

APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



Capítulo 8

Almacenaje y secuestro de carbono en suelos del Uruguay

Virginia Pravia, Andrés Quincke, Valentina Rubio, Raquel Barro, Ignacio Macedo, Jorge Sawchik, José Terra y Verónica Ciganda

1. Importancia del carbono orgánico del suelo a nivel local y global

El carbono orgánico del suelo representa un pilar fundamental para el desarrollo de la agricultura sostenible a nivel local, siendo el principal indicador de la calidad del suelo y de su potencial productivo. Adicionalmente, los suelos contienen la mayor reserva terrestre de carbono (C) a nivel global; por lo tanto, su secuestro tiene el potencial de reducir los gases de efecto invernadero y contribuir a la lucha contra el cambio climático. El contenido de C orgánico del suelo está directamente relacionado con el contenido de materia orgánica, la cual se compone de, aproximadamente, un 58% de carbono. De la materia orgánica dependen múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y, a través de la “salud del suelo”, esta contribuye a aumentar la oferta de servicios ecosistémicos. Por lo tanto, el contenido de C del suelo y la observación de sus cambios resultan clave en trayectorias agroecológicas.

Típicamente, el contenido de materia orgánica de los suelos varía entre 1% y 6%. Estas variaciones se explican por la variabilidad natural de los suelos y la variabilidad antropogénica generada por los diferentes sistemas productivos y las prácticas de manejo dominantes. En este sentido, a nivel global se ha reportado que las prácticas agrícolas han ocasionado pérdidas en los niveles de C que varían entre el 25% y el 75% de los valores iniciales de C (Lal, 2008). Los cambios en el contenido de C del suelo son en general lentos, pero aditivos, por lo que los experimentos de largo plazo son cruciales para evaluar cómo diferentes prácticas de

manejo pueden afectar los contenidos de C del suelo y sus efectos en la salud y capacidad productiva de los suelos.

1.1. Agricultura sustentable y carbono orgánico en el suelo: calidad de suelos, productividad y seguridad alimentaria

La disponibilidad de agua y nutrientes, la porosidad, la agregación, la resistencia a la erosión y la actividad microbiana se encuentran altamente relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo. Estas relaciones determinadas por la comunidad científica a nivel global se han constatado también a lo largo de varias décadas en experimentos de largo plazo en el INIA, en los que el deterioro de propiedades físicas y químicas del suelo debido a usos más intensivos de este se ha visto asociado a pérdidas de carbono (Grahmann *et al.*, 2020; Rubio *et al.*, 2019, 2018).

Calidad física del suelo

Suelos con menores contenidos de materia orgánica, asociados a un uso agrícola más intensivo, presentan mayores niveles de compactación registrados como aumentos en la densidad aparente y resistencia a la penetración (Terra y García Prechac, 2001; Rubio *et al.*, 2018). Este deterioro se explica principalmente por una reducción en el volumen de poros de mayor tamaño, los cuales tienen un rol fundamental en la infiltración y el drenaje del agua del suelo (Rubio *et al.*, 2018). Las consecuencias de estos cambios son tanto ambientales como productivas. Por un lado, una menor infiltración se vincula directamente a un aumento del escurrimiento superficial, lo que incrementa los riesgos de erosión de los suelos y con ello el movimiento de nutrientes y químicos hacia aguas superficiales. Por otro lado, suelos degradados presentan mayores niveles de saturación hídrica, a igual contenido de agua, que suelos no degradados, lo cual aumenta el riesgo de anoxia para los cultivos (Rubio *et al.*, 2018).

El contenido de C del suelo es también el principal determinante de la estabilidad de agregados para molisoles en la región (Rubio *et al.*, 2019). Esta propiedad está relacionada con la capacidad del suelo de resistir cualquier estrés, sea tráfico de maquinaria o lluvias, sin que esto cause la ruptura de sus agregados y, por tanto, pérdidas de su estructura. Agregados débiles, asociados a un bajo contenido de carbono, se rompen más fácilmente debido al impacto de las gotas de lluvia, lo cual agrava aún

más los problemas de erosión, facilitando además el encostramiento de los suelos y su compactación.

Calidad química del suelo

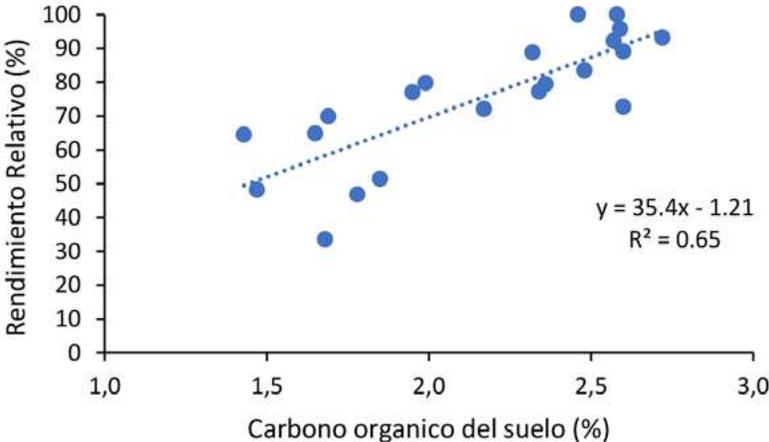
El contenido de carbono está altamente relacionado con el contenido de distintos elementos a través del ciclo de la materia orgánica que funciona como reservorio de nutrientes. Especialmente, el contenido de nitrógeno (N) del suelo mantiene una estrecha relación con el contenido de carbono, que en términos globales se estima en 10:1 (C:N). En suelos con bajos contenidos de carbono, asociados a usos más intensivos del suelo, se ha constatado una limitación en el contenido de nitrógeno total y en la capacidad de suministro de nitrógeno como nutriente para las plantas. Esta limitación se ha observado a través del potencial de mineralización de nitrógeno determinado en incubaciones de suelo (Díaz-Roselló, 1992a y 1992b; Morón, 2003; García y Quincke, 2011) y en estimaciones del balance de nitrógeno de rotaciones de diferente intensidad (Pravia *et al.*, 2019). Además de la provisión de nutrientes al agroecosistema, el contenido de materia orgánica del suelo se asocia a otras propiedades químicas y biológicas del suelo.

Capacidad productiva

Estas propiedades del suelo asociadas al contenido de materia orgánica determinan que suelos con un mayor contenido de carbono orgánico representen ambientes de mayor productividad potencial. Cuando un suelo pierde parte del carbono, se reduce el rendimiento potencial de los cultivos implantados. La relación entre el contenido de carbono del suelo y el rendimiento de los cultivos está condicionada, entre otros factores, por los niveles de fertilización nitrogenada y las condiciones climáticas del año. Las pérdidas del potencial de producción asociadas a pérdidas de carbono en el suelo se estimaron en el experimento de largo plazo del INIA La Estanzuela durante 44 años de evaluación para cultivos de trigo, cebada, girasol y sorgo (Díaz *et al.*, 2009). Estas pérdidas de rendimiento comenzaron a observarse en forma significativa luego de que el suelo perdió el 20% de su contenido de carbono original; considerándose una zona de resiliencia hasta ese punto donde aún no se observan reducciones significativas en rendimiento. Cuando el carbono orgánico en el sue-

lo reduce su contenido del 80% al 30% respecto de los valores originales, los rendimientos caen desde el 100% al 30% del potencial productivo para trigo. Siendo poco frecuente que la degradación del suelo lleve el contenido de carbono a valores inferiores al 30% del original, se considera este como un valor mínimo en el modelo de Díaz *et al.* (2009). Este modelo de valores relativos permite aplicar estas estimaciones a agroecosistemas similares a los evaluados. Como valor de referencia para estos suelos, un contenido de carbono orgánico de 2,35% en los primeros 15 cm de suelo representó el valor que permitió obtener al menos el 95% del rendimiento alcanzado en 495 casos de estudio en cultivos de trigo y cebada en estos experimentos; mientras que para el maíz este valor sería de 2,72 % (Figura 1). A nivel de chacras, relevamientos realizados por Ernst *et al.* (2018) en la zona litoral del país han constatado pérdidas de rendimiento asociadas a la degradación del suelo como resultado de la intensificación de los sistemas de producción que no se compensan totalmente con el agregado de nitrógeno como fertilizante.

FIGURA 1. RENDIMIENTO DE MAÍZ EXPRESADO COMO RELATIVO AL RENDIMIENTO MÁXIMO DEL AÑO DE EVALUACIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO DEL SUELO (0-15 CM, EN %).



Nota: Evaluaciones realizadas durante las zafras 2014-2015 y 2015-2016 ante idénticas condiciones de manejo.

Fuente: Rubio (2018).

Suelos con un mayor contenido de carbono constituyen, por lo tanto, suelos más fértiles y representan una mayor oportunidad de satisfacer las demandas crecientes, a nivel global, de alimentos, fibra y energía que acompañan el incremento exponencial de la población mundial.

1.2. Dimensión ambiental y social: el rol del carbono del suelo ante el calentamiento global y los compromisos asumidos en acuerdos internacionales

A nivel global, los suelos contienen la mayor reserva terrestre de carbono que, estimada en 1.500×10^{15} g de carbono a un metro de profundidad, representa aproximadamente el doble del contenido en la atmósfera. El aumento del contenido de carbono en la atmósfera, en la forma de dióxido de carbono, contribuye al calentamiento global. Por lo tanto, pequeños cambios en el contenido de carbono del suelo y en sus flujos desde y hacia la atmósfera podrían implicar considerables cambios en la regulación de procesos biogeoquímicos de alcance global, aumentando o mitigando el efecto invernadero y el cambio climático, según el flujo neto sea hacia o desde la atmósfera.

La idea de que los suelos y la agricultura puedan representar al mismo tiempo soluciones para problemas globales como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la polución ambiental ha dado lugar a varias iniciativas internacionales que atienden la conservación y el incremento del carbono orgánico del suelo. En particular, el Acuerdo de París (COP21), dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 2015, promueve la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento de los sumideros para la mitigación del cambio climático, la adaptación a sus efectos negativos y la construcción de resiliencia. Existen iniciativas en similar sentido como la Alianza sobre evaluación ambiental y desempeño ecológico de la ganadería (LEAP) entre otras desde la FAO, la Alianza Global de Investigación en Gases de Efecto Invernadero en la Agricultura y “4 x 1000, Suelos para la Seguridad Alimentaria y el Clima”,¹ entre otras.

¹ La 4 x 1000 es una iniciativa internacional “Soils for Food Security and Climate”, que se lanzó como propuesta del gobierno francés en la UNFCCC COP21 como parte del plan de acción Lima-París. Se trata de secuestrar carbono en el suelo a una tasa de 0,4% (4 por mil) del stock de carbono contenido en el suelo a 30 cm (es una tasa biológica). Véase: <<https://4p1000.org/>>.

La cuantificación del secuestro de carbono de los agroecosistemas es un gran desafío global que comienza a reflejarse en el mercado económico mundial, constatándose las primeras ventas de bonos de carbono del suelo en el mercado internacional. En algunos países como Estados Unidos, los incentivos económicos se trasladan de forma explícita desde los gobiernos a través de planes de créditos impositivos para productores que apliquen medidas de promoción de la captura de carbono. En otros casos, este desafío llega de forma menos visible para los productores, pero no menos importante. A través de los acuerdos internacionales entre los gobiernos, este desafío se convierte en un compromiso a nivel nacional, cuyo cumplimiento es tenido en cuenta al realizar acuerdos comerciales entre los países y sus bloques económicos. Un ejemplo claro es la polémica generada por la exigencia del cumplimiento de los compromisos ambientales del Acuerdo de París para la entrada en vigor del acuerdo entre los bloques económicos Mercosur-Unión Europea.

El Acuerdo de París compromete a los países firmantes como Uruguay a realizar esfuerzos voluntarios para limitar el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C respecto de la era preindustrial y continuar sus esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C. Para esto, se deben presentar en forma bianual informes nacionales que dan cuenta del avance en las metas comprometidas de realizar acciones locales para limitar las emisiones, y para conservar y aumentar los sumideros y reservorios de los GEI. De acuerdo con el último inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI, 2017, 2019), las emisiones del sector que comprende la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) representan el 75,4% de las emisiones totales del Uruguay, con una contribución importante de la ganadería. El sector AFOLU es a su vez responsable por el 100% de las remociones, que se dividen entre carbono en la biomasa vegetal, la materia orgánica muerta y el carbono orgánico en el suelo. Por lo tanto, los cambios en el manejo de suelos que contribuyan al secuestro de carbono pueden significar un aporte muy importante.

2. ¿Cómo se retiene carbono en el suelo?

2.1. Concepto de balance y secuestro de carbono

El secuestro de carbono en el suelo se basa en el proceso de fotosíntesis para remover dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, que es luego

aportado en forma de residuos al suelo y mediante descomposición microbiana es posteriormente almacenado en forma de materia orgánica por un largo período de tiempo. El contenido de carbono orgánico del suelo resulta del balance entre el carbono agregado por los residuos, incluyendo las raíces y enmiendas orgánicas como el abono o compost, y de las pérdidas de carbono al ambiente por procesos de respiración y descomposición. Los procesos de erosión significan una pérdida local de carbono y se traducen en la degradación y pérdida de productividad del suelo, pudiendo ocurrir una redistribución a otras áreas.

Por otro lado, para secuestrar carbono de manera efectiva en los agroecosistemas se debe tener en cuenta que, además del flujo de CO_2 , existen pérdidas de otros gases de efecto invernadero como parte de los procesos de producción. El metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que se producen como resultado de distintos procesos microbianos naturales en el sistema, tienen un poder de calentamiento global sensiblemente mayor al del CO_2 . El CH_4 es producido durante el proceso de digestión de los rumiantes; por lo tanto, su cuantificación es de suma importancia en agroecosistemas ganaderos. A nivel del suelo, también se produce CH_4 en la descomposición de materia orgánica en condiciones de inundación, por lo que es un proceso de suma importancia en la producción de arroz. Las emisiones de N_2O son promovidas en condiciones de bajo contenido de oxígeno y altos niveles de nitrógeno en el suelo, como sucede en sistemas agrícolas luego de una lluvia en cultivos fertilizados y en deposiciones de orina en sistemas ganaderos. Las pérdidas de estos GEI deben ser compensadas a través de un aumento del contenido de carbono en el suelo para lograr un balance neutro o positivo en términos globales del sistema de producción, que permita secuestrar carbono de manera efectiva en los agroecosistemas.

2.2. Mecanismos de retención de carbono en el suelo y capacidad de retención

Para un determinado clima, suelo y manejo, se asume que existe una condición de equilibrio en la concentración de materia orgánica del suelo a la que se llega luego de un tiempo prolongado durante el cual las entradas de carbono al suelo igualan a las salidas. El aumento del stock de carbono orgánico requiere de la implementación de prácticas de manejo que aumenten las entradas de carbono al suelo y/o reduzcan las pérdidas.

Las entradas de carbono al sistema están en gran medida determinadas por la productividad primaria neta del sistema, ya que esta determina el aporte de residuos al suelo.

Para lograr un aumento en el stock de carbono, el suelo debe tener además suficiente nitrógeno y la capacidad de retener carbono orgánico en forma adicional. Esta capacidad está determinada por mecanismos químicos y físicos, como la asociación con las partículas finas de limo y arcilla y la agregación, ya que existe un límite superior en el almacenamiento de C orgánico en el suelo en forma estable (Six *et al.*, 2002, Stewart *et al.*, 2007, 2008). El concepto de saturación de C propuesto por Hassink y Whitmore (1997) establece que existe un nivel de equilibrio máximo en el contenido de C que podría alcanzarse cuando se maximiza el aporte de C al suelo (Hassink y Whitmore, 1997; Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2007). El potencial de secuestro de C estaría limitado por la capacidad de estabilización de C en el suelo, ya que la fracción de la materia orgánica del suelo (MOS) que no es estabilizada se encuentra expuesta a sufrir descomposición microbiana.

La MOS puede ser estabilizada mediante diferentes mecanismos que la protegen de la descomposición microbiana. La formación de microagregados provee protección física a la materia orgánica asociada a partículas de arcilla y limo en su interior, mientras que la protección química puede ocurrir de acuerdo con la naturaleza de las moléculas que limiten el proceso de degradación de materia orgánica. La capacidad máxima del suelo de ofrecer protección física a la materia orgánica en el suelo es lo que se considera el contenido de “saturación de carbono” y puede ser calculada en forma teórica en función de la textura y de la relación existente entre contenido de carbono y el de las fracciones minerales (Hassink y Whitmore, 1997; Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2008). En algunos países como Francia, Alemania y Nueva Zelanda, se han utilizado estimaciones de la capacidad de estabilización de C en el suelo como una aproximación al potencial de secuestro de carbono (Angers *et al.*, 2011; Wiesmeier *et al.*, 2014; McNally *et al.*, 2017). Sin embargo, hay que considerar que puede existir una brecha entre el potencial teórico y el nivel de secuestro alcanzable o potencial realizable de acuerdo con el clima y manejo que determinan la productividad del sistema, y, por lo tanto, las entradas de carbono al suelo.

Estudios de la dinámica de C y N realizados en brunosoles y argisoles indicaron que la dinámica de saturación de C es un fenómeno observable en suelos del Uruguay (Pravia y Kemanian, 2017). El seguimiento

del C agregado en residuos marcados con ^{13}C en suelos bajo diferentes rotaciones de los experimentos de largo plazo en el INIA La Estanzuela y en el INIA Palo a Pique mostró que la tasa de retención de C es afectada por la saturación de C del suelo. Suelos con contenidos de C próximos al contenido teórico de saturación estabilizaron menos C en las fracciones finas (materia orgánica asociada a los minerales [MAOM, por sus siglas en inglés] $< 53 \mu\text{m}$) que suelos con menor contenido de C cuando se incorporaron cantidades de residuos equivalentes a un rastrojo de sorgo o maíz (Pravia y Kemanian, 2017). En otras palabras, la eficiencia de retención se reduce al acercarse al contenido de saturación; por lo tanto, para obtener una misma cantidad de carbono retenido es necesario realizar mayores aportes. Lo contrario ocurre cuando el suelo se encuentra lejos de su contenido máximo. En suelos degradados que han perdido carbono y se encuentran con contenidos de carbono sensiblemente menores al contenido de saturación, la eficiencia de retención de carbono en los residuos aportados es mayor, por lo que representan oportunidades para el secuestro de carbono.

2.3. Capacidad de retención y dinámica de nutrientes

Además de afectar la retención de C en el suelo, la dinámica de saturación de carbono tiene consecuencias en la descomposición de materia orgánica y la provisión de nitrógeno. A través del estudio de mecanismos biofísicos en modelos de simulación de agroecosistemas aplicados y contrastados con sistemas reales, se puede observar que sistemas que mantienen un suelo cerca de su capacidad de saturación de carbono tendrían mayores flujos de nitrógeno mediante los procesos de mineralización y de inmovilización, lo que les permitiría realizar un aporte de nitrógeno mejor sincronizado con las demandas de los cultivos y, a la vez, amortiguar las pérdidas al ambiente (Pravia *et al.*, 2019). Por lo tanto, mantener los sistemas de producción con altos contenidos de carbono en el suelo operando en el entorno del contenido de saturación podría considerarse una estrategia de intensificación ecológica que tiende a maximizar la eficiencia en el uso de nutrientes, promoviendo el reciclaje interno de nutrientes y minimizando las necesidades de fertilizantes externos.

3. Herramientas para el secuestro de carbono: uso del suelo, su manejo y conservación

En Uruguay, aproximadamente el 70% del área aún se encuentra como campo natural (DIEA, 2019), a pesar de que en las últimas décadas se ha constatado una reducción en el área de pastizales naturales asociada a un proceso de intensificación de los sistemas agrícolas y ganaderos, al igual que en otras partes de la región y del mundo. Estos procesos de intensificación del uso del suelo afectan la provisión de servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono. En términos de los componentes del balance de carbono del suelo, los ecosistemas de pasturas naturales y bosques nativos tienen en general un balance más favorable al secuestro de carbono, debido a mayores entradas de carbono por aporte de biomasa de raíces y menores pérdidas vinculadas a menores disturbios al suelo y menor erosión, comparados con los suelos cultivados. En términos generales, ecosistemas naturales que combinan una alta productividad con suelos de alto contenido de arcillas se espera que tengan mayores contenidos de materia orgánica que aquellos que presentan una baja productividad o texturas de suelo más gruesas. Por lo tanto, las medidas que tienden a aumentar la productividad de los ecosistemas naturales estarían favoreciendo el balance de carbono a través de un aumento de las entradas de carbono al sistema. Si bien estos cambios son lentos y, en consecuencia, las variaciones en el stock de carbono se deben medir en el largo plazo, las fracciones más gruesas del suelo, que representan las fracciones más lábiles de la materia orgánica, pueden tener una tendencia observable en el mediano plazo.

Cuando las pasturas, los bosques y las plantaciones forestales son sustituidos por cultivos, se observa una pérdida respecto de las condiciones iniciales, ya que los agregados del suelo se rompen y una fracción del carbono previamente protegido en esos agregados puede ser utilizada por los microorganismos. A través del uso del suelo como recurso productivo, la mayoría de los suelos agrícolas en el mundo han perdido 30-50% del carbono en los primeros horizontes (0-30 cm). Dependiendo del manejo agronómico que se realice y de la capacidad de retención de los suelos, las pasturas y los suelos agrícolas tienen el potencial de actuar como sumideros de carbono orgánico, recuperando por lo menos parte del carbono perdido.

3.1. Prácticas de manejo para conservar y aumentar el almacenaje de C en el suelo

Siembra directa

La siembra directa de pasturas y cultivos es una de las medidas de manejo de suelos que permite reducir las pérdidas de carbono por erosión y descomposición, ya que las pérdidas de carbono en los primeros centímetros de suelo se relacionan con la intensidad de las operaciones realizadas.

Al evaluar el contenido de carbono del suelo y de sus fracciones físicas bajo tres intensidades de laboreo mantenidas durante 11 años en una rotación de cultivos forrajeros anuales en suelos de la Unidad Alférez, se observó que el stock de carbono orgánico en los primeros 15 cm del suelo fue mayor en 20% cuando se utilizó siembra directa respecto del promedio en los tratamientos de laboreo (Tabla 1) (Terra *et al.*, 2009). Estas diferencias en el stock de carbono se observaron también al analizar las diferentes fracciones, siendo de 32% y 18% en promedio para la fracción más lábil (materia orgánica particulada [POM, por sus siglas en inglés]) y en la fracción fina (MAOM), respectivamente. Estas pérdidas se explican en parte por la suma de los procesos de erosión y descomposición.

TABLA 1. STOCK DE CARBONO EN DISTINTAS FRACCIONES DEL SUELO (0-15 CM) PARA TRES SISTEMAS DE LABOREO IMPLEMENTADOS DURANTE 11 AÑOS EN UNA ROTACIÓN FORRAJERA DE DOBLE CULTIVO ANUAL SOBRE SUELOS DE LA UNIDAD ALFÉREZ

Stock de carbono orgánico en el suelo [†]	Sistema de laboreo		
	Laboreo convencional	Laboreo reducido	Siembra directa
	————— Mg C ha ⁻¹ —————		
C Total (< 2.000 μm)	27,5 b	28,5 b	33,7 a
C-POM (2.000 - 200 μm)	3,1 ab	2,6 b	3,6 a
C-POM (200 - 53 μm)	2,1 b	1,9 b	2,8 a
C-MAOM (< 53 μm)	22,4 b	23,9 b	27,3 a

[†] Los valores seguidos de una misma letra dentro de la fila no difieren significativamente, con $p \leq 0,05$.

C-POM: carbono en la materia orgánica particulada; C-MAOM: carbono asociado a la fracción mineral.

Fuente: Terra et al. (2009).

Secuencias de cultivos y rotaciones

Cultivos de cobertura, abonos verdes y enmiendas orgánicas

La inclusión de cultivos de cobertura como especies de leguminosas, gramíneas anuales y nabos forrajeros en secuencias puramente agrícolas mejora las propiedades físicas y biológicas del suelo, reduce la erosión y la pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial y subsuperficial.

Experimentación nacional, localizada en el INIA La Estanzuela, muestra que la incorporación de un cultivo de cobertura (avena o raigrás) en una rotación de soja continua permite reducir la erosión del suelo de $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ a 2 o $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ cuando la cobertura es terminada 60 o 30 días antes de la siembra de soja, respectivamente (Pérez Bidegain y Sawchik, sin publicar). En el largo plazo, además, el uso de cultivos de cobertura genera un aumento significativo en la estabilidad de los agregados del suelo (Filippi *et al.*, 2019). Esto mejora la resistencia del suelo a la erosión y aumenta la infiltración del agua y, por lo tanto, los beneficios de la incorporación de coberturas. En ausencia de coberturas invernales, se observan con el paso del tiempo, síntomas de erosión severa y encausada. Este daño puede evitarse mediante el uso de coberturas.

Por otro lado, los cultivos de cobertura generan un aporte adicional de carbono al suelo. En un promedio de 13 años de evaluación, se observó que las coberturas generaron un aporte de $3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de biomasa aérea de residuos al suelo en quemas tempranas, y de $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en quemas tardías con herbicida, sin comprometer el rendimiento del cultivo de soja (Filippi *et al.*, 2019). Mayores diferencias son esperadas si se considera la producción de raíces de estas coberturas, ya que este componente es el que más contribuye a la formación de materia orgánica del suelo (Pinto, 2018).

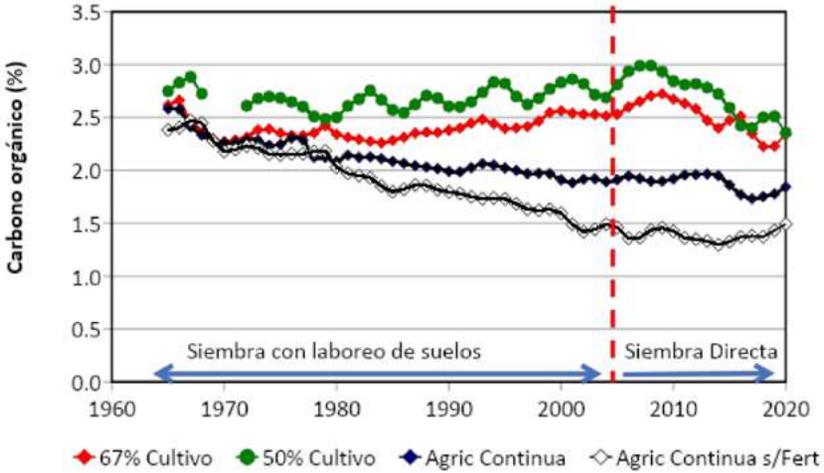
En suelos degradados por el uso hortícola intensivo, las rotaciones que incluyen abonos verdes con incorporaciones anuales de enmiendas animales y vegetales mayores a 7 Mg/ha de materia seca, combinadas con medidas de conservación de suelo, permiten aumentar el contenido de carbono orgánico (Arboleya *et al.*, 2010; Alliaume *et al.*, 2013). Así, prácticas agroecológicas como la utilización de cultivos de cobertura mejoran el balance de carbono reduciendo sus pérdidas y aumentando sus ingresos al suelo.

Siembra de pasturas perennes e importancia de las capas profundas del suelo

Las especies perennes producen mayor biomasa de raíces que las especies anuales, aportando más carbono y nitrógeno al suelo. Por otra parte, al sembrar especies perennes en rotación con cultivos se disminuye la frecuencia de las operaciones de laboreo, reduciendo las pérdidas por erosión, resultando en un balance más favorable al secuestro de carbono que las secuencias de cultivos anuales continuos.

La evolución del contenido de carbono orgánico en rotaciones integradas cultivo-pasturas ha sido estudiada en diferentes experimentos de larga duración en el INIA y en la Facultad de Agronomía (UDELAR). Luego de 28 años de evaluación en rotaciones realizadas con laboreo convencional en el INIA La Estanzuela, la integración de pasturas en rotación con cultivos anuales mostró un aumento promedio de 0,5% de la materia orgánica en el estrato superficial del suelo al culminar el cuarto año de la fase de pasturas (Díaz-Roselló, 1992b). Estas ganancias de carbono en la fase de pasturas permitieron compensar en buena medida las pérdidas de la fase agrícola, mientras que los sistemas de agricultura continua con laboreo perdieron ocho veces más carbono que aquellos en donde la agricultura se integró con pasturas perennes (Figura 2). Si bien estas diferencias se atenuaron en los años subsiguientes del experimento, en la última década las rotaciones integradas cultivo-pastura mostraron un aumento del contenido de carbono del 11%, mientras que las secuencias de cultivos continuos perdieron el 22% en los primeros 15 cm de suelo (Grahmann *et al.*, 2020).

FIGURA 2. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN LOS PRIMEROS 15 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO PARA DIFERENTES ROTACIONES DE CULTIVOS Y PASTURAS EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE “ROTACIONES VIEJAS” EN EL INIA LA ESTANZUELA, ING. LAVALLEJA-CASTRO.



Nota: La leyenda indica la proporción del tiempo dedicado a cultivos anuales en cada rotación. La línea punteada indica el momento en que se incorporó la siembra directa, dejando atrás las prácticas de laboreo de suelos. Los datos se encuentran expresados según análisis por combustión seca.

Fuente: Elaboración propia.

Otro de los resultados interesantes que se puede observar en el experimento de rotaciones de largo plazo del INIA La Estanzuela es que el mayor contenido de carbono de las rotaciones que incluyen pasturas perennes también se presenta en las capas profundas del suelo. Por lo tanto, al incluir pasturas perennes, el secuestro de carbono puede darse de manera más eficiente, ya que en las capas profundas del suelo la capacidad de retención es por lo general mayor, mientras que la exposición a sufrir pérdidas es menor (Figura 3).

FIGURA 3. VISTA DE LOS PERFILES DE SUELOS EXHIBIDOS EN EL INIA LA ESTANZUELA, TOMADOS DEL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE ROTACIONES EN SUS 50 AÑOS



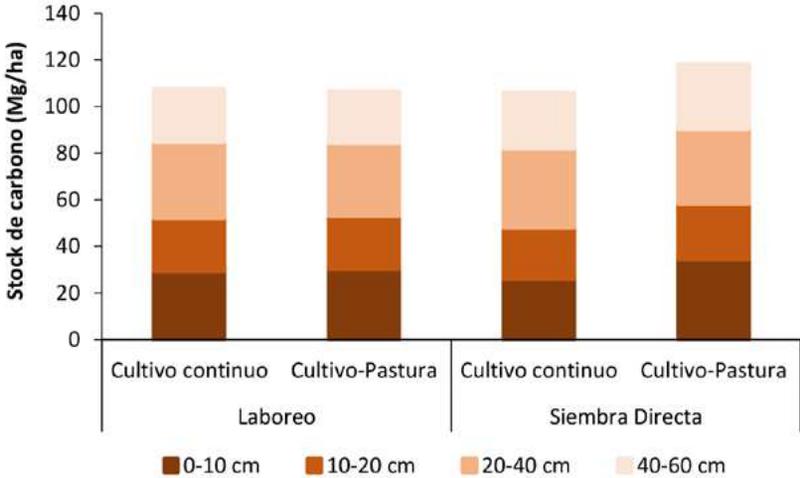
De izquierda a derecha: Sistema 1: agricultura continua sin fertilizante, Sistema 2: agricultura continua con fertilizante, y Sistema 5: rotación de 3 años de cultivos y 3 años de pasturas en el INIA La Estanzuela.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando la aplicación de estas prácticas que tienden a aumentar y conservar el contenido de carbono de los suelos se realiza en forma combinada, se observan mayores niveles de carbono en el suelo en el largo plazo que cuando se aplica cada tecnología en forma individual. Este es el caso de las evaluaciones realizadas en el INIA La Estanzuela, donde se comparan en forma individual y combinada la siembra directa junto con la integración de pasturas en las rotaciones, en el experimento descrito por Rubio *et al.* (2014). Luego de 22 años, la combinación de una rotación integrada de cultivos y pasturas en siembra directa fue la única que se diferenció con un mayor stock de carbono sobre los manejos alternativos de agricultura continua con o sin laboreo, y rotación de cultivos

y pasturas con laboreo (Barro *et al.*, sin publicar). Las diferencias en el stock de C acumulado en el suelo fueron significativas hasta los 60 cm de profundidad, donde la rotación integrada de cultivos y pasturas bajo siembra directa presentó un stock de C orgánico en el suelo 10,7% mayor (Figura 4).

FIGURA 4. STOCK DE CARBONO EN EL SUELO POR ESTRATO DE PROFUNDIDAD HASTA LOS 60 CM DE PROFUNDIDAD LUEGO DE 22 AÑOS DE MANEJOS ALTERNATIVOS DE SUELO Y ROTACIÓN SOBRE UN ÁRGIUDOL TÍPICO VÉRTICO EN EL INIA LA ESTANZUELA EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE ROTACIONES Y LABOREO (“CHACRA 43”), INICIADO EN 1996



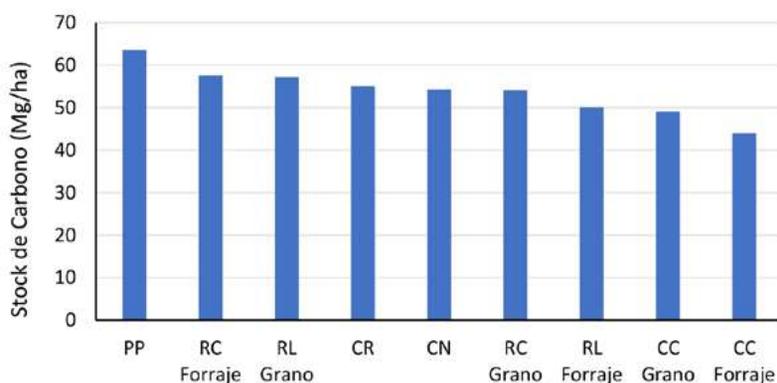
Nota: Los manejos alternativos corresponden a una rotación de cultivos continuos bajo laboreo, rotación de cultivos y pasturas bajo laboreo, y las mismas alternativas de rotaciones de cultivos continuos y de rotaciones de cultivos y pasturas evaluadas bajo un esquema de siembra directa.

Fuente: Barro et al. (sin publicar).

La inclusión de pasturas perennes en sistemas de siembra directa puede aumentar los contenidos de carbono. Los niveles observados de recuperación en el stock de carbono pueden superar incluso los del campo regenerado cuando se realiza como una pastura permanente (Figura 5). Luego de 20 años de implementar diferentes rotaciones en siembra

directa sobre argisoles y planosoles de la Unidad Alférez en la Unidad Experimental de Palo a Pique, se observaron valores de stock de carbono en los primeros 30 cm de una pastura permanente que superaron en 17% los del campo natural regenerado en su condición de manejo inicial al experimento. Al mismo tiempo, la agricultura continua forrajera, que implica una alta extracción de la biomasa producida, mostró una reducción en el contenido de carbono, con un stock a 30 cm inferior en 19% al de su par de campo natural.

FIGURA 5. STOCK DE CARBONO EN EL SUELO HASTA 30 CM DE PROFUNDIDAD LUEGO DE 20 AÑOS DE MANEJOS ALTERNATIVOS DE SUELO Y ROTACIÓN SOBRE UN ARGIUDOL OXIÁQUICO VÉRTICO EN EL INIA TREINTA Y TRES EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL PALO A PIQUE, EN EL PERIODO 1996-2016



Referencias: PP: pastura permanente; RC forraje: rotación corta de dos años de pasturas y dos de verdeos anuales para producción de forraje; RL grano: rotación larga de cuatro años de pasturas u dos de verdeos anuales para la producción de forraje; CR: campo regenerado; CN: campo natural; RC grano: rotación corta de dos años de pasturas y dos de cultivos anuales para producción de grano; CC grano: rotación de cultivos para la producción de grano; CC forraje: rotación de verdeos y cultivos para la producción de forraje.

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas pastoriles de producción lechera de Uruguay se pueden tomar como un claro ejemplo en cuanto a la aplicación de sistemas de agricultura forrajera intensiva y sus efectos en el suelo. Los cambios fuer-

tes en el manejo de suelos a lo largo de un marcado proceso de intensificación en las últimas décadas han sido estudiados en sistemas lecheros implementados en el INIA La Estanzuela entre 1974 y 2010, donde los sistemas de producción siguieron la misma tendencia que los establecimientos comerciales (Díaz y Durán, 2011). A lo largo de estas casi cuatro décadas, se presentaron dos períodos contrastantes en la dinámica del C en el suelo, debido a modificaciones extremas en el laboreo, la carga animal y la importación de forrajes. Los primeros 17 años, presentaron fuertes pérdidas de C orgánico con tasas anuales promedio estimadas de $0,89 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Esta tendencia se revirtió en los siguientes 18 años con ganancias de C orgánico de $0,94 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Tres factores principales de manejo determinaron un balance positivo de carbono, resultando en el rápido incremento en el C orgánico del suelo: la progresiva reducción de laboreos, mejoras de la productividad de las pasturas y los cultivos, y la importación de alimentos al sistema. Si bien la agricultura forrajera intensiva puede ser muy exigente para el recurso suelo, tomando medidas de manejo tendientes a reducir las pérdidas y aumentar las entradas de carbono al sistema fue posible revertir el proceso de degradación y secuestrar carbono de manera efectiva.

Cuando se intensifican las rotaciones reduciendo la participación de las pasturas perennes, a través de los años se espera observar un gradiente en el contenido de carbono total de acuerdo con el nivel de intensificación. En los sistemas que rotan arroz con otros cultivos (soja y sorgo), respecto de la rotación de arroz pasturas, el contenido de carbono y nitrógeno en la POM mostró una reducción aproximada del 16% en los primeros 15 cm de profundidad del suelo. Sin embargo, no se observaron cambios en los contenidos totales de C y N del suelo luego de cinco años de implementados estos manejos alternativos de intensificación de una rotación arroz pasturas (2 años arroz-3 años pastura), reduciendo la participación de la pastura perenne por sustitución con pasturas más cortas y/o los cultivos de soja y sorgo (Macedo *et al.*, 2021).

Manejo de pasturas

El carbono orgánico del suelo tiende a aumentar en sistemas pastoriles donde se adoptan prácticas de manejo que aumentan la productividad de las pasturas implantadas y los pastizales naturales. El sobrepastoreo se presenta como una causa de degradación importante del suelo, mientras que con pasturas bien manejadas los suelos pueden tener un contenido

de carbono similar al original. En términos generales, la implementación de prácticas como el ajuste de la dotación animal, el manejo de pastoreo, la recuperación de pasturas degradadas, la inclusión de leguminosas y la fertilización ha mostrado resultados positivos en distintas partes del mundo (Conant *et al.*, 2017).

Por un lado, el pastoreo podría limitar la acumulación de carbono en el suelo en el largo plazo, a través de su efecto en las diferentes vías de pérdida del ciclo del nitrógeno. Estos cambios podrían resultar de diferente magnitud e incluso dirección contraria de acuerdo con la escala temporal considerada (Piñeiro *et al.*, 2006). En el otro extremo, la exclusión del pastoreo reduce los aportes de biomasa subterránea producida como raíces y otros órganos subterráneos, que constituyen entradas de carbono al suelo. Sin embargo, su efecto en el stock de carbono en el suelo puede ser variable en función de propiedades del suelo como profundidad, elevación, textura, pH y composición de la comunidad vegetal, que definen las entradas de nitrógeno (Piñeiro *et al.*, 2009).

A escala nacional, estudios a nivel predial han mostrado un aumento del contenido de carbono en la POM luego de apenas dos años de cambios en el manejo. Estos cambios fueron observados en dos de los siete sistemas de producción familiar basados en campo natural donde se pasó a trabajar con una mayor disponibilidad de forraje (Aguerre y Albicette, 2018). Los resultados son más claros cuando se parte de una situación de campo degradado, donde los suelos han perdido carbono. Al recuperarse la producción de forraje de los campos a través de la gestión de variables de manejo del pastoreo y de la dotación animal, los mayores aportes de carbono al suelo permiten aumentar así su contenido de carbono, más que cuando se parte de una condición menos perturbada.

Sin embargo, cuando los suelos han sido bien conservados y están más cerca de su capacidad máxima de retención hay que considerar que es más difícil lograr un aumento del contenido de carbono. Por ejemplo, la introducción de leguminosas y fertilización fosfatada no mostró un aumento en el carbono total del suelo en los primeros 15 cm de profundidad luego de 9 años de la instalación de un mejoramiento de campo de trébol blanco y *lotus corniculatus* en argisoles y planosoles de la Unidad Alférez (Salvo *et al.*, 2008). Si bien se registraron cambios en la distribución del carbono en las diferentes fracciones físicas del suelo, el aumento del contenido de carbono que había sido constatado en los primeros 5 cm fue luego compensado por pérdidas en el siguiente estrato (5-15cm).

TABLA 2. CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO A 0-15 CM DE PROFUNDIDAD Y EN SUS FRACCIONES FÍSICAS (POM > 53 μm Y MAOM < 53 μm), EN CAMPO NATURAL Y EN MEJORAMIENTOS DE CAMPO LUEGO DE 9 AÑOS DE INTRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS Y DOS NIVELES DE FERTILIZACIÓN FOSFATADA (30 Y 60 KG DE P₂O₅)

Profundidad del suelo (cm)	Fracción	TRATAMIENTO		
		Campo natural	Mejoramiento 30	Mejoramiento 60
		(g.kg ⁻¹ suelo)		
0-5	C-POM	11,51 b	16,59 a	15,68 a
	C-MAOM	21,16	19,43	19,05
	C-Total	32,67 b	36,02 a	34,73 a
5-15	C-POM	2,11 b	3,08 a	2,85 a
	C-MAOM	13,69	10,88	11,26
	C-Total	15,80 a	13,96 b	14,11 b
Total 0-15	C-POM	13,62	19,67	18,53
	C-MAOM	34,85	30,31	30,31
	C-Total	48,47	49,98	48,84

[†] Los valores seguidos de una misma letra dentro de la fila no difieren significativamente con $p \leq 0,05$.

C-POM: carbono en la materia orgánica particulada; C-MAOM: carbono asociado a la fracción mineral.

Fuente: adaptada de Salvo et al. (2008).

Resultados similares de estratificación del contenido de carbono se han observado al evaluar mejoramientos de campo en predios particulares, donde en algunos casos el resultado global ha mostrado secuestro de carbono, mientras que en otros casos no, e incluso se han observado casos de pérdidas de carbono (Bondaruk *et al.*, 2020), ya que esta práctica también interacciona con otros factores ya mencionados, como el manejo del pastoreo. Estas relaciones son complejas, y son muchos los factores y las prácticas de manejo que inciden en forma combinada, afectando al stock de carbono del suelo. Por lo tanto, se continúa trabajando para conocer en mayor profundidad cuáles son los factores que podrían estar generando esas diferencias en los resultados, considerando que, en Uruguay, debido al área que ocupan los sistemas pastoriles, una mejora en el stock de carbono debido a la implementación de buenas prácticas

de manejo podría impactar de manera muy significativa en el balance nacional de emisiones de GEI.

4. Herramientas de modelación para estimar cambios en el carbono del suelo

La dinámica de carbono y nitrógeno en el suelo ha sido estudiada en Uruguay utilizando modelos de simulación de diferente nivel de complejidad y estructura. Estas herramientas resumen esquemáticamente el funcionamiento de los sistemas por medio de ecuaciones que representan de manera cuantitativa el estado del arte del conocimiento científico, mejorando la comprensión de procesos que se dan en los suelos y en el crecimiento y desarrollo de cultivos y pasturas. Los modelos basados en procesos se complementan con modelos empíricos que se parametrizan sobre la base de observaciones experimentales. Una vez calibrados y validados, los modelos pueden ser utilizados con diferentes objetivos específicos, para anticipar resultados en el mediano y largo plazo, que de otra manera llevarían años de investigación.

Los modelos Century, AMG y Cycles son modelos basados en procesos que han sido calibrados y validados a partir de experimentos de largo plazo del INIA y de la Facultad de Agronomía, permitiendo estudiar en mayor detalle los mecanismos detrás del balance de carbono en suelos del Uruguay (Baethgen, 2003; Baethgen *et al.*, 2021; Rubio *et al.*, 2014; Pravia *et al.*, 2019). Estos modelos operan a diversas escalas temporales y presentan diferentes niveles de complejidad, permitiendo obtener resultados de acuerdo con distintos intereses específicos.

4.1. Modelación del balance de carbono en el largo plazo

El modelo Century (Parton *et al.*, 1987) ha sido calibrado y validado en Uruguay fundamentalmente sobre la base de los resultados del experimento de rotaciones de largo plazo del INIA La Estanzuela, en distintas etapas y en trabajos con diferentes objetivos, resumidos por Baethgen (2003). Este es uno de los modelos de simulación de C orgánico del suelo más ampliamente usados a nivel mundial, su comportamiento ha sido probado en distintos tipos de suelos y climas. Se trata de un modelo mecanístico que fue desarrollado para simular la dinámica en el largo plazo de carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en diferentes sistemas suelo-planta (cultivos,

pasturas, bosques y sabanas). Los estudios realizados en nuestro país se centraron en la capacidad del modelo de simular en el largo plazo las variables más importantes de la dinámica del carbono y nitrógeno total, y los cambios en las fracciones de suelo que ciclan de forma lenta y activa.

La dinámica de carbono fue simulada exitosamente con el modelo Century en cuatro sistemas de producción a lo largo de los más de 50 años del experimento de largo plazo del INIA La Estanzuela (Baethgen *et al.*, 2021). Además de la evolución del carbono total, este modelo de paso mensual mostró buenas estimaciones para varios parámetros observados: masa microbiana, mineralización de carbono y nitrógeno, productividad de pasturas y cultivos. Los resultados de estos trabajos demostraron que el modelo simuló adecuadamente la dinámica del carbono, incluyendo los impactos de la inclusión de pasturas en las rotaciones, así como los efectos de diferentes sistemas de labranza.

El AMG es un modelo simple, de paso anual, que requiere una mínima cantidad de información para su funcionamiento. Su estructura considera tres compartimientos de COS: restos de cultivos, materia orgánica humificada estable y lábil. Los resultados de su calibración para diferentes situaciones edafo-climáticas han sido exitosos, y considerando el escaso número de parámetros necesarios para su calibración, se posiciona como un modelo interesante para ser considerado en la simulación del C orgánico del suelo en el largo plazo (Milesi *et al.*, 2013; Saffi-Hdadi y Mary, 2008). El modelo AMG ha sido calibrado y validado en Uruguay, utilizando información de tres experimentos de largo plazo, ubicados en Colonia y Paysandú. El modelo mostró simular adecuadamente la evolución del COS, siendo la raíz cuadrada media del error promedio de las estimaciones de 0 a 15 cm de $2,43 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Rubio *et al.*, 2014). El modelo AMG constituye por tanto una herramienta prometedora para la modelación de las tendencias a largo plazo del contenido de COS, bajo diferentes manejos, en las condiciones de Uruguay, que podría ser fácilmente utilizada por productores y asesores para el diseño de sistemas de producción que apunten a la conservación del C del suelo.

4.2. Modelación del balance de carbono en el mediano y corto plazo

El modelo Cycles es un modelo basado en procesos, que simula múltiples cultivos y capas de suelo a lo largo de los años, que funciona a paso diario y con paso subdiario para el componente hidrológico. Esto significa que

simula todos los componentes y flujos del sistema para cada día o en intervalos de tiempo incluso menores para algunas variables relevantes como la infiltración de agua en el suelo. Puede simular rotaciones de monocultivos, cultivos de cobertura y forrajeros, asociaciones de cultivos y pasturas multiespecíficas. Varios de sus módulos han sido incorporados de CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) y C-Farm (Kemanian y Stöckle, 2010), integrando el concepto de saturación de C (Hassink y Whitmore, 1997). Este modelo permite simular todos los componentes del ciclo de N, incluyendo los flujos de gases como el óxido nitroso, por lo que su aplicación en estudios de balance de C hace posible el estudio de emisiones de GEI.

El modelo Cycles obtuvo buenos resultados de validación al simular la evolución de C orgánico del suelo en tres sistemas de rotaciones de largo plazo de la Unidad Experimental del INIA Palo a Pique (Pravia *et al.*, 2019). Para un periodo de 20 años, el modelo obtuvo un error en las estimaciones en los primeros 15 cm de suelo de 4.7 Mg C ha⁻¹, similar al error observado en la información de campo, de acuerdo con el modelo estadístico. Este trabajo incluyó la calibración de parámetros para el crecimiento de 13 especies entre forrajeras y cultivos, por lo que la información de base generada en este trabajo permite proyectar el balance de carbono de diversos sistemas productivos en el país.

4.3. Implementación de modelos de simulación como herramientas de soporte a la toma de decisiones

Estos modelos mecanísticos se complementan con la aplicación de modelos empíricos que pueden ser de suma utilidad para la planificación y toma de decisiones. A partir de la utilización de estos, Uruguay es un ejemplo en la región y en el mundo en cuanto a la implementación de prácticas de prevención y control de la erosión.

La calibración local de la ecuación universal de pérdida de suelo USLE/RUSLE (Wischmeier y Smith, 1978) permite estimar las pérdidas de suelo por erosión en suelos del Uruguay. El ajuste de parámetros realizado por diversos autores nacionales se basa en información generada en las parcelas de escurrimiento ubicadas en Aguas Blancas, en el INIA La Estanzuela y en el INIA Palo a Pique (Figura 6); sumando diversos esfuerzos nacionales a lo largo de varias décadas resumidos y documentados en el manual de la aplicación EROSION 6.0 (García Préchac *et al.*, 2016) y sus actualizaciones disponibles a través del sitio web del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).

FIGURA 6. VISTA DE LA EROSIÓN HÍDRICA OCURRIDA EN PARCELAS EXPERIMENTALES DEL INIA LA ESTANZUELA



Foto: INIA por Filippi (2019).

La comparación objetiva de alternativas de uso y manejo de suelos y su efecto estimado en términos de pérdidas de suelo por erosión resumidas en la aplicación EROSION 6.0 ayuda a tomar decisiones prácticas para diferentes opciones de conservación a nivel productivo. Esta aplicación permite el diseño de planes de uso y manejo de suelo responsable a nivel nacional, contribuyendo así a la conservación del recurso suelo. Por lo tanto, esta herramienta es útil a la aplicación de políticas públicas de conservación de recursos naturales implementadas desde el MGAP.

Hemos visto que la rotación de cultivos, los sistemas que integran pasturas y la siembra directa reducen el impacto de las pérdidas de carbono por erosión con relación a la utilización de cultivos continuos o el laboreo convencional. Esto ha sido demostrado en Experimentos de Largo Plazo (ELP) establecidos en el país en 1963, 1993 y 1995, en el INIA y en la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Fagro-UEDELAR) (Díaz-Rossello, 1992b; Terra y García Préchac, 2001, García Préchac *et al.*, 2004). Esfuerzos interinstitucionales sobre ELP han promovido el desarrollo de herramientas como las actualmente utilizadas para establecer los planes de uso y manejo responsable de suelos bajo agricultura, y podrían complementarse con los avances progresivos sobre modelos mecanísticos.

Contar con una más amplia aplicación y validación de estos modelos ajustados a nivel nacional permitiría proyectar escenarios a escala predial de acuerdo con las decisiones de manejo y uso de suelo de manera integral, contribuyendo a la toma de decisiones informadas por parte de los productores. A escala nacional, favorecerá que el país se enfoque en políticas públicas más acertadas para la conservación del recurso suelo y se acerque hacia un nivel más refinado en el reporte internacional del secuestro de carbono en el suelo para los inventarios nacionales.

5. Consideraciones finales

El secuestro de carbono se puede promover a través de la aplicación de diferentes prácticas aquí presentadas. Estas tecnologías permiten no solamente realizar una contribución al ambiente por la remoción de dióxido de carbono de la atmósfera, sino que, a su vez, tienden a restaurar la salud del suelo cuando se han sufrido condiciones de degradación y a mantener dicha salud en áreas naturales o seminaturales. Un suelo con mayor contenido de carbono representa un mayor reservorio de agua y una fuente de nutrientes, lo que brinda mayores niveles de producción con una menor aplicación de productos sintéticos. Mantener los sistemas de producción operando en el entorno del contenido de saturación de carbono del suelo constituye una estrategia clave para las trayectorias agroecológicas, promoviendo el reciclaje interno de nutrientes y minimizando las necesidades de fertilizantes externos. Maximizando así las sinergias en los procesos biológicos que operan en el sistema, la utilización de prácticas de manejo que tienden a secuestrar carbono contribuye a preservar la salud del suelo y realizar un uso más eficiente de los recursos naturales.

Referencias

Aguerre, V. y Albicette, M. M. (ed.)

(2018), *Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas ganaderos familiares de Rocha - Uruguay*, Serie Técnica 243, INIA, Montevideo.

Alliaume, F., Rossing, W., García de Souza, M., Giller, K. E. y Dogliotti, S. (2013), "Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms", en *European Journal of Agronomy*, 46, pp. 0-19.

Angers, D. A., Arrouays, D., Saby, N. P. A. y Walter, C.

(2011), “Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils”, en *Soil Use and Management*, 27(4), pp. 448-452.

Arboleya, J., Gilsanz, J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M. y Guerra, S.

(2010), “Manejo sustentable en la producción hortícola intensiva”, en Docampo, R. (ed.), *Manejo de suelos para producción hortícola sustentable*, Serie Actividades de Difusión 624, INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), pp. 9-19.

Baethgen, W.

(2003), “Utilización del modelo Century para estudiar la dinámica de carbono y nitrógeno”, en Moron, A. y Díaz, R. (eds.). *Simposio 40 años de rotaciones agrícolas - ganaderas, 2003*, Serie Técnica 134, INIA, Montevideo, pp. 9-18.

Baethgen, W. E., Parton, W. J., Rubio, V., Kelly, R. H. y Lutz, S.

(2021), “Ecosystem dynamics of crop pasture rotations in a fifty year field experiment in Southern South America: Century model and field results”, en *Soil Science Society of America Journal*. DOI: 10.1002/saj2.20204

Bondaruk, V., Lezama, F., del Pino, A., Piñeiro, G.

(2020), “Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms”, en *Science of the Total Environment*, 743 (2020) 140771. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140771>>.

Conant, R. T., Cerri, C. E., Osborne, B. B. y Paustian, K.

(2017), “Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis”, en *Ecological Applications*, 27(2), pp. 662-668.

Díaz, R. y Durán, H.

(2011), “Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola-lecheros mixtos en Uruguay”, en *Agrociencia Uruguay*, v. 15, 2, pp.109-119.

Díaz, R., Quincke, A., Morón, A., Sawchik, J., Ibáñez, V. y Balzarini, M.

(2009), “Efecto de la degradación del carbono orgánico del suelo en la productividad potencial de los cultivos”, en Morón, A. (coord.), *Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas: resúmenes expandidos*, Serie Actividades de Difusión 587, INIA, Montevideo.

Díaz-Roselló, R.

(1992a), “Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas”, *Rev. INIA Inv. Agr.*, 1, tomo I, pp. 27-35.

Díaz-Roselló, R.

(1992b), “Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos y pasturas”, en *Rev. INIA Inv. Agr.*, Nº 1, tomo I, pp. 103-110.

DIEA

(2019), *Anuario Estadístico Agropecuario 2019*. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

Ernst, O. R., Dogliotti, S., Cadenazzi, M. y Kemanian, A. R.

(2018), “Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield”, en *Field Crops Research*, 217, pp. 180-187.

Filippi, D., Sawchik, J., Tiecher, T. y Rubio, V.

(2019), “Efecto de los cultivos de cobertura de invierno y su época de quema sobre estabilidad de agregados, stock de carbono y productividad de la soja. Resumen: 661”, en Congreso Latinoamericano de Ciencias de Suelo, 22.; 2º Congreso Uruguayo de Suelos, 2; Encuentro de la SUCS, 10. Diversidad Productiva: pilar del manejo sostenible de los suelos, SUCS-CLACS-SLSC, Montevideo.

García, A. y Quincke, A.

(2011), “El análisis de potencial de mineralización de nitrógeno: su significado y desarrollo de su aplicación agronómica”, en *INIA La Estanzuela. Jornada de Divulgación: aportes a la zafra de cultivos de invierno*. Serie Actividades de Difusión N° 646, INIA, Durazno (Uruguay), pp. 43-46.

García-Préchac, F., Clérici, C., Hill, M. y Hill, E.

(2016), *EROSION versión 6.0.20: Programa de computación para usar USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata*. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/programa-erosion-6o-usle-rusle>>.

García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G. y Terra, J. A.

(2004), “Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay: review”, en *Soil & Tillage Research*, v. 77, pp. 1-13. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.002>>.

Grahmann, K., Rubio, V., Terra, J. A. y Quincke, A.

(2020), “Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency”, en *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1 enero de 2020, v. 287, artículo N° 106710. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106710>.

Hassink, J. y Whitmore, A. P.

(1997), “A Model of the Physical Protection of Organic Matter in Soils”, en *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, pp. 131-139.

INGEI

(2017, 2019), *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Uruguay, 2019*, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (MVOTMA, SNRCC), Montevideo.

Kemanian, A. R. y Stöckle, C. O.

(2010), “C-Farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles”, en *Eur. J. Agron.*, 32, pp. 22-29.

Lal, R.

(2008), “Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions”, en *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2), pp. 113-127.

Macedo, I., Pravia, M. V., Castillo, J. y Terra, J. A.

(2021), “Soil organic matter in physical fractions after intensification of irrigated

- rice-pasture rotation systems”, en *Soil and Tillage Research*, 213, p. 105160.
- McNally, S. R., Beare, M. H., Curtin, D., Meenken, E. D., Kelliher, F. M., Calvelo Pereira, R., Shen, Q. y Baldock, J.**
(2017), “Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand”, en *Global Change Biology*, 23(11), pp. 4544-4555.
- Milesi, L. A., Irizar, A. B., Andriulo, A. E. y Mary, B.**
(2013), “Effect of continuous agriculture of grassland soils of the argentine rolling pampa on soil organic carbon and nitrogen. Applied and Environ”, *SoilSci.*, Volumen 2013, p. 17.
- Morón, A.**
(2003), “Efecto de las rotaciones Cultivos-Pasturas sobre la fertilidad de los suelos en ensayos de larga duración del INIA La Estanzuela (1963-2003)”, en *Informaciones Agronómicas*, 20, diciembre de 2003.
- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V. y Dojima, D. S.**
(1987), “Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands”, en *Soil Scie. Soc. Am. J.*, 51, pp. 1173-1179.
- Pinto, P.**
(2018), *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo*. Tesis de doctorado de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Agropecuarias otorgado por la Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. Disponible en: <<http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2018pintopriscila.pdf>>.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Jackson, R. y Oesterheld, M.**
(2009), “Grazing effects on belowground C and N stocks along a network of cattle enclosures in temperate and subtropical grasslands of South America”, en *Global Biogeochemical Cycles* 23, doi:10.1029/2007GB003168.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M. y Oesterheld, M.**
(2006), “Potential long-term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South America”, en *Global Change Biology*, 12, pp. 1267-1284.
- Pravia, M. V. y Kemanian, A. R.**
(2017), *Soil Carbon and Nitrogen Saturation in Crop-Pasture Agricultural Systems* (PhD Dissertation), Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.
- Pravia, M. V., Kemanian, A. R., Terra, J. A., Shi, Y., Macedo, I. y Goslee, S.**
(2019), “Soil carbon saturation, productivity, and carbon and nitrogen cycling in crop-pasture rotations”, en *Agricultural Systems*, 171, pp. 13-22. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.001>>.

Rubio, V.

(2018), *Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del parapló como medida correctiva*. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.

Rubio, V., Díaz, R. y Quincke, A.

(2018), "Crop production systems and soil organic carbon: what are the effects on crop production?", en Conference, 21-23 May 2018, Rothamsted (Reino Unido), *The future of long-term experiments in agricultural science*. Conference Programme, p. 47.

Rubio, V., Pérez-Bidegain, M., Beretta, A., Barolin, E. y Quincke, A.

(2019), "Impacto de propiedades físico-químicas en la estabilidad estructural de molisoles", en *Ciencia del suelo*, 37, pp. 367-371.

Rubio, V., Sawchik, J., Ernst, O., Quincke, A. y Siri, G.

(2014), "Calibración/validación del modelo AMG para simular la evolución del stock de carbono orgánico en suelos del Uruguay" [Documento en línea], Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo y Rama Uruguaya de la Organización Internacional de Investigación en Laboreo del Suelo (ISRRO). En: 1 Congreso Uruguayo de Suelos 2014-VI. Encuentro de la sucs, "Intensificando el conocimiento del suelo y medio ambiente para producir más y mejor", Colonia del Sacramento (Uruguay), ISBN 978-9974-99-587-1.

Saffih-Hdadi, K. y Mary, B.

(2008), "Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon", en *Soil Biology and Biochemistry*, v. 40(3), pp. 594-607.

Salvo, L., Terra, J., Ayala, W., Bermúdez, R., Correa, J., Avila, P. y Hernández, J.

(2008), Impacts of long-term phosphorous fertilization and addition of perennial legumes on a temperate natural grassland: II. Total and particulate soil organic carbon. *Multifunctional Grasslands in a Changing World*. Volume II. Editado por Organizing Committee of 2008 IGC/IRC Conference, p. 382 (ISBN 978-7-218-058554-2).

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., y Paustian, K.

(2002), "Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils", en *Plant Soil*, N° 241, pp. 155-176.

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., y Six, J.

(2007), *Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation*. *Biogeochemistry*, 86(1), 19-31. doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. y Six, J.

(2008), "Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations", en *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), pp. 1741-1750. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.02.014.

Stöckle, C. O., Donatelli, M. y Nelson, R.

(2003), "CropSyst, a cropping systems simulation model", en *Eur. J. Agron.*, 18, pp. 289-307.

Terra, J. A. y García-Préchac, F.

(2001), “Efecto de la intensidad de uso y laboreo sobre el recurso suelo y su calidad”, en Terra, J. A. y García-Préchac, F. (eds.), *Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomas del Este: síntesis 1995-2000*, Serie Técnica 125, INIA, Montevideo, pp. 8-33.

Terra, J. A., Pravia, V., Salvo, L., Carbone, A. M. y García-Préchac, F.

(2009), “Desde la viabilización de la siembra directa en suelos marginales hasta la oportunidad del manejo sitio específico de los mismos”, en [Actas], Hoffman, E., Ribeiro, A., Ernst, O. y García, F. O. (eds.), *Simposio Nacional de Agricultura de Secano*, 1, Facultad de Agronomía, UDELAR, IPNI Cono Sur, Paysandú, pp. 91-110.

Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M. y Kögel Knabner, I.

(2014), “Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation”, en *Global change biology*, 20(2), pp. 653-665.

Wischmeier, W. H. y Smith, D. D.

(1978), *Predicting erosion losses, a guide to conservation planning*, USDA (Agriculture Handbook, 537), Washington.