



EL PAPEL DEL GANADO EN EL MANTENIMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Joann Whalen¹, Suzelle Barrington²

¹joann.whalen@mcgill.ca; Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Macdonald
Campus of McGill University, Ste Anne de Bellevue (Québec) Canada,
H9X 3V9

Tel. +001-514-398-7943

²suzelle.barrington@mcgill.ca; Faculty of Agricultural and Environmental Sciences,
Macdonald Campus of McGill University, Ste Anne de Bellevue (Québec) Canada,
H9X 3V9

Tel. +001-514-398-7776

INDICE

1. Introducción
2. Caso 1: C orgánico del suelo según la influencia de la rotación de cosechas y el ganado
 - 2.1 Descripción de granjas hipotéticas
 - 2.2 Impacto de las cosechas en el cambio de C del suelo
 - 2.3 Resultados
 - 2.4 Conclusión
3. Caso 2: C orgánico del suelo en sistemas integrados de silvicultura y ganadería
 - 3.1 C orgánico del suelo en sistemas de silvipastura
 - 3.2 C orgánico del suelo en plantaciones híbridas de álamo de rotación breve y receptoras de estiércol
 - 3.3 Resultados
 - 3.4 Conclusión

1. Introducción

La certeza de que los suelos son un sumidero para el carbono atmosférico ha generado un interés considerable en la comunidad científica y la promoción de investigación enfocada a encontrar vías para almacenar más C en los suelos. El secuestro de C en el suelo es un equilibrio delicado entre la cantidad de residuos vegetales que contienen C orgánico (raíces y restos superficiales) que son añadidos al suelo y la cantidad de CO₂ perdida durante el proceso de descomposición [1]. La significación relativa del ganado para el C orgánico del suelo no está bien reconocida, a pesar de que muchas de nuestras tierras de cultivo templadas se dedican a la producción de pienso para animales.

El grano rico en proteínas es un componente importante de las dietas del ganado. En 2006-07, cerca del 55% de la soja producida en los Estados Unidos fue transformada a comida de soja y empleada en alimentar ganado [2]. Durante el mismo período, el 46% del maíz producido en los Estados Unidos fue empleado para alimentar ganado doméstico y el 63% del maíz producido mundialmente fue consumido por animales [3]. La discrepancia entre estos valores se atribuye a la demanda de grano de maíz como alimentación de la producción de bioetanol en los Estados Unidos [4]. En los últimos cincuenta años, los productores han confiado en el cultivo intensivo y las entradas de aportes agroquímicos (fertilizantes, pesticidas inorgánicos) para alcanzar la máxima producción de grano. La adopción de prácticas de conservación de sistemas de cultivo como el arado chisel y la siembra directa, especialmente en regiones semiáridas, recaptura parte del C orgánico del suelo que se perdió cuando esos suelos fueron arados [5]. La aplicación de estiércol animal en estos sistemas reduce los requerimientos de fertilizantes inorgánicos y contiene carbono como material no digerido de la alimentación, lo que se considera como una forma de reciclaje de C más que un aporte de C en el balance de carbono orgánico del suelo.

Los foliajes perennes son igualmente importantes en la dieta del ganado, especialmente para rumiantes capaces de digerir materiales vegetales fibrosos ligno-celulósicos. Sobre un 41% de la tierra agrícola de Estados Unidos y un 23% de las tierras de cultivo de Canadá [6, 7] están plantadas con forrajes que son cosechados como heno o que se dejan como pasto para el ganado pastoreado. La aplicación de estiércol en los campos de heno y las heces depositadas por los animales que pastan proveen a los vegetales de nutrientes esenciales y reciclan parte del C captado por las plantas. La cubierta vegetativa proporcionada por forrajes maximiza la fotosíntesis y la fijación de CO₂, permite la fijación biológica de N₂ cuando hay legumbres presentes, conserva el agua del suelo y reduce las pérdidas de suelo por erosión. Los sistemas de animal-forraje también están caracterizados por menores inversiones de capital y mayor flexibilidad empresarial que los sistemas de producción de cosechas anuales.

El objetivo de la ganadería sostenible es la selección de cosechas que reúnan los requerimientos dietéticos de los animales y maximice la producción [8]. Esto implica que la producción de cosechas en la granja proveerá la cantidad correcta de alimentos ricos en nutrientes para un crecimiento eficiente de los animales con pocas entradas de materiales externos a la granja (energía, agroquímicos). Un desafío importante para desarrollar estos sistemas de ganadería eficientes es la variación en las prácticas de producción animal. Estas se extienden desde los sistemas de pastoreo extensivos como los empleados para ganado ovino y vacuno, a sistemas de tratamiento intensivos como los empleados para carne, leche y huevos. El comportamiento natural y las preferencias dietéticas de cada especie animal y los cambios en requisitos alimenticios durante la vida útil del animal no pueden ser pasados por alto. Las cosechas de biomasa y su calidad no son constantes debido a la variación anual de temperatura y precipitaciones.

Ya que no es posible hacer amplias generalizaciones sobre el papel del ganado en el mantenimiento del C orgánico del suelo, este artículo se centrará en dos casos estudiados

de agroecosistemas templados en Quebec, Canadá. El primer caso de estudio evalúa el equilibrio de C orgánico del suelo en rotaciones de cultivo que son utilizadas en granjas con 1) rumiantes, específicamente ganado productor de leche y 2) no rumiantes, esto es, cerdos. El segundo caso de estudio examina el equilibrio de C orgánico del suelo en sistemas integrados de silvicultura y ganadería.

2. Caso 1: equilibrio de la materia orgánica del suelo según la influencia por la rotación de cultivos y el ganado

El ganado tiene un papel importante que jugar en el mantenimiento del nivel de materia orgánica en la tierra agrícola, porque no sólo retornan la materia orgánica al suelo en términos de estiércol, si no que también consumen cosechas, lo que puede incrementar los contenidos en materia orgánica del suelo. Entre todos los tipos de ganado doméstico, el vacuno permite una rotación incluso más flexible de cultivos debido a las cosechas de forraje consumidas.

El objetivo de este caso de estudio fue el realizar un balance simple de carbono para dos granjas, una con rumiantes, vacas para leche, y otra con no rumiantes o animales monogástricos, cerdos de engorde. La investigación, sin embargo, asumirá que la erosión del suelo está minimizada, las cosechas están optimizadas con buenas prácticas de tratamiento y los residuos de la cosecha son incorporados al suelo antes del crecimiento de la siguiente cosecha.

2.1 Descripción de granjas hipotéticas

Para la granja lechera, se asumió que la alimentación requerida por una (1) vaca de 700 kg podía ser producida en 1.18 ha (0.36 ha de ensilaje del maíz, 0.20 ha de heno de alfalfa, 0.12 ha de heno de hierba, 0.24 ha de grano de maíz y 0.26 ha de soja). Para la granja de cerdos de engorde, se estimó que se podría completar el crecimiento de 25 cerdos con la producción de 20 a 110 kg de las cosechas por ha (0.5 ha de grano de maíz y 0.5 ha de soja). También fue asumido que la vaca excreta el 30% de toda la materia seca ingerida mientras que el cerdo excreta sólo el 10%, basado en la producción diaria normal de estiércol [9]. El análisis fue repetido con las mismas granjas donde los cereales reemplazaron en la ración el 33% de grano de maíz. Esto implica el crecimiento de 0.18 ha de cereales y 0.16 ha de grano de maíz en la granja lechera para un total de 1.28 ha de grano comparadas con las 1.18 ha de grano de maíz, para una vaca lechera de 700 kg. Para la granja de cerdos, 0.4 ha de cereales fueron cultivadas con 0.33 ha de grano de maíz y 0.5 ha de soja para un total de 1.23 ha, comparadas con sólo 1.0 ha para grano de maíz y soja, para 25 cerdos de engorde.

2.2. Impacto del cultivo en el cambio del C del suelo

El impacto del cultivo en el cambio del carbono y el nitrógeno del suelo fue estudiado durante largos períodos por un número de investigadores (Tabla 1). Sobre todo, estos estudios sugieren que el grano de maíz y el ensilado de maíz añaden y quitan respectivamente, 2.0 y 0.5 toneladas de carbono al suelo por ha y año. Los cereales y la soja generalmente reducen el carbono del suelo a una tasa de 2.0 y 1.0 tonelada por ha y año respectivamente. Se ha descubierto que la alfalfa incrementa el carbono del suelo a una tasa de 2 toneladas por ha y año. Mientras que para el heno de hierba se obtuvieron datos limitados, se asumió que este cultivo puede fijar 1 tonelada de carbono al suelo por ha y año.

Durante un estudio realizado en Nebraska para residuos de cosecha incorporados al terreno, sólo el 33% de los tallos de maíz se degradaron tras 6 meses, mientras que la degradación de la paja alcanzó el 66% durante el mismo periodo. Para la alfalfa, el 75% de estos residuos se degradaron tanto en la superficie como introducidos en el suelo por arado, mientras que para la paja de trigo el 45-50% se degradó cuando se dejó en la superficie y el 80% cuando se introdujo al suelo arando, tras 78 días a 28°C [9]. Esto explica porque una cosecha de cereal deja un déficit de materia orgánica en el suelo mientras que la cosecha de grano de maíz incrementa la materia orgánica del suelo, incluso cuando se incorporan los residuos al suelo.

2.3. Resultados

Por consiguiente, la Tabla 2 resume el cambio medio en la materia orgánica del suelo para la granja lechera y la porcina, ambas para la rotación de maíz/soja/alfalfa/hierba con y sin cereal, y para la granja porcina nuevamente con la rotación maíz/soja con y sin cereales. El carbono orgánico del suelo cambia cuando se compara con una granja control con una rotación maíz/soja con y sin cereales, pero sin ganado.

Tabla 1.- Tasa de aplicación de residuo de cosecha y efecto en la materia orgánica del suelo y el C

Autores	Período de estudio (años) y cosecha	Localización	Clima	Aplicación de residuo orgánico (ton/ha/año)
[10] McCalla y Dubley (1943)	6 meses	Nebraska, USA	Continental	33% degradación tallos maíz 66% degradación paja de trigo
[11] Hobbs y Brown (1965)	40 años granos pequeños	Kansas, USA	Continental	Materia orgánica del suelo constante con 20 t/ha/año de estiércol
[12] Larson <i>et al.</i> (1972)	12 años maíz	Iowa, USA	Continental	Materia orgánica del suelo constante con 6 t/ha/año de residuo vegetal
[13] Anderson y Peterson (1973)	60 años maíz	Nebraska, USA	Continental	Incremento del N del suelo con 27 t/ha/año de estiércol
[14] Black (1973)	7 años Trigo en barbecho	Montana USA	Continental	C y N del suelo constantes con 3.6 t/ha/año de paja
[15] Jenkinson y Johnson (1977)	123 años cebada	Rothamsted, Inglaterra	Templado húmedo	Incremento del N del suelo con 35 t/año de estiércol
[16] Rasmussen <i>et al.</i> (1980)	45 años trigo en barbecho	Pacífico Noroeste (USA)	Semiárido	C y N del suelo estables cuando se dejaba la paja y se añadían 22.4 t/ha/año de estiércol
[17] Angers (1992)	5 años maíz de ensilaje alfalfa	Ciudad de Québec Canada	Templado húmedo	El ensilaje de maíz pierde 0.5 t de C/año/ha. La alfalfa añade 2.5 t de C/año/ha y alcanza un máximo tras 3 años
[18] Anthoni <i>et al.</i> (2004)	1 año Trigo de invierno	Thuringia, Alemania	Templado	Pérdida de 2.4 t/ha/año de C a esar de la adición de 3 t/ha de estiércol solido.
[19] Baker y Griffis (2005)	2 años Maíz/soja	Minnesota, USA	Continental	Aumento of 900 kg C/ha/año.
[20] Hollinger <i>et al.</i> (2005)	5 años Maíz/soja	Illinois, USA	Continental	Aumento de 1.84 t/ha/año de C con maíz y pérdida de 0.94 t/ha/año de C con soja.
[21] Masri y Ryan (2006)	12 años cereales/alfalfa /algarroba	Siria	Mediterráneo o semiárido	La alfalfa y las algarrobas irrigadas incrementan la materia orgánica del suelo en 3.0 t/ha/año
[22] Su (2007)	1 año Alfalfa	China	Árido	La alfalfa añadió 0.57 t/ha/año de C bajo irrigación

Los resultados mostrados en la Tabla 2 sugieren que la granja láctea ofrece la mejor combinación para incrementar la materia orgánica del suelo, la cual tras un número de años [17], alcanza un nivel máximo estabilizado. La inclusión de cereales en las rotaciones reduce la tasa de acumulación de C en el suelo e incrementa el área de cultivo requerida para la vaca lechera. Igualmente para la granja porcina, una cantidad neta de C del suelo se puede acumular sobre una base anual, pero en una tasa menor comparada con la granja láctea, debido al menor retorno de C en el estiércol, ya que dicha fracción es más digerida. La granja control sin ganado y que vendía toda su cosecha, todavía puede mantener el C orgánico del suelo incluso con cereales pero necesita producir buenas cosechas para maximizar los residuos de cosecha que incorporar al suelo y protegerlos frente a la erosión.

Tabla 2.- Acumulación de C del suelo para varios cultivos

Granja	Estiércol (t C/ha/año)	Residuos de cosecha (t C /ha/año)	Cambio neto en C del suelo (t C/ha/año)
Lechera sin cereales	1.20	0.5	1.7
Lechera con cereales	1.20	0.03	1.23
Porcino sin cereales	0.44	0.13	0.57
Porcino con cereales	0.44	0.5	0.94
Granja con maíz & soja sin cereales	0.00	0.5	0.50
Granja con maíz, soja & cereales	0.00	0.13	0.13

2.4. Conclusión

Este análisis sugiere que las granjas modernas pueden mantener su materia orgánica del suelo, e incluso incrementarla, con buenas prácticas de tratamiento. Estos resultados coinciden con la tendencia observada en Canadá donde la materia orgánica del suelo se ha ido incrementando a una tasa de 4.4 t/ha/año desde 1991, según informa Agricultura y Agri-Food Canada [23]. El ganado contribuye a incrementar la materia orgánica del suelo por el retorno de parte del carbono al suelo. Por lo tanto, las granjas que producen cosechas se benefician cuando reciben estiércoles de granjas con escasez de tierras a su disposición.

3. Caso 2: Equilibrio del C orgánico del suelo en sistemas integrados de silvicultura-ganado

Juntar árboles en crecimiento y ganado puede ser una empresa complementaria y de producción sostenible. La silvicultura es un tipo de sistema agroforestal donde se planta un cultivo de forraje en sotobosque entre árboles con una amplia separación y al ganado se le permite pastar entre el forraje. Los árboles son podados regularmente para que crezcan derechos, aumenten su valor y permitan que se infiltre la luz suficiente para la producción de forraje. Al mismo tiempo, los árboles proveen de sombra y refugio al ganado, lo que mejora el bienestar animal. Algunos forrajes tienen un menor contenido en fibra cuando crecen en un ambiente parcialmente sombrío y son más digeribles [24]. Las plantaciones

de coníferas como los árboles de Navidad pueden ser adaptadas a los sistemas de silvicultura, y algunos huertos de nueces y fruta también pueden ser pastados.

La diferencia entre la silvicultura y zonas de pastoreo o de explotación forestal para pastoreo es que el sistema agroforestal es manejado más intensamente. Generalmente, los sistemas de silvicultura son establecidos en un pasto existente que ha sido abonado con cal, aplicado estiércol y sembrado con el forraje deseado. Otra forma de establecer un sistema de silvicultura es reducir los árboles de una plantación para madera y plantar especies para forraje mejoradas entre los árboles que quedan. Vacas, ovejas, cabras, caballos, cerdos y animales de caza pueden ser seleccionados como los animales de pastoreo, dependiendo del tipo y edad de los árboles y del forraje que crece. Ovejas, cabras y ciervos tienden a pastar de los árboles, mientras que los más grandes como vacas y alces prefieren hacerlo en árboles jóvenes. El entrenamiento animal, una cuidadosa selección de los períodos de pastoreo, el pastoreo rotacional y variado y las barreras pueden minimizar el daño a los árboles, el sobrepastoreo y la compactación del suelo [25]. Comparado con la producción intensiva de ganado en comederos, los sistemas de silvipastoreo son menos propensos a despertar inquietudes relacionadas con el bienestar animal, el ruido, polvo, olores y la calidad del agua.

El objetivo del silvipastoreo es proveer de un flujo de ingresos a corto plazo manteniendo la producción del ganado y con productos de gran valor de los árboles que serán cosechados a medio y largo plazo. Los productos potenciales de los árboles incluyen: troncos serradizos, troncos para chapado/laminado, madera para pasta papelera, leña, paja del pino, nueces, fruta, verdor ornamental, jarabe de arce, setas y mantillo orgánico.

3.1. C orgánico del suelo en sistemas de silvipastoreo

Se espera que el almacenamiento neto de C sea mayor en un sistema de silvipastoreo que en otros sistemas de pasto, principalmente debido al C almacenado en los árboles. La reserva de C orgánico del suelo puede ser mantenida o incrementada como consecuencia de las entradas de C de los árboles (hojas caídas, ramas muertas y raíces) y forrajes (hojas y tallos no pastados, raíces muertas) que son transformados en C orgánico del suelo por organismos descomponedores. Parte del C vegetal consumido por los animales que pastan se retiene en el sistema (p.ej., aportes de estiércol) y el resto es convertido en biomasa animal o perdido via respiración animal y procesos metabólicos. Las diferencias clave entre el ciclo del C en silvipastoreo y los sistemas de pastoreo tradicionales están ilustrados en la Figura 1.

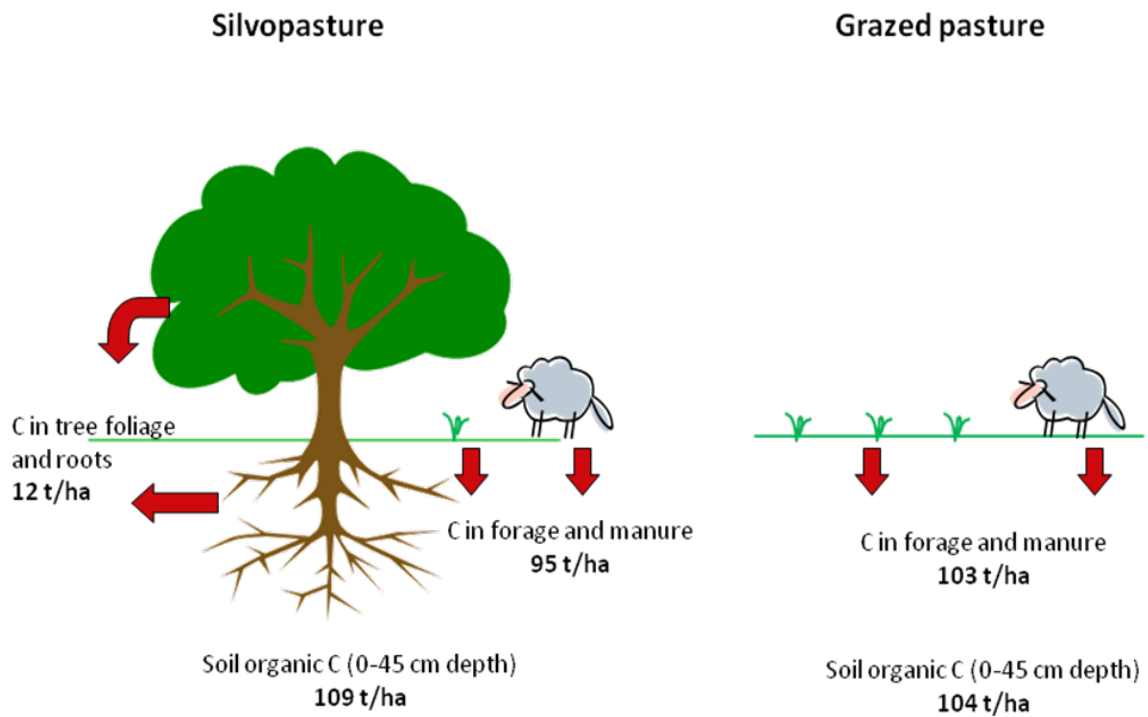


Figura 1.- Almacenamiento de carbono en un sistema de silvopastoreo con abetos Douglas de 11 años y sotobosque perenne de centeno/trébol, comparado con un campo de pasto con vegetación perenne de centeno/trébol. El sistema de silvopastoreo acumuló $520 \text{ kg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ más que el campo de pasto, debido al C almacenado en el follaje de los árboles, corteza, ramas, tallo y raíces (adaptado de [26])

Los sistemas de silvopastoreo son comunes en regiones templadas que raramente tienen heladas o nieve durante los meses de invierno. Por ejemplo, el ganado vacuno puede pastar en monocultivos de pino durante todo el año en el sureste de Estados Unidos (Florida, Louisiana, Mississippi), y el pastoreo de ganado ovino en plantaciones de álamo híbrido han sido exitosas en Oregon, al noroeste de Estados Unidos [25]. El silvopastoreo no ha sido demostrado con éxito en Canadá debido a que las actividades de pastoreo están limitadas a los meses de primavera y verano. Como ejemplo, la provincia de Quebec tiene un período libre de heladas de 160 días y recibe unos 225 cm de nieve por año. A pesar de la ausencia de silvopastoreo en la provincia, puede haber otras formas de integrar la producción forestal y del ganado.

3.2. C orgánico del suelo en plantaciones de álamo híbrido de rotación breve con aplicación de estiércol

Quebec posee un bosque templado mixto de caducas en el sur de la provincia y un extenso bosque boreal dominado por coníferas (abeto, picea, pino) y álamos (*Populus* spp.). En la pasada década, más de 3000 hectáreas de bosque de rotación breve fueron plantadas con álamo híbrido, un pariente de los álamos nativos que crece más rápidamente [27]. Tras 10-12 años desde su plantación, los álamos híbridos pueden ser cosechados y transformados en papel, pellets de madera y láminas/madera de construcción. Como las plantaciones se establecen generalmente en claros o en tierras marginales de agricultura con una fertilidad inherente baja, es necesario añadir un fuente fertilizante equilibrada para alcanzar el crecimiento óptimo del álamo híbrido [28].

En regiones donde hay un exceso de estiércol animal y otros residuos, hay una oportunidad para reciclar N, P, K y otros nutrientes aplicando estiércol a los álamos híbridos. Cuando el purín líquido de cerdo fue aplicado a una tasa de $140 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, el diámetro de los árboles se duplicó y los árboles crecieron 1,5 veces más altos que el álamo híbrido no fertilizado [29]. Aplicamos purín líquido de cerdo en la superficie del suelo, alrededor de la base del árbol, y no incorporamos el purín para evitar dañar las raíces del árbol. Esto contribuyó probablemente a alguna pérdida de la eficiencia fertilizante por N, ya que el purín de cerdo es susceptible de perder nitrógeno por volatilización de NH_3 cuando se deja en la superficie del suelo. De hecho, el mejor tratamiento fertilizante experimental fue la mezcla de purín de cerdo y restos biosólidos de la fabricación de papel compostados (relación C/N = 16). El tratamiento por mezcla de fertilizantes produjo árboles con un diámetro tres veces mayor y dos veces más altos que los árboles no fertilizados [29]. Parece probable que los biosólidos de la fabricación de papel absorbieron parte del NH_4^+ del purín de cerdo y eso redujo la pérdida de N por volatilización, según los resultados del N mineral en el suelo [29].

Los resultados de este estudio [29] revelan que el rápido crecimiento de los álamos híbridos llevó a un secuestro de 0.3 a $2.3 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la biomasa aérea y terrestre, una estimación de 0.1 a $0.9 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en raíces, y aproximadamente $0.9 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la vegetación no segada que creció entre los troncos de los árboles. Hubo hasta cuatro veces más secuestro de C en el bosque de rotación breve que en el campo de heno cercano no mejorado. Para alcanzar una reducción de emisión de una tonelada de $\text{CO}_2\text{-C}$ en esta granja requerirá bastantes años y más tierra, si los árboles fueron no fertilizados, pero podría conseguirse en menos de 1 ha en el plazo de un año si los árboles fueran fertilizados. El crecimiento de árboles y cosechas en esta granja están constreñidos por varios factores: 1) bajos niveles de fertilidad en suelos, 2) condiciones de suelo rocosa, y 3) pobre drenaje natural.

3.3. Resultados

De la granja descrita anteriormente, fue considerado el potencial de secuestro de carbono por 1 ha del terreno de la granja para tres posibles usos de la tierra: producción de maíz, producción de heno y un cultivo mixto de árbol-heno con álamo híbrido. Asumimos que el productor aplicará purín líquido de cerdo a todos los cultivos que crezcan en su parcela de baja fertilidad. La Tabla 3 da la producción anual de biomasa esperada (biomasa aérea y terrestre) para cada cultivo. Asumimos que el grano de maíz sería retirado en la cosecha, pero los tallos y las raíces se dejarían en el terreno y contribuirían al secuestro de carbono. El campo de heno (mezcla de forraje de hierba y legumbre) sería cosechado dos veces por estación, lo que es apropiado para esta región. El secuestro de carbono en el campo de heno es debido a la entrada de C por las raíces, que se dejan en el campo. Los álamos híbridos podrían ser plantados en filas espaciadas en anchura, permitiendo al productor cultivar una cosecha de heno entre las filas de árboles; dejando espacio suficiente entre las filas (unos 9 metros) también permitiría al productor aplicar purín líquido a los árboles y el heno que crece entre sus filas con un tractor con cisterna convencional. El secuestro de carbono en el cultivo mixto de heno y álamo híbrido podría ser resultado de la fijación de CO_2 y el almacenamiento en el tronco, ramas, hojas y raíces de los árboles, así como del carbono incorporado por las raíces del heno.

La mayor parte del secuestro de carbono se espera en el cultivo mixto de árboles y heno que en los otros usos del terreno. Un simple análisis económico fue emprendido para comparar los costes de producción y los ingresos estimados para cada uso del terreno basados en la producción comercial de cada cosecha (Tabla 3).

Tabla 3.- Secuestro de carbono basado en el sistema de producción del cultivo

Parámetro	Maíz	Heno	Cultivo mixto árbol-heno (400 árboles/ha)
Biomasa aérea (t/ha/año)	16 - 20	5 - 8	5 - 8 (heno) más 2 - 9 (álamo)
Biomasa terrestre (t/ha/año)	3 - 4	10 - 16	10 - 18
Índice de cosecha (biomasa aérea)	55%	80%	Cosecha anual de heno Árboles cosechados tras 15 años
Secuestro de C (t/ha/año)	10 - 11	11 - 18	12 - 30
Secuestro de CO ₂ (t/ha/año)	37 - 40	40 - 66	44 - 110
Costes producción (\$/ha/año)	\$850 ^a	\$500 ^a	\$710 ^b
Beneficios anuales (\$/t cosechada)	\$1056 - \$1320 ^c	\$572 - \$915 ^d	\$572 - \$915 ^d
Beneficios árboles (\$/cosecha (tras 15 años))	\$0	\$0	\$3125 - \$14,062 ^e
Beneficio neto (\$/ha/año) ^f	\$206 to \$470	\$72 to \$415	\$70 to \$1142

^aLos costes de producción para el maíz y el heno fueron estimados de otro estudio e incluidos los costes del fertilizante, las semillas y la maquinaria.

^bLos costes de producción incluyen 500\$ anuales por el campo de heno más la instalación y mantenimiento de los álamos híbridos (210\$ anuales).

^cEl maíz en grano se vende a 150\$/t y cuesta 30\$/t secarlo (ingreso neto = 120\$/t).

^dEl heno se vende a 143\$/t.

^eTras 15 años, los árboles fueron cosechados y vendidos. El álamo híbrido tiene un valor de 40\$/m³ y la densidad de los bosques de álamo es de 384kg/m³.

^fLa ganancia neta anual basada en los ingresos adelantados en un sólo pago por la cosecha de árboles (el valor no fue descontado de los beneficios y costes futuros).

3.4. Conclusión

En Quebec, Canadá, el clima frío limita nuestra habilidad para establecer sistemas de silvipastoreo para animales que pastan. Sin embargo, se podía prever un sistema integrado forestal-ganado que recicle los nutrientes de los excrementos animales y utilice la producción de forraje mixto de hierba y legumbre. Ya que los álamos híbridos responden a los fertilizantes orgánicos como el purín líquido de cerdo, podrían ser plantados en filas muy espaciadas, dejando espacio para que el productor esparciera el purín y obtuviera una cosecha de heno cada año hasta que los árboles fueran lo suficientemente grandes para ser cortados (unos 15 años). Un simple análisis económico sugiere que un cultivo mixto de árbol-heno podría ser una opción sostenible y beneficiosa, y además promovería el secuestro de carbono. Los sistemas integrados forestales-ganado podrían ser una buena opción para granjas con tierras marginales que no son adecuadas para la producción de una cosecha anual (p.ej., baja fertilidad, rocosos, drenaje pobre), especialmente si estas granjas están localizadas en regiones con un exceso de estiércol animal.

Referencias

- [1] Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, pp. 815-830.

- [2] United States Department of Agriculture - Economic Research Service. (2008). Oil crops yearbook, 2006-07 dataset (89002). Issued March 2008. <http://www.ers.usda.gov/Briefing/SoybeansOilCrops/>
- [3] United States Department of Agriculture – Foreign Agricultural Service. (2008). Grain: world markets and trade. Circular series FG 11-08, November 2008. <http://www.fas.usda.gov/psdonline/>
- [4] Tyner, W.E. (2008). The US ethanol and biofuels boom: its origins, current status and future prospects. *Bioscience* 58, pp. 646-653.
- [5] Paustian, K.; Collins, H. P.; Paul, E. A. (1997). Management controls on soil carbon. In: E. A. Paul; K. Paustian; E.T. Elliott; C. V. Cole (eds). Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 15–49.
- [6] United States Department of Agriculture – National Agricultural Statistics Service. (2008). Crop production 2007 summary. Issued January 2008. Document Cr Pr 2-1 (08). <http://www.nass.usda.gov>
- [7] Statistics Canada. (2008). CANSIM Tables – Agriculture 2008. Catalogue no. 22-002-X. <http://www.statcan.ca>
- [8] Parker, C.F. (1991) Role of animals in sustainable agriculture. In: C.A. Edwards; R. Lal; P. Madden; R.H. Miller; G. House (eds). Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA, USA, pp. 238–248.
- [9] ASABE (2007). Manure production and characteristics. In: Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St Joseph, MI, USA, pp.427.
- [10] McCalla, T.M.; Dubley, F.L. (1943). Disintegration of crop residues as influenced by sub tillage and plowing. *Journal of the American Society of Agronomy* 35, pp. 306-315.
- [11] Hobbs, J.A.; Brown, P.L. (1965). Effect of cropping and management on nitrogen and organic carbon contents of a western Kansas soil. Kansas Agricultural Experimental Station Technical Bulletin 144, pp.1
- [12] Larson, W.E.; Clapp, C.E.; Pierre, W.H.; Morachan, Y.B. (1972). Effect of increasing amounts of organic residues on continuous corn. II Organic carbon, nitrogen phosphorous and sulfur. *Agronomy Journal* 64, pp. 204-208.
- [13] Anderson, F.N.; Peterson, G.A. (1973). Effect of continuous corn (*Zea mays* L.), manuring and nitrogen fertilization, on yield and protein content of the grain and soil nitrogen content. *Agronomy Journal* 65, pp.697-700.
- [14] Black, A.L. (1973). Soil property changes associated with crop residue management in a wheat-fallow rotation. *Soil Science Society of America Proceedings* 37, pp. 943-946.
- [15] Jenkinson, D.S.; Johnson, A.E. (1977). Soil organic matter in the Hoosfield continuous barley experiment. Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2, Harpenden, Herts, England, pp. 81-101.
- [16] Rasmussen, P.E.; Allmaras, R.R.; Rohde, C.R.; Roager, N.C. (1980). Crop residue influence on soil carbon and nitrogen in a wheat fallow system. *Soil Science Society of America Journal* 44, pp. 596-600.
- [17] Angers, D.A. (1992). Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Science Society of America Journal* 56, pp. 1244-1249.
- [18] Anthoni, P.M.; Freibauer, A.; Kolle, O.; Schulze, E-D. (2004). Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, pp. 55-67.
- [19] Baker, J.M.; Griffis, T.J. (2005). Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology* 128, pp. 163-177.
- [20] Hollinger, S.E.; Bernacchi, C.J.; Meyers, T.P. (2005). Carbon budget of mature no-till ecosystem in North central region of the United States. *Agricultural and Forest Meteorology* 128, pp. 59-69.
- [21] Masri, Z; Ryan, J. (2006). Soil organic matter and related physical properties in a Mediterranean wheat-based rotation trial. *Soil & Tillage Research* 87, pp. 146-154.

- [22] Su, Y.Z. (2007). Soil carbon and nitrogen sequestration following the conversion of cropland to alfalfa forage land in northwest China. *Soil & Tillage Research* 92, pp. 181-189.
- [23] Agriculture and Agri-Food Canada (2008). Soil organic carbon. In: National agri-environmental health analysis reporting program. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1182192423095&lang=e>
- [24] Lin, C.H.; McGraw, R.L.; George, M.F.; Garrett, H.E. (2001). Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. *Agroforestry Systems* 53, pp. 269-281.
- [25] Garrett, H.E.; Kerley, M.S.; Ladyman, K.P.; Walter, W.D.; Godsey, L.D.; Van Sambeek, J.W.; Brauer, D.K. (2004). Hardwood silvopasture management in North America. *Agroforestry Systems* 61, pp. 21-33.
- [26] Sharrow, S.H.; Ismail, S. (2004). Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems* 60, pp. 123-130.
- [27] Labrecque, M.; Teodorescu, T.I. (2003). High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 25, pp. 135-146.
- [28] Dickmann, D.I.; Isebrands, J.G.; Blake, T.J.; Kosola, K.; Kort, J. (2001). Physiological ecology of poplars. In: D.I. Dickmann; J.G. Isebrands; J.E. Eckenwalder; J. Richardson (eds). Poplar culture in North America. NRC Research Press, Ottawa, ON, Canada, pp. 77-118.
- [29] Lteif, A.; Whalen, J.K.; Bradley, R.L.; Camiré, C. (2008). Diagnostic tools to evaluate the foliar nutrition and growth of hybrid poplars. *Canadian Journal of Forest Research* 38, pp. 2138-2147.

