

Artículo de divulgación

PastorC: un modelo simplificado del balance de carbono en sistemas pastoriles

Galli, J.^{1,3}; Piazza, A.²; Montico, S.^{1,3}; Zurbriggen, G.^{1,4}.

¹FCA-UNR; ²FAA-UNICEN; ³IICAR, CONICET-UNR; ⁴EEA Marcos Juárez, INTA.

jgalli@lidernet.com.ar

Introducción

En los últimos años ha crecido la preocupación por el impacto ambiental de los sistemas ganaderos a nivel predial, regional y global. En consecuencia, surge la necesidad de cuantificar el efecto de ese impacto para mejorar la toma de decisiones de manejo en esos sistemas. Especialmente en aquellos basados en el pastoreo directo, tanto de las pasturas implantadas (anuales y pluriánuales) como de las naturales (pastizales).

Es bien conocido que el contenido y las características de la materia orgánica edáfica de los sistemas de producción afectan la estructura, calidad y fertilidad de los suelos. La materia orgánica tiene un rol decisivo en la productividad de los cultivos, pero también es una importante reserva de carbono (C), cuya dinámica impacta significativamente el ciclo global de este elemento (Clivot *et al.* 2019). El C orgánico del suelo (COS) puede ser un reservorio ("sumidero") o una fuente de C atmosférico. En consecuencia, el uso y manejo del suelo a nivel predial, de sistema de producción, es relevante para la mitigación del cambio climático, ya sea favoreciendo el almacenamiento (aumento del stock de C) o disminuyendo las pérdidas y emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Para ello, es sustancial disponer de herramientas prácticas y basadas en indicadores, relativamente simples y fáciles de estimar, para relevar y diagnosticar el estado de los balances de C en los sistemas de producción ganadera en general y en particular, en aquellos basados en el pastoreo directo.

Los sistemas de indicadores más difundidos para evaluar el balance anual

de C a nivel predial (ej. Agroecoindex, Viglizzo *et al.* 2006) están basados en los procedimientos propuestos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que asumen que las ganancias y pérdidas de carbono en pasturas y pastizales están en equilibrio (estado estacionario de balance neto cero, IPCC 2019). Estos sistemas de indicadores no consideran el efecto de cambios en la calidad del forraje consumido, ni la retención de C en biomasa aérea o subterránea generada en el rebrote post pastoreo. Por tanto, resulta que la emisión de GEI producida por la digestión (especialmente en rumiantes) y excretas (heces y orina) de los animales determina un balance de C negativo y obligatoriamente, un impacto ambiental nocivo.

Sin embargo, se conoce que el stock de COS y la emisión de GEI son sensibles a cambios en la productividad y calidad de las pasturas y su interacción con la carga animal (CA; Soussana y Lemaire

2014; Conant *et al.* 2017). El uso de especies forrajeras mejoradas y el manejo adecuado del pastoreo pueden aumentar el COS entre 0,11 y 3,04 t C/ha/año (Liu *et al.* 2011). Por consiguiente, es relevante incorporar estos aspectos a los sistemas de evaluación, para conocer y evaluar cómo el manejo de las pasturas y del pastoreo puede afectar el balance neto de C.

La finalidad de este trabajo es proponer un modelo simplificado de indicadores, capaz de evaluar adecuadamente algunos aspectos del desempeño ambiental en sistemas ganaderos con pastoreo directo. Más específicamente, se presenta un modelo para estimar el balance anual de C de fácil utilización, que permite realizar un estado de situación y un diagnóstico sobre el balance de COS y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas de producción de carne bovina (cría, recría y/o engorde). La escala de aplicación es a nivel predial y/o en subsistemas ganaderos dentro de

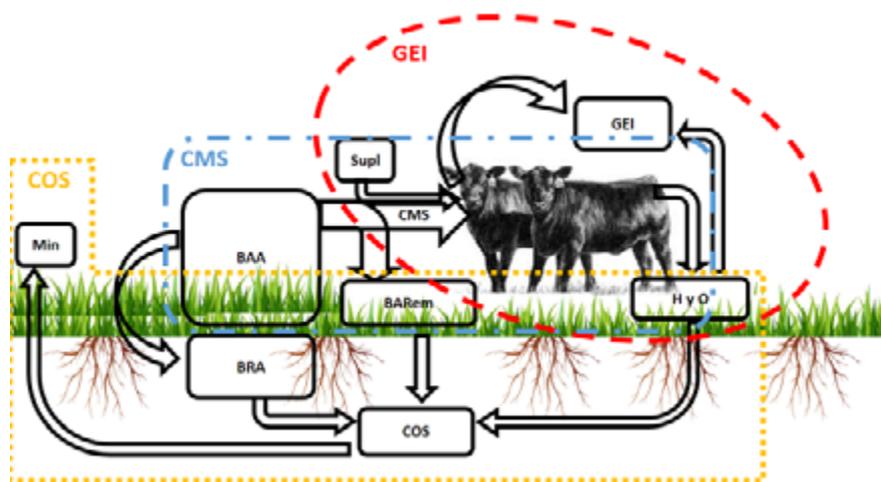


Figura 1. Esquema de los flujos considerados en el modelo PastorC. Se indican los tres sub-modelos interrelacionados de consumo de materia seca (CMS, azul), emisión de gases de efecto invernadero (GEI, rojo) y balance de carbono orgánico del suelo (COS, naranja), que se integran en el modelo general. BAA: Biomasa aérea acumulada, BRA: Biomasa radical acumulada, BARem: Biomasa aérea remanente, CMS: Consumo de materia seca, COS: Carbono orgánico del suelo, GEI: Gases de efecto invernadero, H y O: Heces y orina, Min: Mineralización del suelo, Supl: Suplementación alimenticia.

sistemas más complejos. En principio, se lo ha ideado para su uso en situaciones de la región templada central de la República Argentina (sur de la provincia de Santa Fe y centro de la provincia de Buenos Aires).

Materiales y métodos

Modelo

Se implementó un modelo en un programa informático llamado *PastorC*, utilizando el soporte de Microsoft Excel, para estimar el balance anual de COS, las emisiones de GEI y el balance de C total de sistemas de producción de carne con pastoreo directo, para la región templada central de la República Argentina.

PastorC requiere el ingreso de información de la oferta forrajera, a nivel de lote, de aquellos recursos que se destinan al pastoreo directo; e información de la demanda ganadera, a nivel de cada proceso del rodeo (categorías) y sus características. Las variables de ingreso de la oferta forrajera a nivel de lote son: la superficie, el contenido de MO y la densidad aparente en los primeros 20 cm de suelo, el recurso forrajero presente, la tasa de crecimiento promedio, la digestibilidad y el tiempo de uso de cada recurso. Las variables de ingreso de la demanda ganadera, para los rodeos de cría o cada proceso de invernada son: la categoría, la cantidad de animales, el peso promedio, la duración y el nivel de suplementación (en equivalente grano de maíz). En cada proceso se pueden realizar ajustes relacionados con el tipo de animal (sexo, edad, frame, raza y condición corporal), la ración (restricción al consumo, uso de aditivos, sustitución por suplementación) y las condiciones ambientales (temperatura, barro, stress térmico).

El modelo conceptual utilizado para el funcionamiento del programa *PastorC* toma las variables de ingreso mencionadas para alimentar tres sub-modelos interrelacionados: un sub-modelo de consumo de materia seca (CMS), un sub-modelo de producción de GEI y un sub-modelo de balance de COS (Figura 1).

El CMS se estima para cada proceso o categoría del rodeo mediante ecuaciones

basadas en características del animal, de la dieta y el ambiente climático (adaptado de Fox *et al.* 1988 y 2004). Las estimaciones de emisiones de GEI de los vacunos, limitadas a la fermentación entérica y fecal y a las emisiones directas e indirectas de N₂O de excretas, se adaptaron de la metodología propuesta por el IPCC (2019). Se consideraron potenciales de calentamiento relativo al CO₂, con una escala de horizonte a 100 años, para las emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ de 21, 310 y 1, respectivamente (Viglizzo *et al.* 2006). Para unificar con el balance de COS, las emisiones se expresan en unidades de C utilizando el factor 0,273 (Viglizzo *et al.* 2019). Detalles de factores y coeficientes de cálculo utilizados se presentan en el Apéndice.

Para la estimación del balance de COS se adaptó el modelo más simple, de dos compartimentos, propuesto por Hénin y Dupuis (1945), que considera el C de los residuos que se incorporan al suelo en una única fracción de COS. Existen modelos más complejos de tres compartimentos que dividen el COS en sus fracciones lábil y estable (Andriulo *et al.* 1999; Irizar *et al.* 2015). Recientes investigaciones (Villarino *et al.* 2021) muestran la importancia de los exudados de las raíces (rizodeposición) en el aporte a la materia orgánica mineralizada del suelo y seguramente este proceso llevará al desarrollo de modelos de mayor complejidad aún. Se consideró que, si bien la estimación de dichas fracciones posiblemente aumenten la precisión y mecanicismo de las predicciones, requeriría de información de entrada más detallada que disminuiría la facilidad y practicidad de uso pretendidas para esta

Las fuentes de ingreso al COS del modelo son: la biomasa aérea remanente (BARem), la biomasa radical acumulada en los primeros 20 cm de suelo (BRA) y las heces (Liu *et al.* 2011). Como salida de COS, se estima la mineralización como el producto entre el contenido de COS en los primeros 20 cm y un coeficiente de mineralización *k*₂, calculado a partir de los datos reportados por Irizar *et al.* (2015).

El balance de COS se calcula como la diferencia entre entradas y salidas de C, expresado como t C / ha / año, tomando valores positivos cuando el suelo retiene C y valores negativos cuando emite C. El balance de C total del sistema se estima como el balance del COS menos las emisiones de GEI de vacunos, expresados en t C/ha/año. Nuevamente, cuando el balance es positivo el sistema retiene C, mientras que cuando es negativo, el sistema actúa como fuente de C a la atmósfera.

$$\text{Balance de C total (t C/ha/año)} = \text{Balance de COS} - \text{Emisiones de GEI de vacunos}$$

Además, el modelo calcula un índice de "compensación de GEI de los vacunos" (%) definido como el cociente entre el balance de COS y las emisiones de GEI de los vacunos.

$$\text{Índice de compensación de GEI (\%)} = \frac{\text{Balance COS}}{\text{Emisiones GEI de vacunos}} * 100$$

Este índice indica la proporción del total de emisiones que es compensada por captura de C en el suelo. *PastorC* utiliza una escala subjetiva para realizar una valoración diagnóstica, indicando la condición ambiental del sistema (Cuadro 1).

ESCALA DE VALORACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL ÍNDICE DE COMPENSACIÓN DE GEI DE VACUNOS			
Índice compensación GEI de vacunos	Valoración	Balance COS	Balance C total
> 100 %	Muy favorable	Aumento	Compensación total emisiones GEI. El sistema actúa es sumidero de C
67 – 100 %	Favorable	Aumento	Alta compensación emisiones GEI
33 – 66 %	Regular	Aumento	Media compensación de emisiones GEI
0 – 32 %	Desfavorable	Aumento	En equilibrio o baja compensación de emisiones GEI
< 0 %	Muy desfavorable	Pérdida	El suelo actúa como fuente de C aumentando las emisiones totales

Cuadro 1.

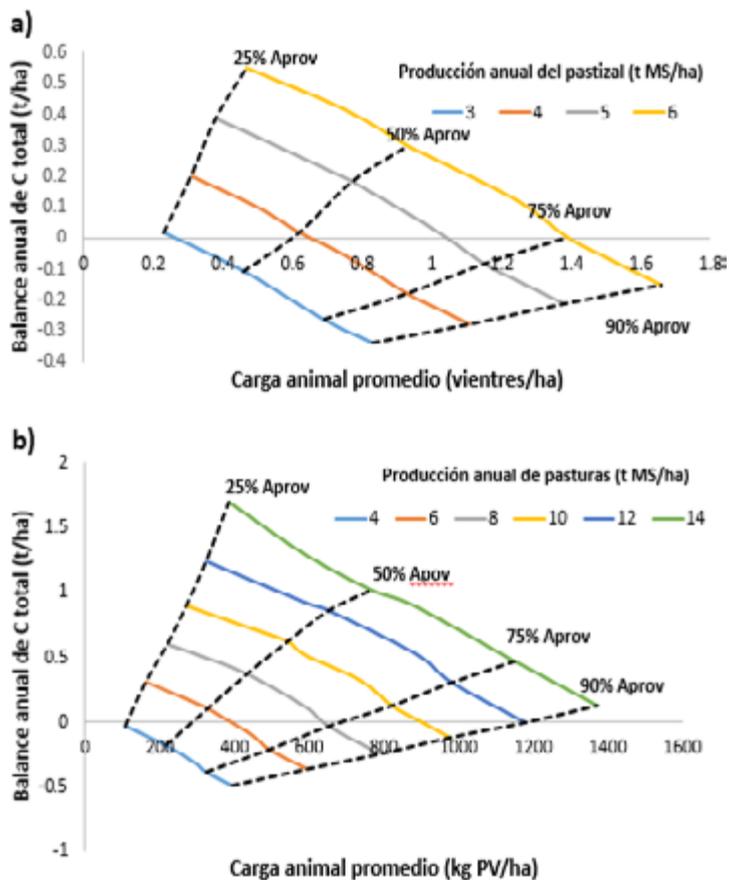


Figura 3. Simulación del balance anual de carbono total de sistemas de cría sobre pastizal natural (a) y sistemas de invernada de cría sobre pastizales y entre -0,10 y 2,23 t C/ha para los sistemas de invernada en pasturas base alfalfa (Figura 4). Estas respuestas concuerdan con trabajos previos que confirman la capacidad de las pasturas y pastizales de actuar como sumideros de C, cuando se realizan manejos adecuados del pastoreo (Liu, *et al.* 2011; Conant *et al.* 2017). Además, agrega más argumentos para el cuestionamiento del supuesto de balance neto cero del COS, asumido para los procedimientos propuestos por el IPCC (2019).

Resultados y discusión

Análisis de sensibilidad

El balance de C simulado por *PastorC* (Figura 3) muestra una alta sensibilidad frente a diferentes niveles de producción de las pasturas y distintos niveles de CA media, tanto para los sistemas de cría como para los sistemas de invernada. Con cargas medias a bajas, menores eficiencias de aprovechamiento y mayores producciones de biomasa, los balances de C resultaron positivos (el sistema funciona como sumidero de C). Con altas cargas, mayores eficiencias de aprovechamientos y bajas producciones de biomasa se obtuvieron balances de C negativos (el sistema funciona como fuente de C). En la medida que aumenta la producción de biomasa de las pasturas se pueden obtener situaciones con mayores eficiencias de aprovechamiento sin afectar negativamente los balances de C (del suelo y total).

En general, los sistemas de cría

mostraron balances de C menos favorables respecto a los sistemas de invernada, explicado por la menor producción de biomasa y digestibilidad de los pastizales, estos sistemas demandarían mejoras en el manejo de los pastizales, con cargas animales promedio de medias a bajas y menores eficiencias de aprovechamiento ($\leq 50\%$), para mejorar los balances de C. Esta reducción en la CA no necesariamente implica una disminución en la productividad de carne (kg/ha), porque en muchos casos puede resultar en un aumento de la producción de los pastizales, mejoras en los índices reproductivos y una mayor capacidad de respuesta del sistema frente a sequías o inundaciones.

Los sistemas de invernada sobre pasturas de base alfalfa presentaron una alta capacidad para actuar como sumideros de C, cuando se simuló pasturas de producción mayor a 8 t MS/ha/año. Esto se logró incluso con

CA acordes a altos aprovechamientos (CA de hasta 1300 kg PV/ha y 75% de aprovechamiento para producciones de pasturas de 14 t MS/ha), compatibles con planteos de invernadas pastoriles de alta productividad (Kloster *et al.* 2017).

Las emisiones de GEI de los vacunos aumentaron con la CA, pero no lo hicieron de manera directa, porque fueron sensibles frente a cambios en la producción de las pasturas y el % de aprovechamiento, que determina diferencias en la calidad del forraje consumido por los animales. El impacto de estas variaciones en las emisiones de GEI de los vacunos, muestra la importancia de la falta de sensibilidad que presentan las metodologías que asumen que el COS se mantiene en equilibrio (IPCC 2019), frente a cambios en la productividad y el manejo de las pasturas.

Se obtuvieron balances de COS entre 0,05 y 0,75 t C/ha para los sistemas de cría sobre pastizales y entre -0,10 y 2,23 t C/ha para los sistemas de invernada en pasturas base alfalfa (Figura 4). Estas respuestas concuerdan con trabajos previos que confirman la capacidad de las pasturas y pastizales de actuar como sumideros de C, cuando se realizan manejos adecuados del pastoreo (Liu, *et al.* 2011; Conant *et al.* 2017). Además, agrega más argumentos para el cuestionamiento del supuesto de balance neto cero del COS, asumido para los procedimientos propuestos por el IPCC (2019).

El índice de compensación de emisión de GEI de vacunos (Figura 5) presentó mejoras con los aumentos de producción de las pasturas y pastizales. Para un mismo nivel de producción de pasturas, este índice disminuyó a tasas decrecientes con el aumento de la carga animal o de la eficiencia de aprovechamiento.

En los sistemas de cría sobre pastizales, la compensación de emisiones fue muy favorable, superando el 100 % cuando las producciones de biomasa fueron altas y las cargas moderadas (0,8 a 1,0

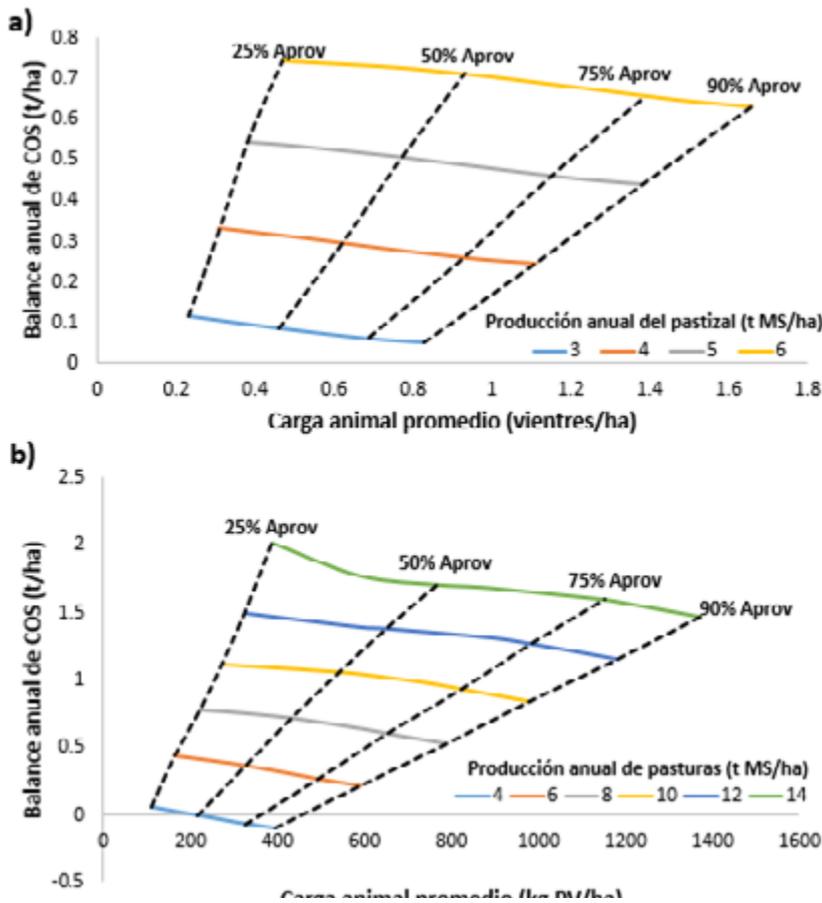


Figura 4. Simulación del balance anual de carbono orgánico del suelo (COS) de sistemas de cría sobre pastizal natural (a) y de sistemas de invernada sobre pasturas base alfalfa (b), con diferente producción de biomasa aérea y carga animal. Las líneas enteras, indican el balance de COS para una misma producción anual de biomasa. Las líneas punteadas, el balance de COS para una misma eficiencia de aprovechamiento.

vientres/ha), que permiten eficiencias de aprovechamiento menores a 75 %. Sin embargo, con cargas altas (1,2 a 1,4 vientos/ha) se lograron compensaciones de emisiones medias a altas, entre 33 y 100 %, cuando la producción de pasturas fue alta (5 a 6 t MS/ha/año), mientras que con bajas producciones de pasturas (3 t MS/ha/año), la compensación de emisiones fue baja (menores al 33 %).

En los sistemas de invernada sobre pasturas de base alfalfa, se lograron mayores compensaciones de emisiones que en el caso de los sistemas de cría sobre pastizal. Como se mencionó previamente, se lograron compensaciones totales de emisiones con cargas moderadas a altas cuando la producción de las pasturas fue mayor a 8 t MS/ha. Además, la fijación de COS permitió lograr altas compensaciones de emisiones (67-100 %) incluso con cargas mayores a 1000 kg PV/ha

cuando las producciones de pastura fueron superiores a 12 t MS/ha/año.

La capacidad de las pasturas y pastizales de actuar como sumideros

de C, compensando parcial o totalmente las emisiones de GEI de los vacunos, remarca la necesidad de ser incluida en los procedimientos de evaluación de balances de C y de valoración ambiental de los sistemas ganaderos de base pastoril (Viglizzo *et al.* 2019).

Estudios de caso

En los resultados de las estimaciones de los balances de C realizadas para los casos reales de cría e invernada extraídos de las zonas Sur de Santa Fe y Centro de Buenos Aires (Cuadro 2), se destaca la capacidad de diferenciar la valoración ambiental de diferentes sistemas que presenta *PastorC*.

Para los sistemas de cría, se obtuvieron valoraciones favorables cuando la carga fue moderada, con eficiencias de aprovechamiento menores a 70 %. Cuando las cargas rindieron aprovechamientos mayores a 75 %, las valoraciones fueron de regulares a desfavorables. La mejor valoración la obtuvo el sistema de invernada de baja carga, con una sobrecompensación de 235 %. El sistema de invernada de Santa Fe, tuvo una valoración regular debido a la mayor carga animal y aprovechamiento (68 %).

Estos estudios de caso no pretenden realizar una evaluación y diagnóstico de la situación a nivel regional, solo intentan mostrar la utilidad práctica y facilidad de uso de *PastorC*.

BALANCES DE CARBONO REALIZADOS CON PASTORC DE CASOS REALES DE CRÍA Y DE INVERNADA DE LA ZONA SUR DE SANTA FE Y CENTRO DE BUENOS AIRES						
	Cría				Invernada	
	Sta Fe	Bs As	Sta Fe	Bs As	Sta Fe	Bs As
	A	B	C	D	E	F
Carga animal promedio, kg PV/ha	510	798	574	644	745	326
Eficiencia aprovechamiento, %	54	81	68	75	68	38
Aporte biomasa remanente, t C/ha	0,28	0,14	0,25	0,09	0,25	0,37
Aporte biomasa radical, t C/ha	0,21	0,40	0,40	0,11	0,35	0,27
Aporte heces, t C/ha	0,23	0,40	0,36	0,24	0,33	0,12
Pérdidas por mineralización CO suelo, t C/ha	0,44	0,63	0,61	0,44	0,71	0,46
Balance COS, t C/ha	0,28	0,31	0,40	< 0,01	0,22	0,28
CH4 Entérico, t C/ha	0,25	0,46	0,39	0,28	0,41	0,10
CH4 Fecal, t C/ha	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01
N2O Fecal + N2O Orina, t C/ha	0,03	0,06	0,05	0,03	0,05	0,02
Emisiones GEI vacunos, t C/ha	0,28	0,53	0,44	0,31	0,47	0,12
Balance de C total, t C/ha	0,00	-0,22	-0,05	-0,31	-0,25	0,17
Índice compensación de GEI vacunos, %	99	59	89	0	46	235

Cuadro 2.

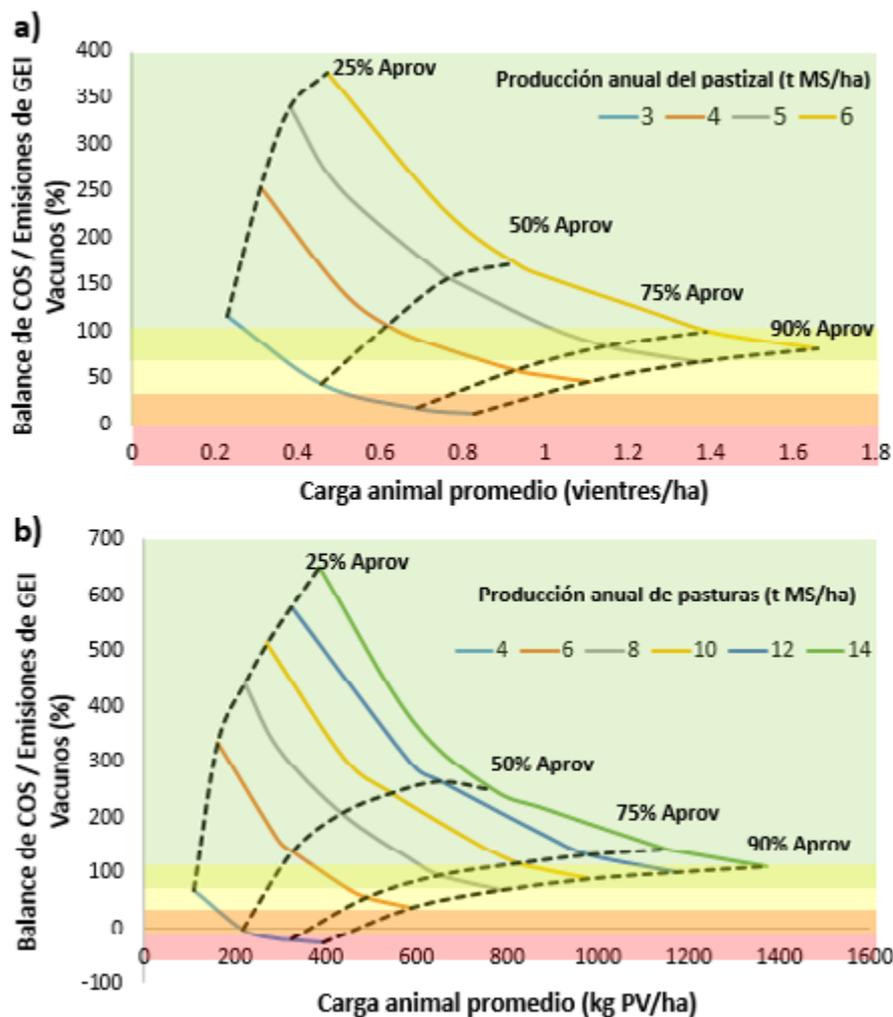


Figura 5. Simulación del índice de compensación de emisiones de gases de efecto invernadero de sistemas de cría sobre pastizal natural (a) y de sistemas de invernada sobre pasturas base alfalfa (b), con diferente producción de biomasa aérea y carga animal. El índice indica la proporción del total de emisiones que es compensada por captura de carbono en el suelo. Escala de valoración: verde: muy favorable, verde claro: favorable, amarillo: regular, naranja: desfavorable, rojo: muy desfavorable. Las líneas enteras, indican el índice de compensación de emisiones para una misma biomasa aérea. Las líneas punteadas, el índice de compensación de emisiones para una misma eficiencia de aprovechamiento.

Conclusiones

PastorC permite evaluar, de manera simple y práctica, el balance de C de sistemas y subsistemas ganaderos con pastoreo directo, incorporando el balance del COS y mostrando sensibilidad a cambios en la producción y en el aprovechamiento de las pasturas. Esta herramienta permite realizar una valoración ambiental de las variaciones en CA. Sirve como una primera aproximación para determinar la CA ambiental para distintos tipos de sistemas ganaderos.

Los sistemas ganaderos con base pastoril pueden actuar como fuentes o sumideros de C, dependiendo del tipo de sistema, de la CA, de la producción de pasturas y del manejo del pastoreo. Los

sistemas de cría sobre pastizal requerirían de reducciones de CA y mejoras en el manejo del pastoreo para lograr una alta compensación de emisiones. Por su parte, los sistemas de invernada sobre pasturas de alta producción manejados con cargas moderadas pueden actuar como sumideros de C.

Apéndice

Factores y coeficientes de cálculo

Factor de producción de metano: Pasturas: entre 10 y 23,3 g CH₄/kg MS, para digestibilidades de 75 y 50 %, respectivamente (adaptado de IPCC, 2019). Suplementos: 13,6 g CH₄/kg MS (IPCC, 2019). Fecal: producción de sólidos volátiles (VS) afectados por un factor de emisión de 0,60 g CH₄/kg VS (IPCC, 2019). Emisiones de N₂O: Directas: N total

producido por heces y orina (0,34 kg de N cada 1000 kg de peso vivo); factor de emisión de 0,004 kg N-N₂O/kg N (IPCC, 2019).

Indirectas: N producido por heces y orina, fracción de N volátil de 21 % y un factor de emisión de 0,01 kg N-N₂O/kg N (IPCC, 2019).

Biomasa radical (BRA): 0,53 y 0,74 kg MS radical/kg MS aérea para pasturas anuales y perennes, respectivamente (Liu *et al.* 2011). No se considera aporte para rastrojos. BRA mínima de 640 kg MS/ha (adaptado de Saffih-Hdadia y Maryb, 2008). Ajuste 0-20 cm (Fan *et al.* 2016).

Producción de heces: Pastoreo: según digestibilidad variable dependiente de la calidad media de las pasturas y de su % de aprovechamiento (adaptado de Cangiano *et al.*, 1999). Suplementos: se asume una digestibilidad promedio constante de 80 %. Contenido de C de la MS: 0,45 t C/t MS (Liu *et al.* 2011)

Humificación: (k_a, k_r, k_h , adaptado de Clivot *et al.*, 2019). Biomasa aérea remanente: k_a variable, función decreciente de 0,31 a 0,16 según el aumento de biomasa BRA: $k_r = 0,39$. Heces: $k_h = 0,52$.

Mineralización (k_2 , adaptado de Irizar *et al.*, 2015):

Con labranza: $k_2 = 0,0014 * COS - 0,0309$
Sin labranza o siembra directa: $k_2 = 0,0008 * COS - 0,0129$

Bibliografía

Andriulo, A.E., Mary, B., Guerif, J. (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19(5):365-377.
Cangiano, C.; Fernández, H.; Galli, J. (1999). ConPast 3.0: Un modelo de simulación del comportamiento ingestivo y del consumo de bovinos en pastoreo. Ed. C. Cangiano. INTA EEA Balcarce. 230 p.
Clivot, H., Mouny, J., Duparque, A., Dinh, J., Denoroy, P., Houot, S., Vertes, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., Mary, B. (2019). Modelling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environ. Modelling and Software*, 118:99-113.
Conant, R., Cerri, C., Osborne, B., Paustian, K. (2017). *Grassland*

Artículo de divulgación

management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2):662-668.

Fan, J., McConkey, B., Wang, H., Janzen, H. (2016). Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crop Res.* 189: 68–74.

Fox, D., Sniffen, C., O’Conner, J. (1988). Adjusting nutrient requirements of beef cattle to animal and environmental variations. *Journal of Animal Sci.*, 66:1475-1495.

Fox, D., Tedeschi, L., Tylutki, T., Russell, J., Van Amburgh, M., Chase, L., Pell, A., Overton, T. (2004). The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Sci. Tech.*, 112:29-78.

Kloster, A., Latimori, N., Zurbriggen, G., Garis, M. (2017). Comparación de dos alternativas de invernada intensiva con biotipos británicos. *INTA EEA Marcos Juárez, Información para Extensión en línea* N° 25, 1-7.

Galli, J., Dichio, L., Pece, M., Torresi, S. (2001). Planificación Forrajera. Tablas. *Sistemas de Producción Animal*. FCA-UNR. 23 p

Hélin, S., Dupuis, M. (1945). Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.*, 11: 17-29.

IPCC (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 4. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Irizar, A., Milesi Delaye, L., Andriulo, A. (2015). Projection of soil organic carbon reserves in the argentine rolling pampa under different agronomic scenarios. *The Open Agriculture Journal*, 9:30-41.

Liu, D.L., Chan, K.Y., Coneys, M.K, Li, G., Poile, G.J. (2011). Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. *Geoderma*, 165: 69-77.

Saffih-Hdadi, K., Mary, B., (2008). Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biol. Biochem.* 40: 594–607.

Soussana, J.F., Lemaire, G. (2014). Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190: 9-17.

Viglizzo, E.F., Frank, F., Bernardos, J., Buschiazzo, D.E., Cabo, S. (2006). A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117: 109-134

Viglizzo, E.F., Ricard, M.F., Taboada, M.A., Vázquez-Amabile, G. (2019). Reassessing the role of grazing lands in carbon-balance estimations: Meta-analysis and review. *Science of the Total Environment*, 661: 531-542.

Villarino, S., Pinto P, Jackson R., Piñeiro, G. (2021). Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Sci Adv.* 2021 Apr 14;7(16):eabd3176. doi: 10.1126/sciadv. abd3176



ASOCIACIÓN COOPERADORA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
