la mitad de todas las tierras cultivables se utilizan para cultivos de subsistencia, dicha compensación podría ocurrir en el tipo de cultivo. Un análisis detallado de costo beneficio realizado para la cuenca «Old Peanut» reveló diferencias significativas en los beneficios netos anticipados en 15 opciones de manejo de los sistemas de cultivo-barbecho, que promediaron de \$EE.UU. 1 400 a \$EE.UU. 9 600/tonelada de carbono (Tschakert, 2004a). Estas diferencias son principalmente el resultado de la dotación desigual de recursos de los productores; de costos altamente desiguales en las inversiones del primer año y de los costos de mantenimiento en un período asumido de 25 años. Además de los costos de transacción local, los esquemas de secuestro de carbono también incluirían los costos relacionados con el diseño del proyecto, implementación, seguimiento y verificación. Los costos de seguimiento y verificación podrían ser sustanciales, debido a que se requeriría el muestreo directo de suelo a nivel de campo con el fin de obtener resultados confiables y efectivos. Según demostraron Poussart y Ardö (2002), se necesitarían un número considerable de muestras del suelo, para detectar diferencias en el carbono del suelo con un nivel de confiabilidad adecuado. En el caso de la región semiárida del Sudán, se necesitarían al menos 100 muestras para detectar una diferencia de 50 g de C/m<sup>2</sup> 90 por ciento del tiempo, analizándolas con un nivel de significación de 0,05. El valor de 50 g de C/m<sup>2</sup> corresponde a una cantidad promedio que podría fijarse en esta área en 100 años. Si el seguimiento y verificación ocurrieran cada 10 años, el número de muestras requeridas sería por lo menos diez veces más alto. Existen técnicas que permiten utilizar teledetección para evaluar los cambios de carbono, pero estas carecen de precisión para detectar variaciones a pequeña escala dentro de las fincas y los sistemas de producción agropecuaria.

Dados los resultados de los estudios de caso, se puede concluir que serían necesarios fondos sustanciales de organizaciones de desarrollo o inversionistas para disminuir el contenido de carbono con el objetivo de hacer realidad los proyectos de secuestro de carbono en los pequeños sistemas agrícolas presentes en las tierras áridas. Además de estos cálculos puramente económicos, existe preocupación respecto al aspecto ético. Asumiendo que los pequeños propietarios adopten las prácticas de manejo a niveles

óptimos, social y globalmente, esto implicaría que subsidiarían al resto de la sociedad en sus respectivos países, al igual que a la sociedad global, especialmente a los grandes contaminadores del norte (Izac, 1997). De esta forma, sería fundamental que se realizaran regulaciones institucionales e intervenciones políticas para rectificar esta situación.

## FACTORES INSTITUCIONALES Y DE POLÍTICAS

### Factores de políticas

Parece haber un reconocimiento creciente entre los interesados, los investigadores y los responsables de la toma de decisiones respecto a que las políticas modelo que incluyan amplios planes de acción y soluciones universales para un ambiente rural altamente dinámico y diverso, son insuficientes y podrían ser contraproducentes. Según percibieron Scoones y Chibudu (1996), los esfuerzos para obtener más datos y elaborar modelos más certeros, con el fin de construir una imagen más precisa de la realidad, no necesariamente generarían mejores políticas. Solo si se toman en cuenta seriamente las incertidumbres y complejidades de vivir en tierras áridas propensas a riesgos e integrando de forma consciente en la formulación de los planes de acción, entonces serían posibles la mejoría en las políticas.

Si entre los objetivos principales del secuestro de carbono en tierras áridas está contribuir de forma simultánea a la agricultura sostenible, la restauración ambiental y a la mitigación de la pobreza en gran escala y durante un período más largo, se necesita un enfoque de manejo y una política más flexible y adaptable (Tschakert, 2004a). Dicho enfoque necesita estar basado en un entendimiento más detallado de los sistemas de producción agropecuaria. Esto generaría posibilidades para fortalecer las propias estrategias de los productores para enfrentar las inseguridades a la vez que les suministra el incentivo necesario para promover formas exitosas de producción. Mortimore y Adams (1999) mencionan nueve principios a incluir en un nuevo marco político que son relevantes para el éxito de los programas de secuestro de carbono. Estos principios son:

- considerar la variabilidad;
- promover la diversidad en las tecnologías adaptables;
- facilitar el uso flexible de la mano obra;
- permitir la intensificación agrícola (a través de una integración mayor entre los cultivos y el ganado);
- alcance multisectorial;
- promover las condiciones de mercado abierto;
- mitigar la pobreza entre los grupos vulnerables: propiedades pobres;
- mitigar la pobreza entre grupos vulnerables: mujeres;
- reducir el impacto de las enfermedades.

Como punto de partida es necesario entender los vínculos actuales e históricos de las políticas y los procesos de toma de decisión entre los pequeños agricultores. Las más importantes son las políticas con respecto a la agricultura, el ambiente y las disposiciones para la posesión de la tierra. Especialmente en los países sahelianos, el deterioro de los servicios rurales que ha ocurrido como resultado de las políticas de ajuste estructural y el abandono de compromisos gubernamentales desde la década de 1980 ha provocado impactos sobre los sistemas de producción agropecuaria. La Figura 45 muestra el conjunto de políticas que pueden afectar la producción de cultivos, los ingresos y las decisiones de manejo a nivel local.

Además de las políticas agrícolas y ambientales, la toma de decisión de los productores sobre las posibles estrategias para los sistemas de producción agropecuaria, está

determinada, en gran medida, por el acceso y control de la tierra, usualmente regulada por las disposiciones de tenencia formal e informal de la tierra. Es importante entender que leyes oficiales sobre la tenencia de la tierra están en vigor y, donde no sea así, cuan fuerte puede ser la influencia de las disposiciones informales/convencionales.

Uno de las preocupaciones principales de los inversionistas potenciales en el secuestro de carbono en las tierras áridas es la inseguridad en la propiedad de la tierra. Existe gran debate con respecto a lo que significa tenencia de la tierra para los pequeños agricultores y sobre si los títulos inseguros les impiden establecer compromisos a largo plazo e inversiones en el mejor manejo de la tierra y el suelo (Zeeuw, 1997; Kirk, 1999). Los resultados del estudio de Senegal muestran que los productores perciben derechos de usufructo suficientes para invertir en «sus» tierras, aunque estas tierras sean oficialmente estatales (Tschakert y Tappan, 2004). Lo que se considera más importante que un título oficial de la tierra es la posibilidad de contratar transacciones relacionadas con la tierra, libremente, con flexibilidad y a largo plazo, incluyendo préstamos libres de impuestos, acuerdos de alquiler y créditos hipotecarios. Actualmente la ley senegalesa sobre tenencia de tierras (*Loi sur le Domaine National*) prohíbe cualquier tipo de transacción o usos no productivos de la tierra (barbecho) que exceda la duración de un año. De esta forma, los productores se inclinan menos por las prácticas de manejo con efectos a más largo plazo en tierras donde cultivarán por no más de un año. Donde existen los medios, probablemente comprarán fertilizantes para extraer tanto como les sea posible de esa tierra en el breve período que se les permite.

Los sistemas de producción agropecuaria actuales tienen que ser vistos también como resultado de las disposiciones legales sobre tenencia de la tierra. La noción de poner a un lado la tierra para los tipos de uso alternativos (conversión de tierras de cultivo en praderas o tierras de pastoreo, plantaciones de árboles, o tierras mejoradas y de barbecho largo), necesita entenderse en este contexto. El grado en el cual son factibles las actividades de secuestro de carbono a gran escala dependerán del grado en el que se implementan las leyes sobre tenencia formal de la tierra, el grado en que se hacen cumplir las disposiciones de tenencia convencional y la flexibilidad de las redes sociales para evadir una o la otra.

### Organización institucional

El «principio de subsidiaridad» (Scoones y Chibudu, 1996) necesita incluirse en un enfoque de políticas y de manejo más flexible y adaptable. De acuerdo con este principio, las tareas relacionadas con los programas de secuestro de carbono tendrían que dividirse en varios niveles de toma de decisiones. Estos niveles abarcan desde instituciones a nivel local (productores y sus organizaciones) hasta instituciones comunitarias y a nivel de distrito y proveedores de servicios (consejos rurales y regionales, servicios de extensión y agencias de investigación).

Un programa de secuestro de carbono a largo plazo y en gran escala que podría incluir varios miles de pequeños agricultores es poco probable que tenga éxito, si todas las decisiones del programa se toman siguiendo un enfoque intervencionista. Es probable que este tipo de «macro control» desilusione a los agricultores e incremente el riesgo de que abandonen los acuerdos. Un primer paso importante hacia la integración institucional es identificar las instituciones locales y/o regionales que podrían ser las que mejor se ajustan para actuar como vehículo para un programa de secuestro de carbono. Además de ser confiable para la mayoría de los pequeños agricultores, dicha institución deberá ser capaz y de hecho tendrá que: a) participar en el diseño de un programa regional/local; b) asegurar la participación necesaria de un conjunto de pequeños agricultores; c) garantizar una distribución justa de los costos; d) coordinar la supervisión y la verificación y, e) canalizar los beneficios esperados en la forma más deseable y equitativa (Tschakert, 2004b).



En el estudio de caso de Senegal los agricultores definieron los siguientes requisitos como los más importantes para una institución elegida para organizar, movilizar y supervisar a los agricultores locales que participan en el programa de secuestro de carbono:

- ser capaz de hacer una evaluación detallada de los asentamientos comprendidos en su área de influencia, incluyendo todas las familias, sus necesidades alimentarias, los sistemas de producción agropecuaria, las condiciones ambientales, la disponibilidad de tierra y los principales impedimentos del desarrollo económico;
- ser capaz de identificar las opciones de manejo de la tierra más prometedoras y factibles y los cambios en el uso de la tierra con y sin modificaciones en las políticas agrícolas y ambientales (subsidios y créditos) y disposiciones sobre tenencia de tierras;
- tener suficiente influencia para solicitar cambios en la política regional y nacional si se considerara esencial;
- ser capaz de identificar las aldeas y familias con antecedentes de innovación y compromiso (especialmente en términos de reembolso de créditos);
- ser capaz de asegurar una distribución justa de los costos y beneficios;
- ser capaz de decidir con que propósitos podrán emplearse más provechosamente los beneficios y fondos adicionales (infraestructura rural, supervisión ambiental, etc.);
- ser capaz de asegurar el compromiso total de los pequeños agricultores participantes.

### CUANTIFICACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL CARBONO

La cuantificación y verificación del carbono fijado es un componente integral de un proyecto de secuestro de carbono. La cuantificación implica que todas las extracciones por parte de los sumideros y las emisiones de las fuentes de CO<sub>2</sub> deben ser registradas y cuantificadas. La verificación implica que cualquier remoción de CO<sub>2</sub> por retención en el suelo o en la biomasa debe verificarse por medio de mediciones. La verificación usualmente se lleva a cabo por parte de una organización independiente. Sin embargo, el control continuo de las pérdidas y ganancias de carbono en el sistema de producción agropecuaria deben ser una parte integral de un proyecto para el cual podría ser responsable una institución local designada. El procedimiento general para la verificación es que se desarrolle un estudio básico antes de que comience cualquier otra actividad del proyecto y después de cierto período dirigido por el contrato del proyecto. Otro levantamiento se lleva a cabo para verificar cualquier cambio en el contenido total de carbono.

Tanto las investigaciones básicas como el seguimiento harán uso de la modelación y la estratificación como instrumentos para mejorar la confiabilidad y reducir los costos de los levantamientos, pero se requerirá también el muestreo directo del suelo. El número de muestras necesarias para verificar los cambios en el contenido total de carbono en el tiempo está relacionado con:

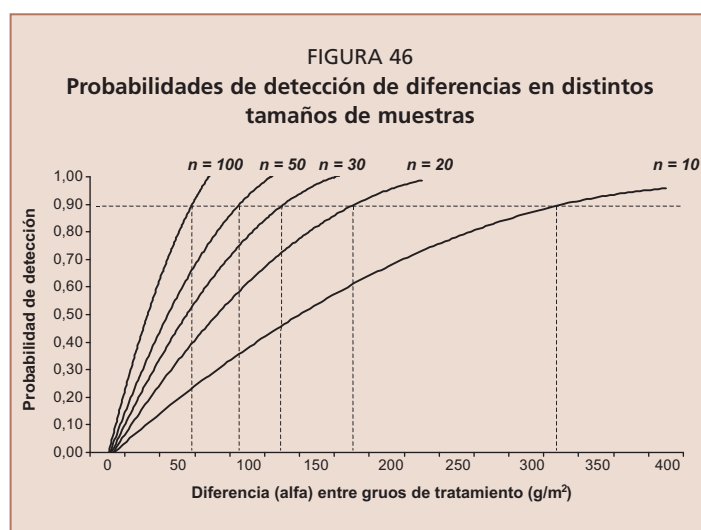
- a. la variabilidad espacial del contenido total de carbono del suelo en el área del proyecto;
- b. el cambio mínimo en el contenido de carbono que debe detectarse;
- c. el nivel de significación estadística que debe obtenerse.

El Cuadro 46 y la Figura 46 ilustran un ejemplo del muestreo de suelo requerido para la verificación (Poussart y Ardö, 2002). El estudio incluyó tres campos diferentes pero adyacentes en el estudio de caso de Sudán. Todos los campos tenían condiciones naturales similares en cuanto a suelo, relieve o clima, pero diferentes usos de la tierra. El uso de la tierra de los tres campos fueron: cultivo de mijo desde 1996, barbecho con árboles por más de 20 años y pastoreo solamente durante 18 años. El Cuadro 46

CUADRO 46  
**Datos de suelo medidos para los lugares experimentales en el estudio de caso de Sudán**

	Cultivado	Barbecho	Pastoreo
COS, 0-20 cm, [g/m <sup>2</sup> ] (n = 100)			
Media ± desviación estándar	519,2±_461,5	532,3±_455	411±226,8
Mediana	374,7	426	367,9
Mínimo, máximo	242,9, 3 716,3	239,5, 4 277,5	181,4, 2 303
Varianza	212 952	207 043	51 425
Textura [%] arena, limo, arcilla	93,7, 3,6, 2,7	95,1, 3,0, 1,9	93,6, 3,2, 3,2

Fuente: Poussart y Ardö 2002.



Nota: las líneas punteadas indican las diferencia detectables en el 90 por ciento de los casos con la prueba de Kruskal-Wallis (nivel significativo  $\alpha = 0,05$ ) para cinco tamaños de muestras (n = 10, 20, 30, 50 y 100).

muestra la estadística descriptiva de los tres campos. La Figura 46 ilustra el tamaño de muestra requerido para verificar un cambio en el contenido total de carbono para los niveles de diferencia detectable y los diferentes niveles de significación estadística.

### RIESGOS E INCERTIDUMBRES PARA LOS INVERSIONISTAS Y PRODUCTORES

Existe un grupo de riesgos predecibles e impredecibles asociados con las actividades de secuestro de carbono (Bass y Dubois, 2000; FAO, 2002b; Tschakert y Tappan, 2004). Estos riesgos parecen inevitables en un programa de larga duración (25 años) y requieren un gran número de pequeños agricultores participantes, con el fin de alcanzar una cantidad total de carbono retenido que sea atractiva para los inversionistas potenciales. Los riesgos tendrán que dividirse en varios niveles de toma de decisión. La eficiencia de distribuir los riesgos dependerá de la fuerza institucional de cada estructura organizacional, desde las asociaciones de productores, hasta el nivel máximo de los gobiernos nacionales y organizaciones internacionales.

### Riesgo de reversión

Las ganancias de las prácticas de manejo o cambios en el uso de la tierra pueden ser revertidas tan pronto como son interrumpidas o abandonadas. Esto podría ocurrir, ya sea como consecuencia de los riesgos o eventos naturales (sequía, fuegos, cambio climático, etc.) o de la decisión consciente de los agricultores para desechar un esquema convenido.

Los factores que desalientan o impiden a los productores de cumplir sus acuerdos podrían incluir:

- alternativas económicas más atractivas para una cierta tierra;
- falta de medios para continuar las prácticas (mano de obra, tierra y capital);
- actividades económicas más lucrativas fuera de la agricultura;
- falta de confianza en los arreglos institucionales establecidos en el lugar;
- inseguridad de las disposiciones de tenencia de la tierra;
- cambios en los precios de los productos agrícolas en el mercado;
- cambios en las políticas nacionales y regionales (ej. eliminación de subsidios, cambios en las disposiciones de tenencia de la tierra, nuevas regulaciones requeridas por agencias externas, por ejemplo el Banco Mundial);
- cambios relacionados con intervenciones internacionales y los esquemas de comercialización de carbono.

### **Inexactitud de los datos básicos, procedimientos y herramientas de seguimiento y verificación**

Los datos inexactos en el inicio, durante y al final de un proyecto podrían subestimar o sobrestimar los beneficios actuales que obtendrían los pequeños propietarios y la sociedad en general de las actividades de secuestro de carbono. Se necesita realizar previsiones adicionales con el fin de determinar los aspectos indefinidos en el potencial de almacenamiento de carbono.

### **Confusión de prioridades y objetivos**

El conflicto de intereses entre los compradores, los vendedores y los que propician el secuestro de carbono puede socavar el diseño exitoso de un proyecto y su implementación. Es más probable que los contribuyentes e inversionistas se concentren en las prácticas de maximización del manejo de carbono, mientras que es posible que los pequeños agricultores locales perciban el secuestro de carbono como un instrumento adicional en el manejo de riesgos con el objetivo final de mejorar sus mecanismos de adaptación en un ambiente más proclive al riesgo que al equilibrio del carbono. Esto podría implicar que una porción específica de tierra recibe una combinación de prácticas que incrementan, estabilizan o incluso disminuyen el carbono en forma alternativa durante la duración de un proyecto, dependiendo de las dinámicas generales del sistema agrícola y del sistema de medios de vida.

### **Fracaso en implementación de una estructura institucional**

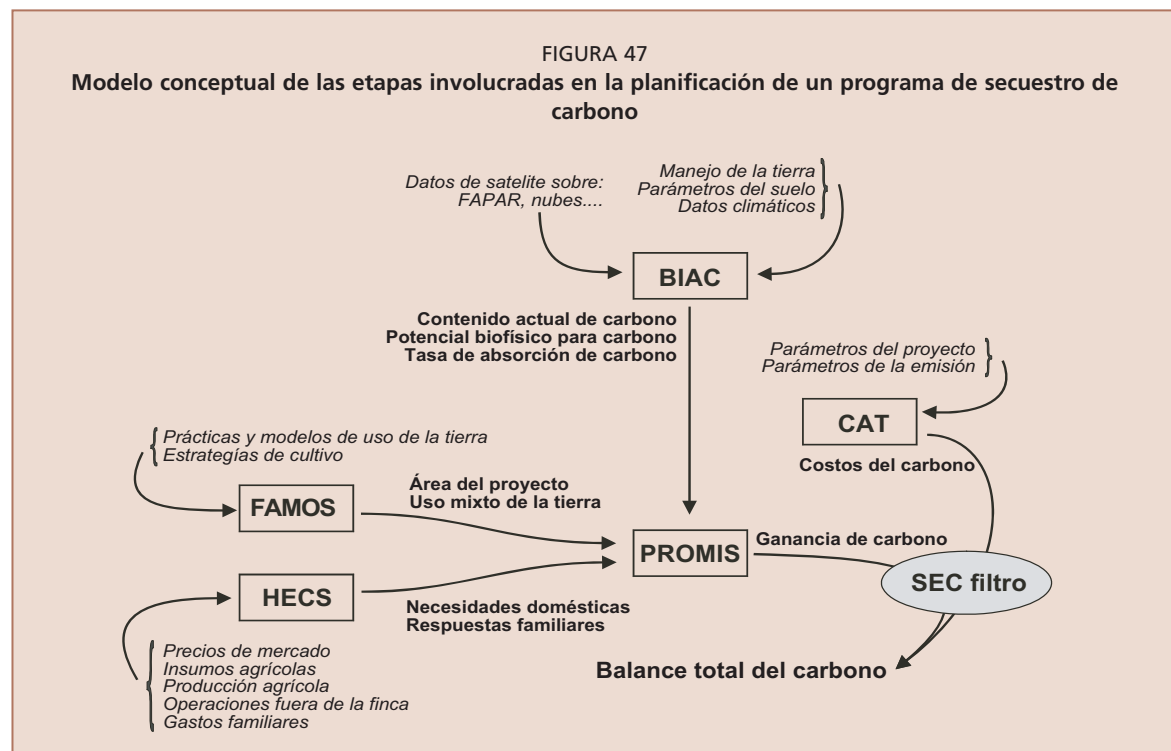
Es poco probable que un proyecto concerniente a un gran número de pequeños agricultores en un largo período pueda operar de forma exitosa sin una institución local o regional fuerte, respetada y confiable. Dicha institución debería organizar, movilizar y supervisar la participación de los agricultores y asegurar la conformidad con los acuerdos del proyecto y la justa remuneración de todos los participantes. Por lo tanto, se deberá dedicar tiempo y cuidado suficientes para la selección o creación de dicha institución.

### **Incremento de la desigualdad entre los participantes**

Los proyectos tienen una tendencia a enfocarse en los agricultores más interesados, motivados e innovadores como participantes potenciales, simplemente debido a que los porcentajes de éxito a corto plazo posiblemente serán más altos. Estos agricultores son a menudo los que tienen la mayor dotación de recursos y enfrentan los menores riesgos y, por lo tanto, tienen mayor probabilidad de adoptar nuevas prácticas. A menudo se descartan los agricultores que más necesitan los beneficios del secuestro de carbono porque se encuentran en desventaja y enfrentan los riesgos mayores, y por ello están menos dispuestos a participar. Con el fin de minimizar el riesgo de incrementar la desigualdad entre las poblaciones rurales, necesitará tomarse en cuenta la paradoja «innovación – necesidades» (Rogers, 1995). Si uno de los objetivos más importantes del secuestro de carbono es mejorar los medios de vida del sector rural, se deberán crear incentivos diferentes para incluir a los grupos de agricultores económicamente más débiles (Tschakert, 2004a).

### **No aprobación de «actividades adicionales» para los países en desarrollo**

El secuestro de carbono en los suelos no constituye un aspecto elegible durante el primer período de compromiso (2008-2012) del Protocolo de Kyoto. Aunque la presión política para incluirla al menos en el segundo período de compromiso se está incrementando, no hay garantía de que en el futuro habrá disponibilidad de apoyo financiero para los proyectos de secuestro de carbono del suelo a través del Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (MCCC).



BIAC = análisis biogeoquímico del balance de carbono; FAMOS = opciones de manejo de los agricultores para la captura de carbono; HECS = economía de una propiedad para la captura de carbono; PROMIS = manejo de proyectos para incrementar el carbono del suelo; CAT = instrumento para la cuantificación del carbono; SEC filter = criterios de sostenibilidad y equidad.

## PLANIFICACIÓN, DISEÑO Y MANEJO DE LOS PROYECTOS DE SECUESTRO DE CARBONO

Con el fin de planificar, diseñar, implementar, supervisar y manejar un proyecto de secuestro de carbono, se deben desarrollar una serie de etapas de trabajo. La Figura 47 presenta un modelo conceptual de estas etapas.

Los componentes de la Figura 47 necesitan desarrollarse como modelos de sistema mediante los cuales se podrían probar diferentes escenarios de planificación antes de implementar los proyectos. En detalle, los diferentes componentes son:

- Análisis biogeoquímico del balance de carbono (BIAC). El modelo BIAC, influenciado por diversas variables biofísicas y datos obtenidos mediante sensores remotos, produce información sobre el potencial biofísico para incrementar el almacenamiento del carbono del suelo, si se suministra información sobre la productividad primaria básica, el clima, los suelos y su manejo.
- Opciones de manejo para los productores para la retención de carbono (FAMOS). Este componente constituirá un modelo de como se emplean las prácticas de trabajo y de manejo de la tierra en el marco de un asentamiento determinado. El modelo establece la probabilidad que poseen los diferentes grupos de agricultores para intensificar la producción de ciertas porciones de su tierra, mientras establecen prácticas de barbecho o pasturas, dependiendo de un gran número de factores (p. ej. disponibilidad de mano de obra, fuentes alternativas de ingresos, acceso a créditos para cubrir las transacciones y costos de oportunidad, prácticas agronómicas y derechos de tenencia de la tierra). Los resultados son la cantidad de tierra dedicada a usos diferentes y la tasa de conversión.
- Economía de una propiedad para la retención de carbono (HECS). Este componente modela el desempeño económico, con y sin la captura de carbono. El modelo genera información acerca de como los ingresos y egresos financieros que surgen a partir de los nuevos usos de la tierra, podrían distribuirse en las

propiedades y entre propiedades. Un primer prototipo ha sido desarrollado y probado en Senegal y Sudán (Olsson y Tschakert, 2002).

- Manejo de proyectos para incrementar el carbono del suelo (PROMIS). Este modelo utiliza datos de los modelos anteriores para simular el grado en el que los agricultores y las aldeas pueden ser inducidos a participar en un proyecto de secuestro de carbono. Necesitará datos adicionales sobre cuán rápido los productores y las aldeas pueden ser contactados por el proyecto (principalmente a través de las redes institucionales existentes), cuantos grupos de trabajo e infraestructura se necesitan en este proceso, y otros detalles.
- Instrumento para la cuantificación del carbono (CAT). La cuantificación en el proyecto de las fuentes y sumideros de CO<sub>2</sub> es vital. Este componente calcula el balance total de carbono del proyecto. Los datos son necesarios para definir cualquier contrato con los inversionistas.
- Criterios de sostenibilidad y equidad (SEC). Como objetivo principal del proyecto está el mejoramiento de la vida de los agricultores de menores recursos; cualquier solución sugerida por otros medios, debe comprobarse contra los criterios existentes para apreciar su contribución, o de otra manera con relación a sistemas de producción agropecuaria más sostenibles y equitativos.

## FASE I

### SELECCIÓN DEL PROYECTO

La Fase I incluye la recolección de los datos necesarios para seleccionar un área de trabajo y para modelar los diferentes escenarios de secuestro de carbono. Este proceso es un diálogo iterativo entre cuestiones biofísicas y socioeconómicas. Las iteraciones deben ser:

- i. criterios socio-políticos para seleccionar una zona amplia de interés: por ejemplo, la selección de comunidades con necesidades de desarrollo, empleando criterios como la productividad y los ingresos; se podría seleccionar una unidad política principal;
- ii. la recolección de datos biofísicos para esta zona: datos sobre suelos, lluvia, biomasa y otros a partir de bases de datos, mapas y sensores remotos; estos datos deben ser suficientes para ejecutar los modelos de potencial biofísico:
  - iniciación de modelos con estos datos: el potencial biofísico para incrementar el contenido de carbono del suelo es un primer prerrequisito para un proyecto; este es principalmente dirigido en el componente BIAC de la Figura 47;
  - datos sobre las categorías de uso de la tierra y su distribución: los datos para estos levantamientos pueden provenir de fuentes publicadas, datos de teledetección y algunas observaciones de campo; estos datos pueden utilizarse luego con los modelos iniciales para producir proyecciones de carbono en diferentes escenarios de uso de la tierra y estos modelos de escenarios necesitan verificarse después con los datos muestreados del campo;
  - preparación de una cartera de posibilidades para cambio en el uso de la tierra: estas posibilidades se deben categorizar según al potencial de secuestro de carbono; cuando se suman en varias combinaciones y se comparan con las cantidades de carbono secuestrado a las que se quiere llegar, dicho portafolio suministra cifras ideales para los tipos propuestos de cambios en el uso de la tierra;
  - encuestas sobre en cuestionario de muestreo para determinar el área total de un posible proyecto: el área dependerá del número probable de participantes, el grado en que se podrían unir al proyecto y la mezcla de cambios en el uso de la tierra que puedan ocurrir: períodos más largos de barbecho, retiro total del cultivo de la tierra, incremento/disminución del área bajo riego e incremento/disminución del uso de fertilizantes.

## FASE II

### SELECCIÓN DEL ÁREA Y PERSONAL DEL PROYECTO

El primer proceso en la Fase II es la selección de un área para un proyecto específico, usando los criterios desarrollados en la Fase I. La selección será tanto un proceso político/administrativo como técnico.

Después de la selección del área se debe establecer el comité local de manejo y el equipo técnico. Este equipo debe diseñar luego los detalles del proyecto.

## FASE III

### DISEÑO DEL PROYECTO

Recordando que los sistemas de producción agropecuaria de las tierras áridas son diversos, complejos y sensibles a riesgos, el diseño de un proyecto de secuestro de carbono debe ajustarse al sistema y añadir componentes que los productores perciban como valiosos. Es importante para cualquier proyecto de secuestro de carbono suministrar varias oportunidades de ingresos, tanto en las actividades agrícolas como no agrícolas (p. ej., procesamiento y elaboración de la producción local, servicios). El valor añadido del procesamiento puede ser un componente importante para lograr un grupo de beneficios, p. ej. mejores acuerdos de comercialización, oportunidades de ingresos, reducción de los costos de transporte y provisión de subproductos útiles.

El tipo de componentes que puede ofrecer un proyecto de secuestro de carbono puede ser estructurado en forma de facilidades de créditos y facilidades de recompensas para los campesinos que han firmado el proyecto y servicios generales para toda la comunidad:

- créditos: las facilidades crediticias deben proveer préstamos justos y equitativos a los productores para inversiones que favorezcan el secuestro de carbono tales como la plantación de árboles, compra de animales, hornallas más eficientes, equipos y construcciones;
- recompensación: debe suministrar compensación a los campesinos por la producción que se esté perdiendo hasta que obtengan los ingresos de las inversiones en el secuestro de carbono;
- servicios: deben permitir a los campesinos adoptar actividades de secuestro de carbono y reducir los riesgos asociados con estas actividades, tales como los servicios veterinarios, entrenamiento y extensión, servicios de salud, suministro de agua, suministro de energía, manejo de la finca, mercadeo y vínculos con las autoridades.

Un programa de secuestro de carbono debería ser idealmente combinado con otras actividades de manejo de los gases de efecto invernadero con el fin de reducir las emisiones actuales y prevenir las emisiones futuras de esos gases. Dichas actividades deberían contribuir a un desarrollo sostenible de la comunidad en general. Algunos ejemplos son:

- suministro de electricidad a instituciones sociales vitales, como escuelas, clínicas y abastecimiento de agua, posiblemente provisto mediante luz solar y energía eólica. Estos instrumentos son económicamente viables a largo plazo, pero su implementación debe ser apoyada mediante facilidades de créditos y seguros. Las emisiones de carbono pueden reducirse si se reemplazan los equipos que funcionan con combustible diesel;
- cuando las cantidades de combustible de biomasa utilizadas para cocinar en una comunidad exceden el crecimiento anual de la vegetación, existe una emisión neta de carbono. Además la quema de los residuos de cultivo puede empobrecer los suelos. El reemplazo de las fogatas al abierto por hornallas mejoradas o por biogás obtenido a partir de la fermentación de desechos orgánicos tales como desechos del hogar o excrementos animales, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>. La reducción de la quema de combustible obtenido de la madera, también puede reducir el riesgo de generación de humo que es catalogado por la Organización Mundial de la



Salud como uno de los mayores riesgos para la salud a nivel mundial.

➤ En un proyecto piloto financiado por el GEF, se determinó que hasta el 50 por ciento de la cantidad de combustible obtenido de la madera podría ahorrarse mediante hornallas de arcilla mejoradas (PNUD, 1999). Las hornallas fueron elaboradas a nivel local a partir

de material de la comunidad (pasta de barro y estiércol). En este caso se utilizó menos combustible para obtener el mismo resultado y se cambiaron las fuentes de combustible de árboles y sus ramas, por desechos de plantas. Las hornallas se emplearon en el 90 por ciento de las casas o grupos familiares. El Cuadro 47 indica el efecto sobre el consumo de combustible de madera en estas propiedades.

El consumo anual total de combustible de madera en el área del proyecto decayó de 1 836 toneladas a 432 toneladas entre el año 1995 y el 2000. La mano de obra utilizada inicialmente en la cosecha de combustible quedó disponible para emplearla de manera productiva en la agricultura y otras actividades fuera de la finca.

CUADRO 47

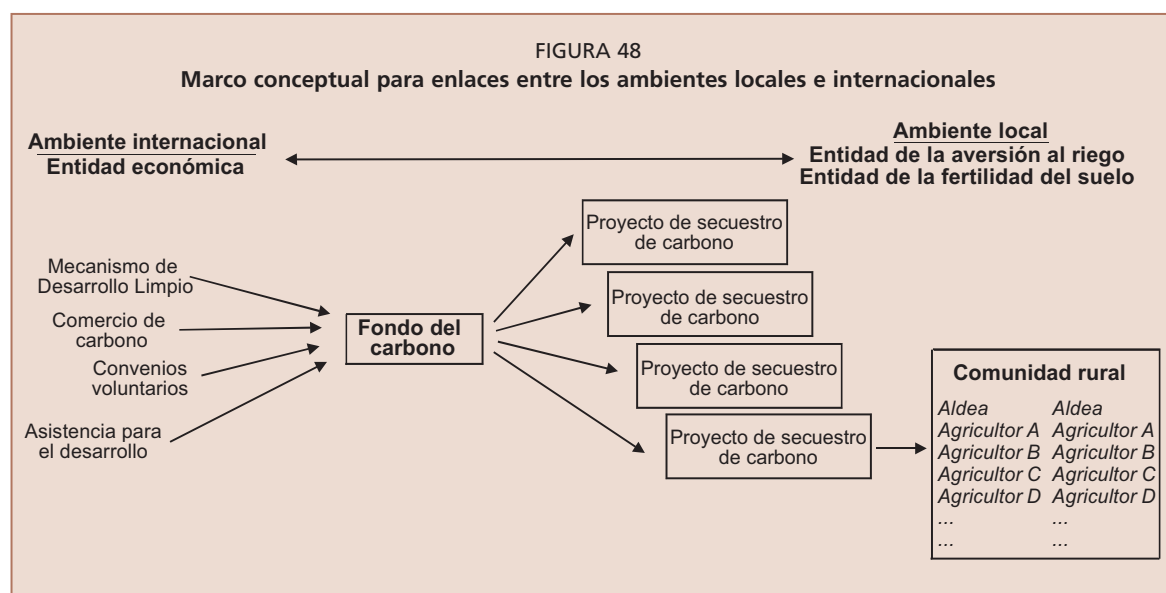
Consumo promedio de leña como combustible en propiedades de un proyecto piloto en Sudán, antes y después de utilizar las hornallas mejoradas

Consumo de combustible de madera	Antes de la utilización	Después de la utilización
	%	%
> 4,5 kg/día	60	0
4,5 kg/día	26	0
3 kg/día	10	0
1,5 kg/día	3	41
< 1,5 kg/día	0	59

Fuente: PNUD (1999).

#### FASE IV IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

En esta fase, se necesita establecer la infraestructura necesaria para el funcionamiento del proyecto. Una parte fundamental será crear los vínculos necesarios entre los ámbitos internacionales donde se formulan las políticas y se toman las decisiones y el ámbito nacional/local donde se está ejecutando el proyecto. En el ámbito internacional, el carbono es generalmente visto como una mercancía valorada en términos monetarios, mientras que a nivel local es visto como una entidad biofísica que tiene muchas funciones diferentes y se valora de muchas maneras (Figura 48). Un fondo de carbono, como el Fondo BioCarbono o el Fondo del Carbono para el Desarrollo Comunitario podrían funcionar como el vínculo requerido entre los ámbitos nacionales e internacional.



## FASE V SEGUIMIENTO Y MANEJO

El seguimiento y los ajustes deben ser una parte integral de cualquier proyecto de secuestro de carbono. Un comité local de manejo o una institución local/regional encargada tendrá que jugar un papel crítico en esta fase de un proyecto de carbono. A través de ajustes y negociaciones continuas, esta tendrá que asegurar que todos los elementos de un contrato de carbono sean cumplidos, incluyendo el número de productores participantes, opciones de manejo seleccionadas, distribución justa de los créditos y las compensaciones, acceso igualitario a los servicios y otros. El seguimiento eficiente también requiere un caso testigo (un «escenario convencional») con el cual se puedan comparar los efectos de las opciones de manejo adoptadas o los modelos alterados del uso de la tierra. Dicho caso testigo podría estar basado en experimentos empíricos y controlados (parcelas control) que podrían ser simples aunque representativas del área del proyecto y cuidadosamente descritas. Estos experimentos podrían ser un tipo de «guía», mantenida también por el comité local de manejo seleccionado por el proyecto.

## ESTRUCTURA DE POLÍTICAS Y DE FINANCIAMIENTO PARA EL SECUESTRO DEL CARBONO Y LA MITIGACIÓN DE LA POBREZA EN LAS TIERRAS ÁRIDAS

La idea del secuestro de carbono para la mitigación de la pobreza está basada en el hecho de que el manejo del carbono puede ser visto como el centro de varios sistemas internacionales. El CMNUCC estableció como su objetivo principal: *«la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático»*. Con posterioridad, la CCD plantea la preocupación de la degradación de los suelos en las tierras áridas -que de otra forma serían productivos- que han sido convertidos en tierras inadecuadas para satisfacer las necesidades de la población. Este proceso de degradación de la tierra también significa que el carbono almacenado en estos ecosistemas se ha perdido y ha sido añadido a la atmósfera en forma de gases de efecto invernadero (principalmente CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>). De esta forma, la CCD y el CMNUCC conjuntamente con el Protocolo de Kyoto comparten un objetivo común: el manejo adecuado del carbono. Además, el cambio en el uso de la tierra, la agricultura y las actividades forestales reconocidas por el Protocolo de Kyoto también están estrechamente vinculados a la CCD y la CBD, si bien el Protocolo de Kyoto no establece de manera explícita su relación con estos.

El CMNUCC en sí mismo fue elaborado con los temas de la desertificación en la mente de los negociadores de las Partes. El Preámbulo recuerda:

*...«y las disposiciones pertinentes de la resolución 44/172 de la Asamblea General, de 19 de diciembre de 1989, relativa a la ejecución del Plan de Acción para combatir la desertificación»*, un precursor de la CCD. Las Partes reconocieron luego que:

*...«los países con ... zonas áridas y semiáridas, o zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación, y los países en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles, son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático»*.

Particularmente en los Artículos 4.8 (c) y 4.8 (e), las Partes del CMNUCC:

*...« estudiarán a fondo las medidas que sea necesario ... inclusive medidas relacionadas con la financiación, los seguros y la transferencia de tecnología, para atender a las necesidades y preocupaciones específicas de las Partes que son países en desarrollo derivadas de los efectos adversos del cambio climático o del impacto de la aplicación de medidas de respuesta, en especial de ... (c) los países con zonas áridas y semiáridas, zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal ... : [y] ... (e) los países con zonas expuestas a la sequía y a la desertificación [...]»*

Un requisito más explícito del CMNUCC que podría ser efectivo en la unión de las actividades más diversas contempladas bajo la CCD, es el artículo 4.1 (d) y (e): todas las partes deberán:

- (d) *promover la gestión sostenible y promover y apoyar con su cooperación la conservación y el reforzamiento, según proceda, de los sumideros y depósitos de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, inclusive la biomasa, los bosques y los océanos, así como otros ecosistemas terrestres, costeros y marinos;*
- (e) *cooperar en los preparativos para la adaptación a los impactos del cambio climático; desarrollar y elaborar planes apropiados e integrados para la ordenación de las zonas costeras, los recursos hídricos y la agricultura, y para la protección y rehabilitación de las zonas, particularmente de África, afectadas por la sequía y la desertificación, así como por las inundaciones [..].*

De esta manera, la CCD y el CMNUCC están vinculados y esta conexión provee una base conceptual para satisfacer los objetivos compatibles.

### EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO DEL PROTOCOLO DE KYOTO

El Protocolo de Kyoto proporciona un mecanismo que potencialmente puede convertirse en una vía para los programas agrícolas que involucran a los países en desarrollo con las características discutidas en este informe: el Artículo 12, conocido comúnmente como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

El MDL es el único de los tres mecanismos flexibles que se dirige de manera explícita a los países en desarrollo. El propósito del MDL es asistir a los países en desarrollo en el cumplimiento de los compromisos establecidos en el Protocolo de Kyoto. Sin embargo, en el primer período de compromisos del Protocolo existe una restricción importante para la inclusión del secuestro de carbono del suelo en el MDL. Esto significa que la elegibilidad de las actividades de los proyectos en el sector Uso de la tierra, el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, están limitadas a la forestación y a la reforestación (Artículo 12, Párrafo 3b y Artículo 3). Su tratamiento en los períodos de compromisos futuros será decidido como parte de las negociaciones sobre el segundo período. También es necesario decidir sobre como tratar el almacenamiento del carbono subterráneo.

Otra característica del MDL, restringiendo su aplicación a muchas tierras áridas de los países en desarrollo, son los complicados procedimientos para los proyectos del MDL y la escala requerida. La mayoría de los proyectos de MDL han sido muy largos, de hecho, demasiado complejos para una capacidad institucional insuficiente de algunos países africanos. Sin embargo, hubo una modificación importante de los estatutos del MDL en enero de 2003. Esta permite ahora proyectos en pequeña escala y grupos de proyectos en pequeña escala relacionados con el MDL. También incluye requisitos simplificados para los procedimientos básicos y el seguimiento de los logros de los proyectos.

Los procedimientos básicos y de seguimiento simplificados han sido definidos para 14 actividades del MDL en pequeña escala; estos se agrupan en tres tipos de proyectos como se muestra a continuación:

- proyectos tipo I: proyectos sobre energía renovable con una capacidad de producción equivalente a 15 megaWatts (o un equivalente adecuado). Las actividades elegibles son:
  - A. generación de electricidad por parte del usuario/grupo familiar;
  - B. energía mecánica para el usuario/empresa;
  - C. energía térmica para el usuario;
  - D. generación de energía para un sistema.
- proyectos tipo II: proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética que reducen el consumo de energía, en cuanto a suministro y/o demanda, hasta el equivalente a 15 gigaWatt hora por día. Las actividades elegibles son:

- E. mejoramiento en la eficiencia energética con relación al suministro – transmisión y actividades de distribución;
  - F. mejoramiento en la eficiencia energética con relación al suministro – generación;
  - G. programas de eficiencia energética en cuanto a demanda para tecnologías específicas;
  - H. medidas de eficiencia energética y cambio de combustible para las instalaciones industriales;
  - I. medidas de eficiencia energética y cambio de combustible para las construcciones.
- proyectos tipo III: otros proyectos que reducen las emisiones antropogénicas por parte de las fuentes de emisión y emiten directamente menos de 15 kilotoneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> anualmente. Las actividades elegibles son:
- J. agricultura;
  - K. cambio de los combustibles fósiles;
  - L. reducción de las emisiones en el sector del transporte;
  - M. recuperación del CH<sub>4</sub>.

Aunque ninguno de estos tipos de proyectos incluyen actualmente operaciones de UTS y el uso de los suelos como sumideros, existe una fuerte presión internacional por parte de muchos promotores para incluir estas actividades elegibles como parte del MDL.

Incluso con las restricciones actuales sobre la inclusión de las actividades UTS, las actividades a pequeña escala podrían integrarse de manera exitosa en los proyectos de secuestro de carbono.

En el marco de varias convenciones de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente, existen un grupo de oportunidades importantes de financiamiento que podrían ayudar en la implementación de programas de secuestro de carbono para la mitigación de la pobreza. Las convenciones más importantes que se citan son el CMNUCC, la CBD y la CCD.

### FONDOS PARA EL CARBONO

En el año 2002, el comercio global de créditos de emisiones de gases de invernadero se triplicó a cerca de 67 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, solamente el 13 por ciento de estos créditos involucraron países en desarrollo. Con el fin de incrementar el potencial de los países en desarrollo para participar en esta negociación, el Banco Mundial ha creado recientemente dos fondos de carbono específicamente dirigidos a los proyectos de los países en desarrollo. No obstante, estos fondos están basados en las reglas del MDL y son, a fin de cuentas, dependientes del MDL como organismo internacional para el reconocimiento y certificación. El objetivo de ambos fondos es el desarrollo de proyectos a pequeña escala en los países menos desarrollados. Ambos fondos comprenden una mezcla de financiamiento público y privado y cada uno tiene un objetivo de presupuesto de \$EE.UU. 100 millones.

### FONDO DE BIOCARBONO

El Fondo de BioCarbono fue lanzado en noviembre de 2002 para iniciar sus operaciones en el otoño del año 2003 y ejecutarse durante 18 años (Newcombe, 2003). El fondo intenta suministrar financiamientos para los proyectos de sumideros de carbono a través de varias actividades de manejo del ambiente, tales como las descritas en este informe. El Fondo de BioCarbono debe apreciarse como experiencia de aprendizaje para los proyectos piloto, en cuanto a como implementar, dar seguimiento y verificar los esquemas de captura de carbono y también para probar la permanencia del carbono almacenado. Se estima que el Fondo de BioCarbono incluirá menos de 4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, que es mucho menos del uno por ciento estipulado por el MDL.

A pesar de la relativamente pequeña cantidad de carbono que pretende secuestrar, tiene el potencial para propiciar inversiones sustanciales en las tierras áridas. El Fondo de BioCarbono implementará proyectos en dos campos diferentes. El primero será consecuente con los requisitos actuales del MDL, o sea, limitado a la forestación y a la reforestación. El segundo campo, implementará actividades que actualmente no resultan elegibles para los créditos de carbono consecuentes con el Protocolo de Kyoto. Esto incluye el UTS y las actividades en los sumideros de suelo.

Otro aspecto discutido en el MDL es la posibilidad de obtener créditos para evitar la deforestación. Actualmente no existen créditos disponibles para este tipo de actividad. Sin embargo, el segundo campo del Fondo de BioCarbono bien podría suministrar oportunidades para explorarlos.

### **EL FONDO DE CARBONO PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO**

El Fondo de Carbono para el Desarrollo Comunitario (FCDC) se anunció por parte del Banco Mundial en abril de 2003 y es similar en muchos aspectos al Fondo de BioCarbono. La diferencia principal es que el FCDC no invertirá en los sumideros de carbono sino en la reducción de las emisiones. El principio fundamental es que cada proyecto debe conducir a mejorías en el bienestar material de la comunidad o comunidades involucradas en el mismo.

Los proyectos que respondan al FCDC deben cumplir con los principios mencionados anteriormente. Sin embargo, los proyectos que no accedan a estos principios pueden proponerse y ser considerados para su financiamiento por parte del Comité Ejecutivo. Entre los ejemplos del tipo de bienes y servicios que podrían suministrarse por parte del FCDC son: electricidad para escuelas, clínicas de salud, talleres, abastecimiento de agua potable, servicios técnicos y médicos. En la mayoría de los casos, el patrocinador del proyecto suministrará los beneficios directamente o a través de la contratación con una tercera parte.

### **FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL**

El FMAM es un programa conjunto de financiamiento establecido por los países desarrollados para cumplir sus obligaciones contraídas en varios tratados ambientales internacionales. El FMAM ha destinado \$EE.UU. 4 000 000 000 en donaciones y ha adicionado a esta cantidad \$EE.UU. 12 000 000 000 como cofinanciamiento obtenido a partir de otras fuentes para desarrollar más de 1 000 proyectos en más de 140 países en desarrollo y países con economías en transición. Existen seis áreas focales para el FMAM: la biodiversidad, el cambio climático, las aguas internacionales, el ozono, la degradación de la tierra y las sustancias contaminantes orgánicas persistentes. Los proyectos que son financiados y ejecutados a través del FMAM son gobernados por parte de los programas operacionales. Desde marzo de 2003 existen 14 programas operacionales a través de los cuales el FMAM contribuye con donaciones. Once de estos, reflejan las áreas focales originales del FMAM: cuatro en el campo de la biodiversidad, cuatro en el cambio climático y tres en las aguas internacionales. El programa operacional más relevante con relación al secuestro de carbono, según se describe en este informe es el OP12-Manejo Integrado del Ecosistema. Este programa operacional más importante abarca proyectos multisectoriales que dirigen el manejo de los ecosistemas de forma que se optimicen los bienes y servicios del ecosistema en al menos dos áreas focales dentro del contexto de un desarrollo sostenible.

El OP-12 está dirigido a iniciar proyectos en lo que se promueva el sinergismo entre tres de las áreas focales del FMAM -la biodiversidad, el cambio climático y las aguas internacionales- y la degradación de la tierra. Esto puede incluir dos o más de los siguientes beneficios:

- a. conservación y uso sostenible de la biodiversidad biológica, así como repartición equitativa de los beneficios que surjan del uso de la biodiversidad;

- b. reducción de las emisiones netas e incremento del almacenamiento de los gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres y acuáticos;
- c. conservación y uso sostenible de los cuerpos de agua, incluyendo las vertientes, los ríos, las cuencas y las zonas costeras;
- d. prevención de la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos importantes a nivel global.

Los resultados esperados de los proyectos apoyados por el FMAM también deberán incluir:

- a. la creación de un ambiente propicio para: políticas adecuadas, regulaciones y estructuras de incentivos para apoyar el manejo integrado del ecosistema;
- b. fortalecimiento institucional: la capacidad de las instituciones para implementar enfoques de manejo integrado de ecosistemas se fortalece a través del entrenamiento y el apoyo logístico;
- c. inversiones: se realizan inversiones, basadas en enfoques de ecosistemas integrados y asociaciones de propietarios para dirigir de forma simultánea los aspectos locales/nacionales y globales en el contexto del desarrollo sostenible.

Con el fin de alcanzar los beneficios de ambas categorías mencionados anteriormente, el FMAM define un grupo de actividades que son elegibles para el financiamiento; estas se dividen en tres categorías:

- a. asistencia técnica, incluyendo: levantamientos de diferentes tipos, planes de acción para el desarrollo y modificación de políticas, desarrollo de los recursos humanos, desarrollo de mecanismos para la solución de conflictos y desarrollo de asociaciones en los sectores público/comunitario/privado.
- b. inversiones para propósitos tales como: la rehabilitación de pasturas para restaurar la vegetación original y el mejoramiento del manejo del agua, rehabilitación de cuencas reforestadas o zonas inundables, manejo integrado de ecosistemas costeros y desarrollo de medidas para controlar la contaminación y consecuentemente prevenir la degradación de los hábitats y minimizar los riesgos de salud pública.
- c. investigación dirigida a ciertos objetivos como: desarrollo de sistemas de manejo integrado de recursos naturales y desarrollo de enfoques innovadores y rentables sobre el manejo integrado de ecosistemas.

Las actividades apoyadas por el FMAM son siempre convenios de colaboración con los socios públicos y privados, incluyendo ONGs. Las actividades también deberán apoyar un plan de desarrollo más amplio del país o región donde se implementen.

### FONDO PARA LA ADAPTACIÓN

El establecimiento del Fondo de Adaptación se decidió en la sexta sesión de la Conferencia de las Partes del MNUCC (COP6). Según esta decisión, el Fondo de Adaptación:

- se establecerá mediante el FMAM como fondo de créditos;
- financiará la implementación de los proyectos de adaptación en las Partes no comprendidas dentro del Anexo I, incluyendo las siguientes actividades de adaptación: evitar la deforestación, combatir la degradación de la tierra y la desertificación. Los proyectos serán desarrollados por las agencias ejecutantes de las Naciones Unidas;
- recibirán financiamiento generado mediante división de los ingresos del MDL en el orden del 2 por ciento de las reducciones de las emisiones certificadas – y mediante otras fuentes de financiamiento;
- serán manejados por parte del Comité Ejecutivo del MDL bajo la dirección del COP/MOP. El COP/MOP proporcionará directrices sobre los programas, las prioridades y los criterios de selección para financiar las actividades de adaptación.



## FONDO PROTOTIPO DE CARBONO

El Fondo Prototipo de Carbono (FPC) tiene tres objetivos estratégicos primarios:

- reducción de las emisiones: para demostrar como los proyectos basados en la transacción de la reducción de emisiones de gases de invernadero pueden promover y contribuir al desarrollo sostenible y a disminuir los costos para cumplir con el Protocolo de Kyoto;
- diseminación del conocimiento: para suministrar a las Partes del MNUCC, al sector privado y otras partes interesadas la oportunidad de «aprender haciendo» el desarrollo de políticas, reglas y procesos de negocios para el logro de las reducciones de emisiones bajo el MDL y la Implementación Conjunta;
- asociaciones públicas-privadas para demostrar como el Banco Mundial puede trabajar en colaboración con el público y los sectores privados para movilizar nuevos recursos para los países miembros que solicitan préstamos, mientras que enfrenta los problemas ambientales globales por medio de mecanismos de mercado.

El Fondo Prototipo de Carbono establecerá áreas piloto para la generación de mecanismos de reducción de las emisiones dentro del marco de la Iniciativa Conjunta y el MDL. El Fondo invertirá las contribuciones realizadas por parte de compañías y gobiernos en los proyectos diseñados para promover la reducciones de las emisiones con el Protocolo de Kyoto y el marco emergente para la Iniciativa Conjunta y el MDL. Los contribuyentes, o «Participantes» en el Fondo recibirán una cuota prorata de las reducciones de las emisiones, verificadas y certificadas según los acuerdos alcanzados con los respectivos países donde tengan sede los proyectos.

Es poco probable que un enfoque puramente de mercado de carbono sea exitoso en las tierras áridas. Se requiere un enfoque multifocal donde se consideren otros aspectos como el desarrollo sostenible, la desertificación, la biodiversidad y la seguridad alimentaria. Los fondos de otras convenciones también podrían utilizarse para financiar los programas de secuestro de carbono en las tierras áridas (Cuadro 48).

**CUADRO 48**  
**Posibles fuentes de financiamiento para la aplicación de programas multifocales de secuestro del carbono en tierras áridas**

Fondos de carbono suministrados por las convenciones de las NNUU	Sitio web
<b>CONVENCIÓN PARA EL COMBATE DE LA DESERTIFICACIÓN (CCD)</b>	www.unccd.int
<input type="checkbox"/> Mecanismo global (MG)	www.gm-unccd.org
<input type="checkbox"/> FMMA área focal sobre degradación de las tierras	www.gefweb.org
<b>CONVENCIÓN SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (MNUCC)</b>	www.unfccc.int/
<input type="checkbox"/> FMAM Cambio Climático	www.gefweb.org
<input type="checkbox"/> Área multifocal del FMAM: Manejo Integrado de Ecosistemas	
<input type="checkbox"/> FMAM Cambio Climático Especial	
<input type="checkbox"/> FMAM Países Menos Desarrollados	
<b>PROTOCOLO DE KYOTO (PK)</b>	www.unfccc.int
<input type="checkbox"/> Fondo de Adaptación del FMAM	www.gm-unccd.org
<input type="checkbox"/> Fondo de BioCarbono	www.carbonfinance.org
<input type="checkbox"/> Fondo Prototipo del Carbono	www.prototypecarbonfund.org