

Informe Técnico 2023-2024.

SEPTIEMBRE 2024

Proyecto Red de Brechas de Carbono – AAPRESID – INTA

ETAPA 2 (2024)

Guillermo E. Peralta* - Luciano Di Paolo – Bianca Di Tirro

*Coordinación Técnica Proyecto Brechas AAPRESID – Consultor FAO-GSP – Investigador Asesor

FAUBA - guillermoeperalta@gmail.com - Guillermo.Peralta@fao.org

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta un análisis de los resultados obtenidos en la etapa 2 del Proyecto Brechas de Carbono de AAPRESID, enfocado en la estimación de aportes de carbono generados por residuos de cosecha en las áreas agrícolas extensivas de Argentina. Se utilizaron datos de rendimiento y áreas sembradas de los últimos cinco años, junto con modelos de simulación y técnicas de mapeo digital para calcular los niveles de carbono necesarios para mantener los actuales contenidos de carbono orgánico en el suelo (COS) y para alcanzar niveles superiores. Se determinó que, en promedio, las áreas agrícolas aportan 2.56 t C/ha/año, cantidad que es comparable a los aportes necesarios para conservar los niveles actuales de COS. Sin embargo, algunas regiones presentan requerimientos superiores a 5 t C/ha/año para evitar un descenso en sus niveles de carbono. Las proyecciones indican que, para incrementar los stocks de COS a niveles alcanzables (0.3% anual), es necesario un aumento del 11% en los aportes, elevándolos a 2.90 t C/ha. En el caso de buscar maximizar la capacidad de secuestro de carbono, se requerirían 5.2 t C/ha anuales, lo que significaría duplicar los aportes actuales. El informe concluye que, aunque los niveles promedio de aportes son suficientes para mantener el COS actual, para transformar los suelos en sumideros netos de carbono será crucial optimizar el manejo de residuos y fomentar un incremento en los aportes de rastrojo y raíces mediante la extensión de prácticas agrícolas sostenibles.

INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Justificación

La captura de carbono (C) atmosférico a través de cultivos y pasturas, y su almacenamiento en forma de carbono orgánico del suelo (COS), representa una de las estrategias más prometedoras para la mitigación del cambio climático, debido a su escalabilidad global y menor impacto en el uso de agua, nutrientes y energía, en comparación con otras tecnologías de mitigación (Lal et al., 2019). Los suelos agrícolas tienen la capacidad de almacenar entre dos y tres veces más C que la atmósfera, lo que convierte a pequeños aumentos en los stocks de COS en una herramienta potencialmente poderosa para la mitigación climática (Minasny et al., 2017). La iniciativa "4 por mil" subraya la relevancia de este enfoque.

No obstante, la capacidad máxima de acumulación de carbono en los suelos y la tasa de secuestro varían significativamente según factores como el manejo actual, los aportes de C del sistema, el historial de uso del suelo, los niveles base de carbono, las propiedades físicas del suelo y las condiciones climáticas (Post y Kwon, 2000). Es crucial entonces evaluar la **capacidad máxima de secuestro de carbono** en los suelos de una región específica, determinar la distancia actual con respecto a dicha capacidad, y establecer metas alcanzables mediante la adopción de prácticas de manejo existentes o innovadoras. Estas diferencias entre los niveles actuales, los niveles alcanzables y los niveles máximos o potenciales de almacenamiento de carbono en el suelo se conceptualizan como las **"brechas de carbono"** (Hoyle et al., 2011). Esta evaluación permitirá diseñar estrategias más eficaces para cerrar dichas brechas, optimizando la captura de C en los suelos y contribuyendo de manera significativa a la mitigación del cambio climático.

La Etapa 1 del Proyecto de Brechas (AAPRESID, 2023) evidenció una brecha significativa entre los niveles actuales y el potencial de almacenamiento de COS, con una brecha total del 54%. Así, las reservas de COS en los suelos agrícolas del país se sitúan en un 46% de su capacidad máxima. Sin embargo, las diferencias regionales son marcadas: mientras algunas áreas como el Sudeste de Bs.As. alcanzan entre el 85-90% de su capacidad máxima (brecha del 10-15%), otras como el Sur de Santa Fe, Norte de Bs.As. y Entre Ríos apenas superan el 30% (brecha superior al 70%).

Además, el proyecto mostró que algunos productores están logrando incrementar los aportes de C al suelo en un 20-70% en comparación con la media de su región, principalmente mediante prácticas como rotaciones intensivas con gramíneas, cultivos de cobertura y una nutrición equilibrada. La adopción a gran escala de estas prácticas podría aumentar los stocks de COS en un 15-20%, con tasas anuales de incremento del 0,3-0,4% (equivalente a la meta de "4 por mil"). Esto elevaría las reservas de COS del 46% al 56% de su capacidad máxima y reduciría la brecha de carbono total al 44%, mitigando entre el 14-18% de las emisiones anuales del sector agropecuario nacional (agricultura, ganadería y silvicultura), o entre el 50-64% de las emisiones exclusivamente agrícolas.

Para cerrar estas brechas y avanzar hacia una agricultura "neutra en carbono", es esencial promover la adopción masiva de estas prácticas y explorar nuevas estrategias con mayor potencial de secuestro de C. El primer paso clave es cuantificar los aportes actuales de carbono y materia seca a nivel regional, y definir los niveles necesarios para mantener y mejorar los contenidos de COS en los suelos agrícolas. Esto permitirá a productores y asesores, con base en la historia agrícola, identificar si están por encima o por debajo de estos umbrales y actuar en consecuencia.

Hipótesis generales del Proyecto

1. En los sistemas agrícolas actuales, los niveles de carbono orgánico del suelo se encuentran por debajo, tanto de los niveles potenciales como de los alcanzables, en las distintas zonas agroecológicas del país.
2. Existe la posibilidad de incrementar el secuestro de COS a partir de la difusión de prácticas que permitan incrementar los aportes de C al suelo, en las distintas zonas agroecológicas de Argentina.

Objetivos de la Etapa 2 del Proyecto

- 1- Cuantificar los niveles de aportes de C (inputs) y materia seca necesarios para sostener los niveles actuales de COS, y lograr los niveles alcanzables y potenciales de COS, en suelos agrícolas de distintas zonas agroecológicas del país.
- 2- Identificar regiones con mayores diferencias entre estos niveles.
- 3- Diseñar una herramienta digital que permita visualizar brechas y niveles de aportes de C
- 4- Fortalecer la red de intercambio de información entre distintos actores.

Objetivo del presente Informe

- Presentar los resultados del Proyecto Brechas de C durante el período 2023-2024.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco conceptual de trabajo

Las brechas de COS se determinaron durante la Etapa 1 del Proyecto siguiendo un enfoque análogo al concepto eco-fisiológico de brechas de rendimiento (Merlos et al., 2015; van Ittersum et al. 2013). De acuerdo con este enfoque de brechas, los niveles potenciales, alcanzables y actuales de COS están determinados por factores edafo-climáticos y de manejo (Hoyle et al., 2011), que pueden agruparse en factores definitorios, limitantes y reductores, respectivamente (fig. 1).

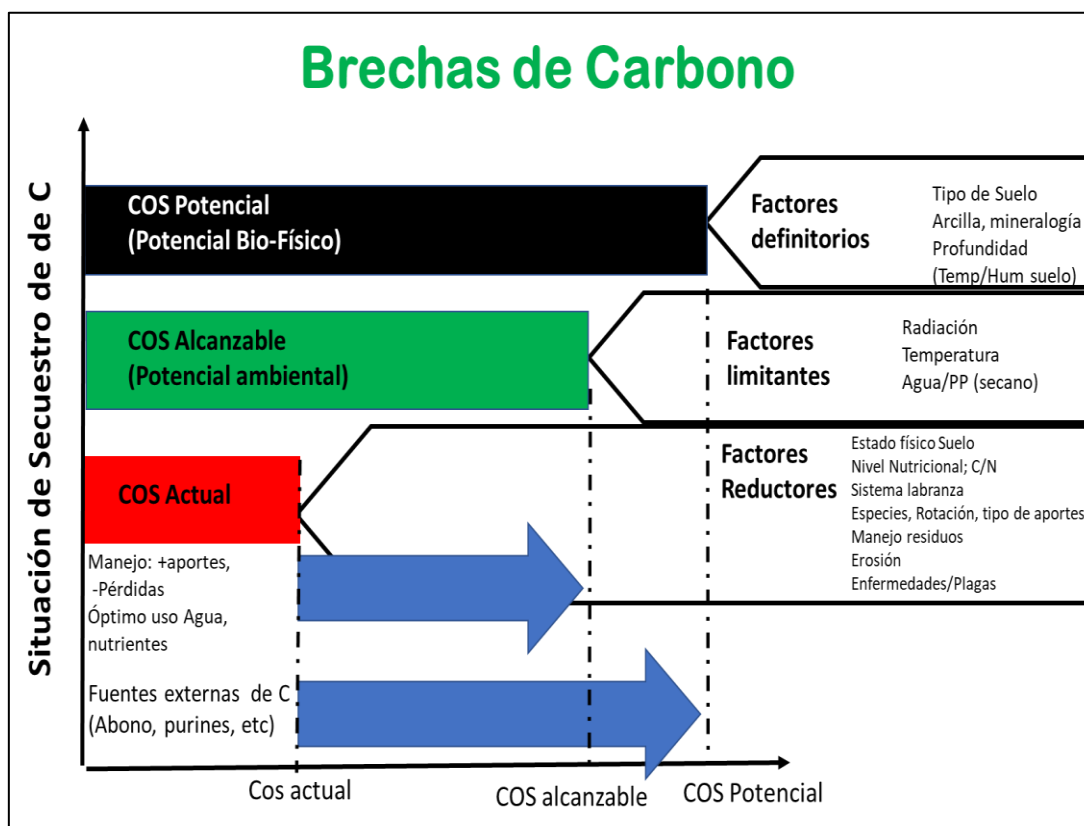


Figura 1. Marco conceptual del enfoque del Proyecto de Brechas de Carbono. Adaptado de Hoyle et al. (2011)

Para esto se estimaron los niveles “actuales”, “alcanzables” y “potenciales” de COS en los primeros 30 cm de suelo (en t C/ha) de las tierras agrícolas de distintas zonas agroecológicas de Argentina, a través del uso de modelos de simulación (RothC) y mapeo digital de suelos siguiendo la metodología FAO-ITPS GSOCseq; FAO, 2020. Los resultados de la Etapa 1 pueden verse en: <https://www.aapresid.org.ar/blog/revista-brechas-carbono-2023>

Niveles de Aportes de C actuales

Para caracterizar primero un escenario de manejo actual (o BAU), se estimaron los niveles de aportes de C anuales (t C/ha/año) de cada departamento de Argentina en los últimos 5 años (2019-2023) a partir de la información de cultivos, áreas y rendimientos de cultivos del Ministerio de Economía – Agricultura, Ganadería y Pesca (2023). Se incluyó información de maíz, soja, sorgo, girasol, algodón, poroto, trigo, cebada, colza, garbanzo, lenteja, arveja, avena, centeno. Para el caso de los cultivos de servicio, se estimó el nivel de aportes de materia seca a partir de los resultados regionales de la Red de Cultivos de Servicio AAPRESID (2022-2023), y la superficie sembrada en base a RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola aplicada – Bolsa de Cereales).

Los aportes de C anuales de cultivos de cosecha y coberturas se calcularon siguiendo las propuestas de Bolinder et al (2007; 2012), a partir de los rendimientos y parámetros específicos de cada cultivo (material suplementario).

De acuerdo con este marco, el aporte anual total de C (C_i – *Carbon input*) se puede estimar como la suma los aportes de C de todas las fracciones vegetales excepto el producto agrícola (p.ej. grano):

$$C_i = C_S + C_R + C_E \quad (1)$$

donde C_S es el carbono en rastrojo o biomasa aérea remanente, C_R es el carbono en los tejidos radicales, y C_E el carbono de exudados o deposiciones radicales (rizodeposiciones). Se asume que la concentración de C de todas las partes de la planta es de 0,45 g C. g materia seca⁻¹. El C aportado por cada fracción se estimó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$C_P = Y_p \times 0.45 \quad (2)$$

$$AB = Y_p / HI \quad (3)$$

$$C_S = (AB - Y_p) \times S_s \times 0.45 \quad (4)$$

$$C_R = ((Y_p / HI) \times R:S) \times 0.45 \quad (5)$$

$$C_E = C_R \times Y_E \quad (6)$$

donde Y_p es el rendimiento de materia seca o producto cosechado del producto aéreo (t/ha/año), AB es la biomasa aérea (materia seca, t.ha-1-año-1), HI es el índice de cosecha (rendimiento cosechado / materia seca aérea total). (En el caso de los cultivos de cobertura, se considera que Y_p es 0 y, por lo tanto, toda la materia seca aérea se considera C_S). $R:S$ es la relación raíz-tallo (biomasa subterránea/biomasa aérea). El factor S_s (0-1) representa la fracción de los residuos de cultivos aéreos que quedan en el campo y no se eliminan (por defecto = 1). Si se elimina una parte de los residuos (p. ej., se elimina la paja de trigo para alimento animal o combustible), entonces $S_s < 1$. Y_E es el C de deposiciones radicales (rizodeposiciones) expresado como un factor relativo a las raíces recuperables. C_E se estimó en 65% de la biomasa de raíces para cultivos anuales ($C_E = C_R \times 0.65$) (Bolinder et al., 2007). Los parámetros HI , $R:S$ y % de MS utilizados de cada cultivo se presentan en material suplementario.

Para poder luego comparar los aportes de C reales actuales con los aportes de C de equilibrio (de mantenimiento de niveles actuales, de niveles alcanzables y de saturación), se bajó la resolución de las estimaciones de nivel departamental a una resolución equivalente a la de los mapas generados en la etapa 1. Para esto, se empleó un modelo de random forest (Hengl and McMillan, 2019; Chen et al., 2021) utilizando como covariables el mapa de COS actual INTA, mapa de arcilla, NDVI Sentinel últimos 5 años y temperatura, precipitaciones y evapotranspiración histórica (ver sección información de suelos necesaria para el modelado).

Modelado

Para calcular los niveles de aportes de C al suelo necesarios para mantener en equilibrio un determinado nivel de carbono en el suelo, se utilizó la versión espacial del modelo Roth C (FAO, 2022) basada en lenguaje R (Sierra et al., 2012), con el modificador de siembra directa propuesto por Jordon y Smith (2022). Con este mismo modelo, en la Etapa 1, se proyectaron los cambios en las reservas de COS a 20 y 50 años a partir de los niveles de COS actuales. Para la validación del modelo, se compararon los resultados de simulaciones del modelo y los cambios observados en los niveles de carbono provenientes de ensayos de larga duración de rotaciones de diferente intensidad de AAPRESID (usados también para validación de GSOCseq Argentina; Frolla et al, 2021).

Niveles de Aportes de Mantenimiento

Los niveles de mantenimiento representaron los niveles de aportes de C (y materia seca) anuales necesarios para mantener en equilibrio los niveles actuales de COS en el suelo (representados por el mapa de INTA, 2022). Para calcular estos niveles de aportes de C (C inputs, provenientes

de biomasa aérea y raíces) se utilizó la fase de inicialización del modelo RothC (equilibrium). El modelo se ejecuta iterativamente hasta alcanzar el equilibrio para calcular los aportes anuales de carbono provenientes de residuos vegetales necesarios para mantener estables los niveles de COS para cada pixel del mapa de base, utilizando condiciones ambientales constantes. Esta corrida en equilibrio se ejecuta para un período estándar de 10.000 años, considerando condiciones climáticas constantes (en este caso datos climáticos históricos entre 1980 y 2020).

El aporte anual total de carbono (C) de las plantas puede asumirse inicialmente como $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una primera corrida, y las proporciones de material vegetal añadido al suelo cada mes pueden ajustarse para describir el patrón típico de aportes de cada clase de uso del suelo (Smith et al., 2007; Mondini et al., 2017).

Después de la primera corrida en equilibrio, el aporte anual de C proveniente de los residuos vegetales debe optimizarse para que los resultados del "largo período de ajuste" se ajusten a las estimaciones de los stocks totales de COS en la capa de 0-30 cm proporcionadas por el mapa de COS de INTA (2022). Los aportes de C en equilibrio se ajustan utilizando la siguiente ecuación (Smith et al., 2005):

$$C_{eq} = C_i \times \left(\frac{SOC_{INTA} - IOM}{SOC_{sim} - IOM} \right)$$

donde:

- **C_{eq}** es el aporte anual estimado de carbono en equilibrio (en este caso para el mantenimiento de los niveles actuales de COS),
- **C_i** es el aporte anual inicial de carbono (la suma de las proporciones de la entrada de carbono en el primer equilibrio es 1),
- **SOC_{INTA}** es el carbono estimado en el suelo actual, según los datos de INTA,
- **SOC_{sim}** es el carbono simulado en el suelo después de la primera corrida en equilibrio,
- **IOM** es el contenido de carbono en la fracción de materia orgánica inerte en el suelo (todos los valores en t C ha^{-1}).

El tamaño de la fracción de materia orgánica inerte (**IOM**, en t C ha^{-1}) puede calcularse utilizando la ecuación de Falloon et al. (1998):

$$IOM = 0.049 \times (SOC_{INTA})^{1.139}$$

Una vez calculados los niveles de aportes de C (C inputs de equilibrio), se estimaron los Niveles de Aportes de materia seca total, materia seca aérea total, y materia seca de raíces, promedio de distintos cultivos, basándose en las ecuaciones 1-6.

Niveles de Aportes alcanzables

Los niveles de aportes alcanzables representan a aquellos niveles de aportes de C (y biomasa) anuales, necesarios para mantener en equilibrio los niveles alcanzables de C en el suelo, calculados en la etapa 1, y que representan los niveles de COS que podrían alcanzarse si todos los productores implementaran prácticas como las que hoy usan productores "líderes". Para estimar estos niveles de C inputs de equilibrio se siguió la misma metodología mencionada en la sección anterior, pero usando como base el Mapa de C alcanzable en la etapa 1:

$$C_{eq} = C_i \times \left(\frac{SOC_{ALC} - IOM}{SOC_{sim} - IOM} \right)$$

donde:

- **Ceq** es el aporte anual estimado de carbono en equilibrio (en este caso para el mantenimiento de los niveles actuales de COS),
- **Ci** es el aporte anual inicial de carbono (la suma de las proporciones de la entrada de carbono en el primer equilibrio es 1),
- **SOCALC** es el carbono del suelo alcanzable, calculado en la etapa 1
- **SOCsim** es el carbono simulado en el suelo después de la primera corrida en equilibrio,
- **IOM** es el contenido de carbono en la fracción de materia orgánica inerte en el suelo (todos los valores en t C ha⁻¹).

Niveles de Aportes potenciales

Los niveles de aportes alcanzables representan a aquellos niveles de aportes de C (y biomasa) anuales, necesarios para mantener en equilibrio los niveles de saturación o potenciales de COS calculados en la etapa 1. Para estimar estos niveles de C inputs de equilibrio se siguió la misma metodología mencionada en las secciones anteriores, pero usando como base el Mapa de C de Saturación generado en la etapa 1:

$$C_{eq} = C_i \times \left(\frac{SOC_{SAT} - IOM}{SOC_{sim} - IOM} \right)$$

donde:

- **Ceq** es el aporte anual estimado de carbono en equilibrio (en este caso para el mantenimiento de los niveles actuales de COS),
- **Ci** es el aporte anual inicial de carbono (la suma de las proporciones de la entrada de carbono en el primer equilibrio es 1),
- **SOCsAT** es el carbono del suelo de saturación o potencial, calculado en la etapa 1
- **SOCsim** es el carbono simulado en el suelo después de la primera corrida en equilibrio,
- **IOM** es el contenido de carbono en la fracción de materia orgánica inerte en el suelo (todos los valores en t C ha⁻¹).

Información de base necesaria para el modelado (Inputs)

Datos de suelo:

Nivel de carbono orgánico actual del suelo:

Producto INTA en colaboración MAGYP-AACREA-AAPRESID, presentado en Gaitán et al (2023). Año confección: 2023. Resolución: 250 m x 250 m. Profundidad: 0-30 cm. Unidades: tC/ha. Tipo: Ráster. Uso: Cálculo de Carbono Actual en cada región y unidad de modelado; comparación con valores medidos en lotes de producción; C inicial para proyecciones con modelos de simulación; correlaciones.

Textura del suelo (% arcilla, arena y limo; y limo fino):

Producto INTA. Desarrollado por: INTA. Año confección: 2017. Resolución: Escala 250 m x 250 m. Unidades: g/kg. Tipo: Ráster. Profundidad: 0-30 cm (estimados a partir de valores de 5, 10, 30 cm de profundidad). En el caso de la proporción de arcilla + limo fino (2-20 micrones), éste se estimará a partir de la proporción de arcilla + limo total (2-50 micrones), siguiendo la propuesta de Álvarez y Behrongaray (2021). Uso: input para proyecciones con modelos de simulación; input para estimación de C de Saturación con modelos empíricos; correlaciones.

Datos climáticos

Temperatura promedio (mensual, anual), precipitación promedio (mensual anual), evapotranspiración promedio mensual anual):

Producto Terraclimate. Desarrollado por: Climatology Lab -CRU - JRA55. Año confección: 2020 y actualización periódica. Resolución: 4 km x 4 km. Resolución temporal 1980-2023. Unidades: °C, mm. Tipo: Ráster. Fuente : <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>. Uso: input para proyecciones con modelos de simulación; correlaciones.

Datos de Uso

Uso del Suelo

Producto ESA Land Cover. Desarrollado por: European Space Agency. Año confección: 2022. Resolución espacial: 250 m x 250 m. Resolución temporal: 1992-2022. Unidades: Clases ESA. Tipo: Ráster. Fuente : <https://www.esa-landcover-cci.org/> . Uso: input para proyecciones con modelos de simulación (filtrado para correr modelos en clases croplands = 10, 11, 20, 30, 40, de acuerdo con FAO, 2020); Comparación de resultados dentro de mismo uso de la tierra.

Cobertura mensual del suelo

Producto MODIS_006_MOD17A3HGF (Índice de vegetación normalizado). Desarrollado a partir de: NASA LP DAAC USGS EROS. Año confección: 2023. Resolución espacial: 250 m x 250 m. Resolución temporal: 2000-2022. Unidades: 0-1 (NDVI). Tipo: Raster. Fuente : <https://www.esa-landcover-cci.org/> . Uso: input para proyecciones con modelos de simulación (nivel de cobertura del suelo, de acuerdo con FAO, 2020)

Bases de Productividad (necesarios para estimar Aportes de C actuales)

Rendimiento de cultivos por departamento

Producto Base de Datos de producción y rendimientos históricos de cultivos por departamento. Desarrollado por: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Año confección: 2023. Resolución: Departamental. Resolución temporal 1980-2023 y 2019-2023 (últimos 5 años disponibles). Unidades: superficies (ha), producción (toneladas). Tipo: base csv. Fuente : <https://www.argentina.gob.ar/agricultura/informes-tecnicos-y-estimaciones>. Uso: input para proyecciones con modelos de simulación (cálculo de aportes anuales de C de sistema actual); estimación de aportes de C y % de incremento en los aportes de C en sistemas mejorados respecto de media departamental.

RESULTADOS

NIVELES DE APORTES ACTUALES

Los datos de rendimientos y áreas sembradas correspondientes a los cultivos extensivos en las últimas cinco campañas permitieron estimar los aportes anuales de carbono (C) derivados de los residuos de cosecha (rastrajo, raíces y rizodeposiciones) a nivel departamental, y posteriormente, extrapolarlos a las áreas agrícolas (Figura 2). En promedio, las áreas agrícolas extensivas están generando aportes anuales de 2.56 tC/ha/año, con una marcada concentración en el rango de 2-3 t C/ha/año.

La Figura 3 ilustra la distribución espacial de los niveles de aportes de C en las áreas agrícolas. Se observan mayores niveles de aportes de C en regiones con mayor pluviometría, como la zona núcleo (Norte de Buenos Aires, Sudeste de Córdoba y Sudoeste de Santa Fe; Zonas VI y VII), mientras que se registran menores aportes en el norte del NOA (Zona I), el Este del NEA (zona IIe), el Sudoeste de Buenos Aires y el Este de La Pampa (Zona XI).

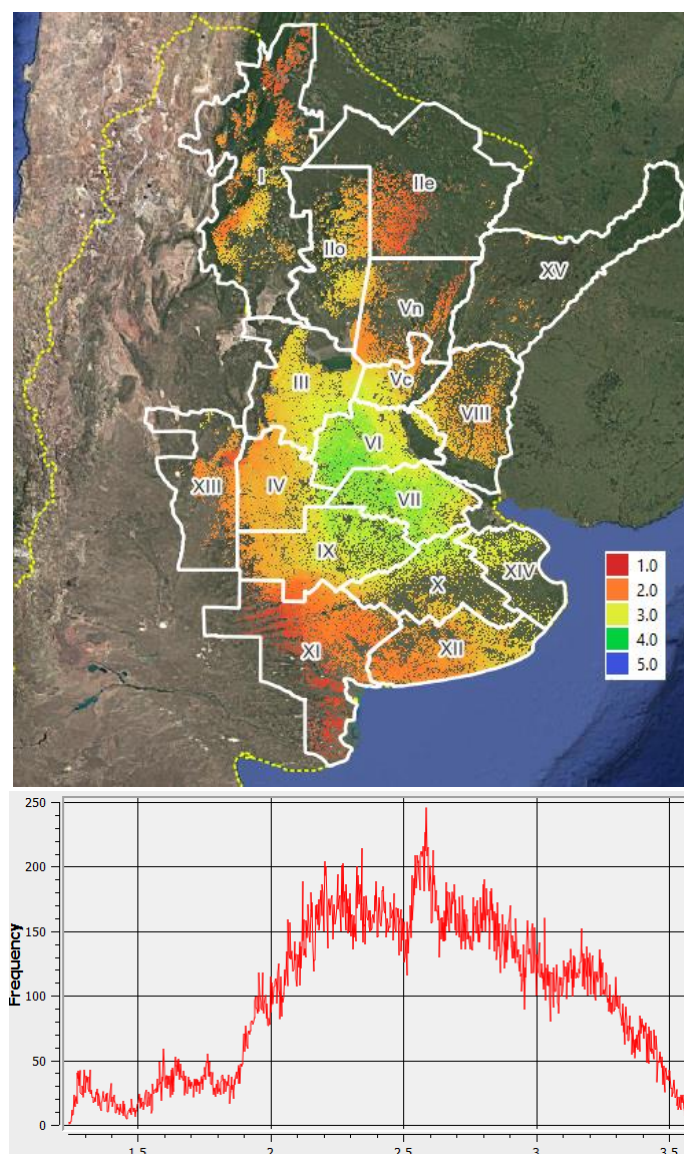


Figura 2. Arriba: Niveles actuales de aportes de C al suelo (C inputs, en t C/ha/año), provenientes de rastrojo y raíces. Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de aportes de C.

A nivel de producción, resulta más intuitivo interpretar los resultados en términos de los niveles de materia seca (MS) aérea requeridos para generar los aportes de carbono mencionados anteriormente. En promedio, las áreas agrícolas extensivas están produciendo un total de 6.6 t MS/ha/año (grano + rastrojo), con una clara concentración entre 6-8 t MS/ha/año.

La **Figura 3** presenta la distribución espacial de la producción anual de biomasa aérea. En esta se destacan zonas como la VI y VII, caracterizadas por altos rendimientos, una alta proporción de doble cultivo y el uso de cultivos de servicio. Estas áreas muestran una producción de materia seca superior a las 10 t MS/ha/año (grano + rastrojo). En contraste, zonas como la IIe y XI, con un solo ciclo de cultivo anual y rendimientos menores, presentan una producción de biomasa inferior a las 4 t MS/ha/año.

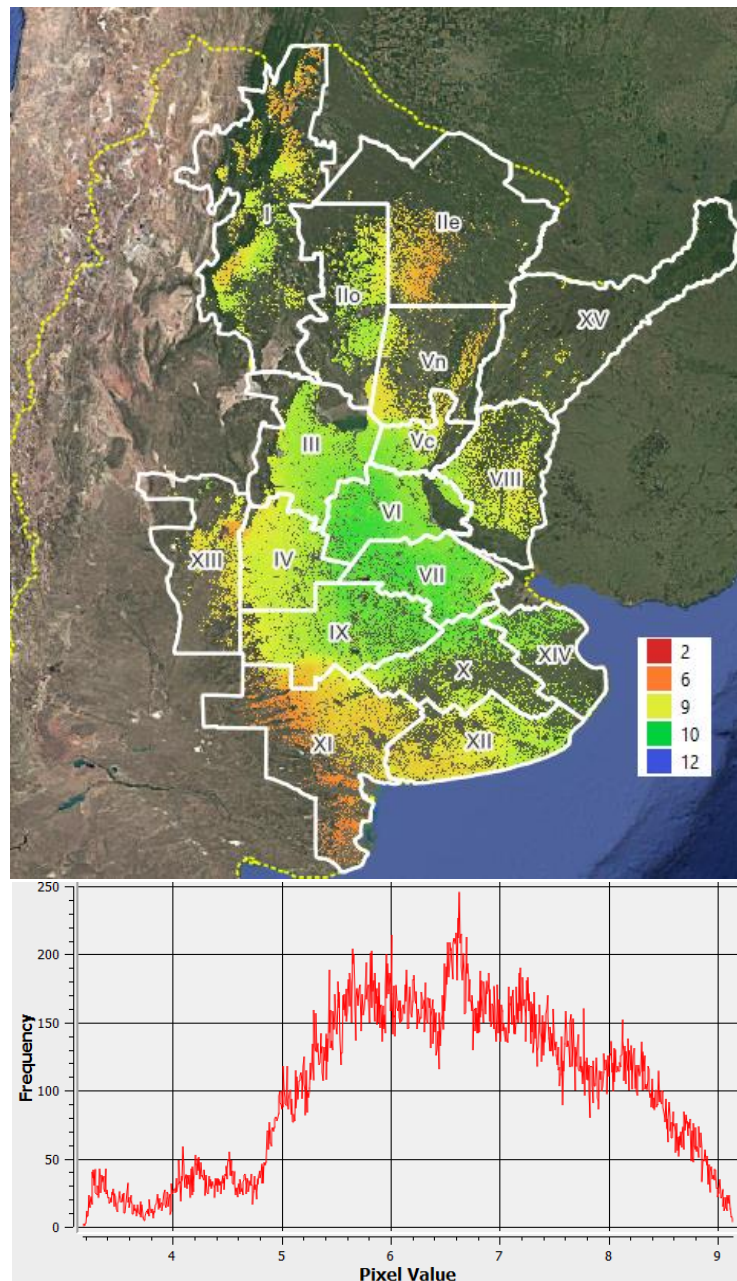


Figura 3. Arriba: Niveles aproximados de producción de Materia Seca aérea (en t MS/ha/año; grano + rastrojo) necesarios para lograr los aportes actuales de C al suelo. Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de producción de materia seca aérea para lograr los niveles de aportes de C actuales.

NIVELES DE APORTES DE MANTENIMIENTO DE STOCKS ACTUALES

Para mantener los niveles actuales de COS en las áreas agrícolas extensivas, se necesitan, en promedio, aportes anuales de 2.45 t C/ha. Las regiones con mayores demandas de aportes de carbono, como el NOA, Entre Ríos, la Zona Núcleo, y el Sudeste de Buenos Aires, requerirán aportes superiores a las 5 t C/ha/año para sostener sus niveles de COS.

En términos de producción de materia seca, esto implica la necesidad de generar, en promedio, 6.3 t MS/ha/año (ver **Figura 5**). Algunas zonas, como las mencionadas, requerirán más de 10 t MS/ha/año para poder mantener los niveles de COS en equilibrio, lo que subraya la importancia de incrementar la producción de biomasa y optimizar el manejo de residuos en estas áreas.

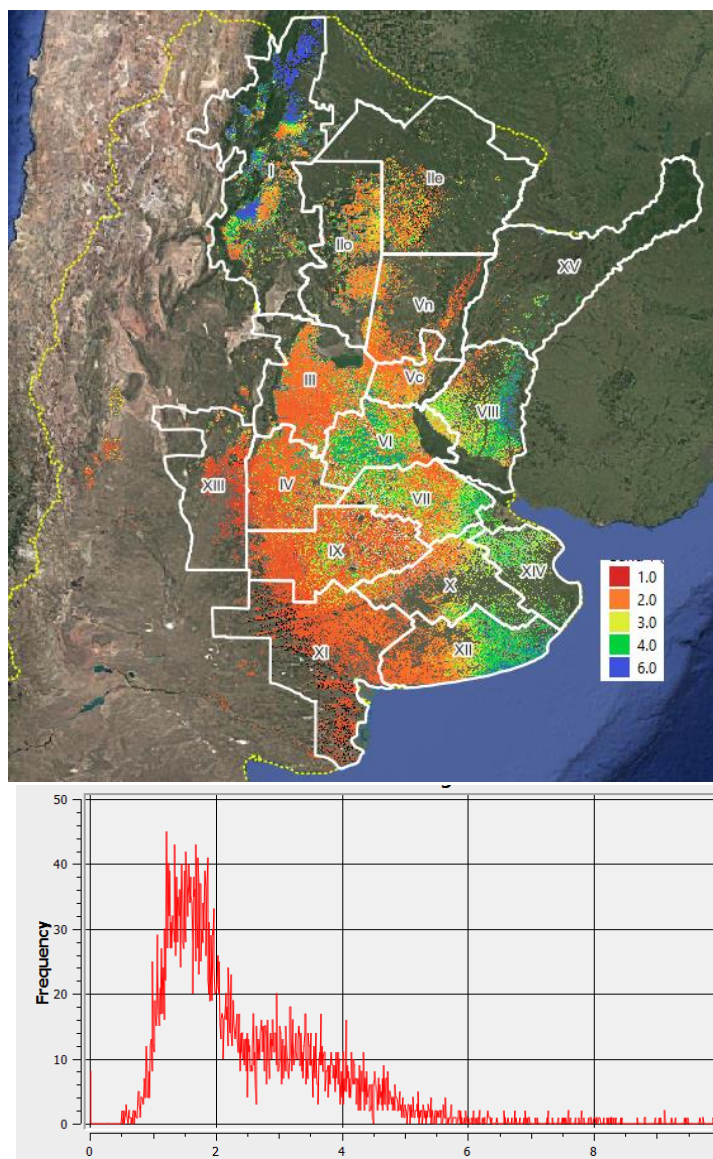


Figura 4. Arriba: Niveles de aportes de C al suelo (C inputs, en tC/ha/año), provenientes de rastrojo y raíces, necesarios para mantener en equilibrio los niveles actuales de carbono orgánico en suelo. Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de aportes de C.

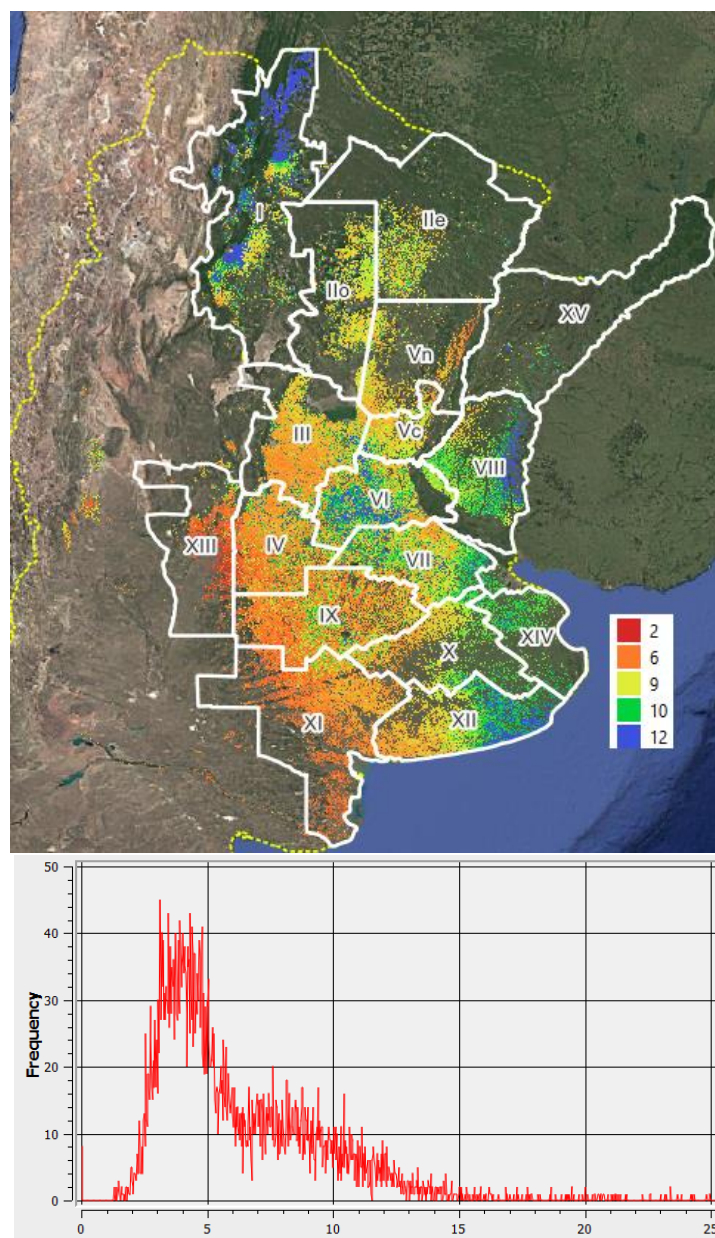


Figura 5. Arriba: Niveles aproximados de producción de Materia Seca aérea (en t MS/ha/año; grano + rastrojo) necesarios para mantener los niveles actuales de carbono orgánico en el suelo. Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de producción de materia seca aérea para lograr los niveles de aportes de C necesarios.

Los niveles de aportes de C y biomasa necesarios para mantener los niveles actuales de COS son, en general, muy similares a los aportes actuales estimados (ver sección anterior). Sin embargo, las proyecciones obtenidas mediante modelos de simulación muestran que algunas regiones, como el NOA, el sudeste de Buenos Aires y el este de Entre Ríos, requerirán aportes de carbono superiores a los actuales para mantener el equilibrio de **COS en el suelo (Figura 6)**.

Por otro lado, zonas como la IX (centro oeste de Buenos Aires) parecen estar generando aportes de carbono que no solo cubren los requerimientos de mantenimiento, sino que incluso los superan. Esto sugiere una capacidad de secuestro adicional o una menor presión para la estabilidad de los niveles de COS.

Es posible que los niveles de aporte de carbono de las últimas campañas, marcadas por condiciones predominantemente secas, no sean suficientes para mantener los niveles de

carbono orgánico en el suelo (COS) en las áreas indicadas en la Figura 6. No obstante, también es importante subrayar que, especialmente en regiones como el NOA y Entre Ríos, la información disponible sobre el uso y la validación de modelos es más limitada.

Además, es probable que los mapas actuales de carbono, utilizados como referencia, estén sobreestimando los niveles reales de COS en estas áreas, lo que podría conducir a una sobreestimación de los aportes de mantenimiento requeridos. Por tanto, será fundamental actualizar la información de base en estas regiones para generar un mapa más preciso de los niveles actuales de COS. Asimismo, es necesario profundizar en el uso y validación de modelos de simulación en las zonas extra-pampeanas para mejorar la precisión de las proyecciones y estrategias de manejo en dichas regiones.

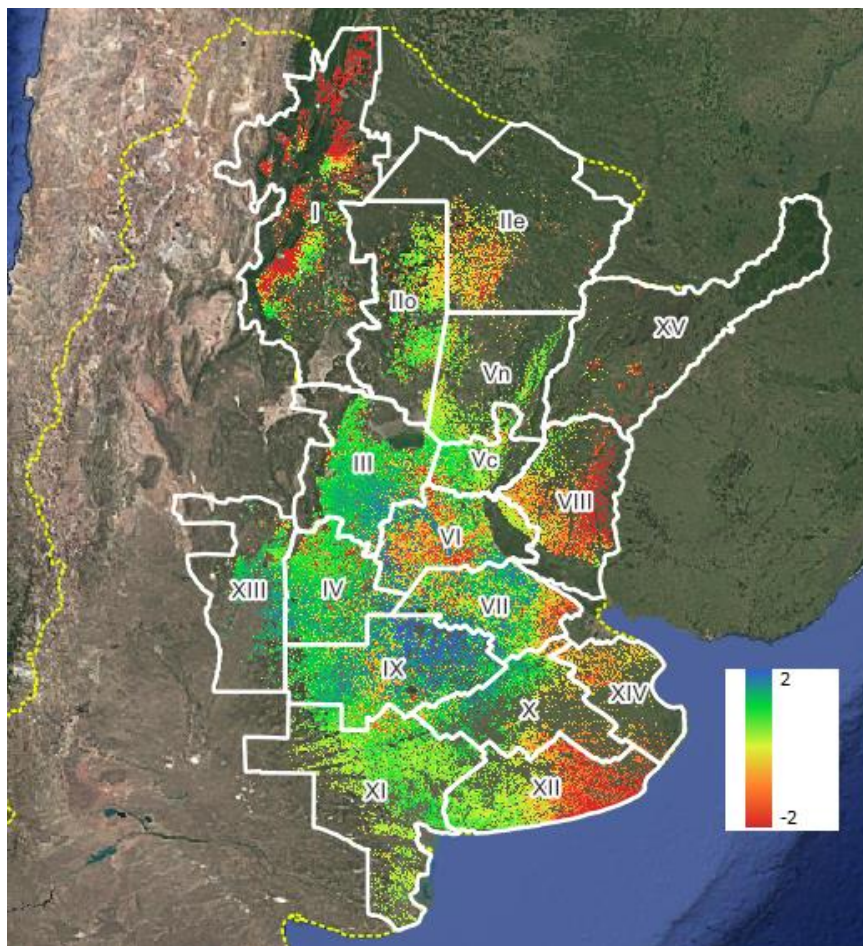


Figura 6. Diferencia entre los niveles actuales de aportes de C y los requeridos para mantener los niveles actuales de carbono orgánico en el suelo.

NIVELES DE APORTES PARA STOCKS ALCANZABLES

Para llevar los stocks actuales de COS a los niveles alcanzables calculados en la etapa 1 —es decir, aquellos que se podrían lograr si todos los productores adoptaran prácticas como las de los productores líderes, o en línea con el objetivo de incrementar el 0.3% anual— se necesitarían aportes anuales promedio de 2.90 t C/ha. Esto representa un 11% más que los niveles de aportes actuales (20% más que los niveles de mantenimiento).

Al igual que para mantener los niveles actuales de COS, las regiones con mayores demandas de carbono, como el NOA, Entre Ríos, la Zona Núcleo y el Sudeste de Buenos Aires, requerirán aportes adicionales para incrementar sus niveles de carbono en el suelo (ver Figura 7). En

términos de MS, representa en promedio generar 7.4 t MS/ha/año, y en zonas como las mencionadas, más de 11-12 t MS/ha/año (Figura 8).

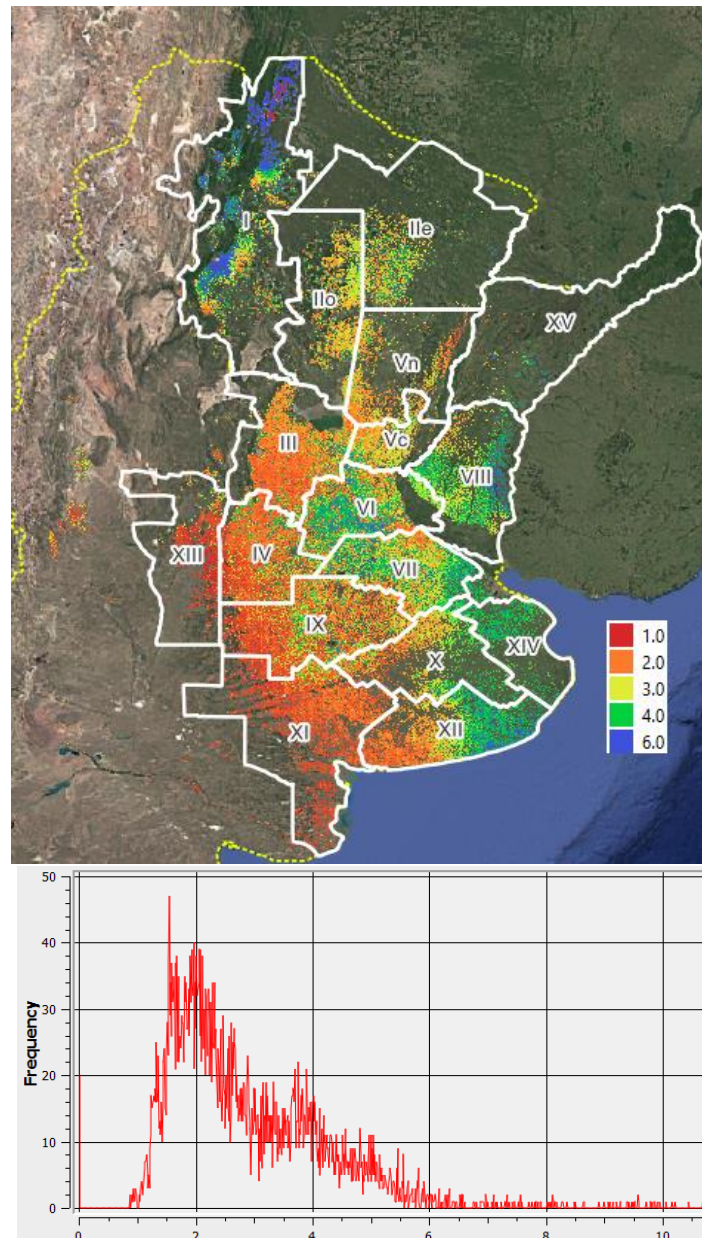


Figura 7. Arriba: Niveles de aportes de C al suelo (C inputs, en t C/ha/año), provenientes de rastrojo y raíces, necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles alcanzables por productores líderes (etapa 1). Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de aportes de C.

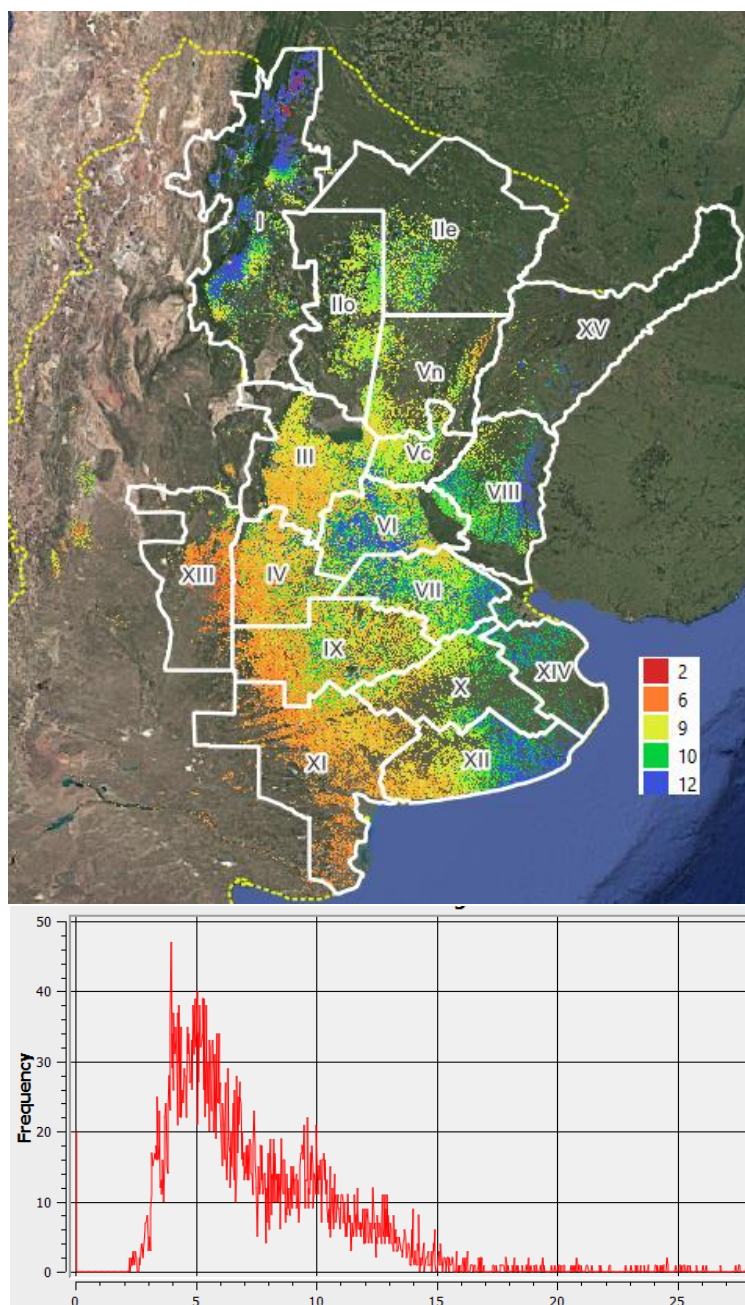


Figura 8. Arriba: Niveles aproximados de producción de Materia Seca aérea (en t MS/ha/año; grano + rastrojo) necesarios para subir los niveles actuales de carbono orgánico en el suelo hasta los niveles alcanzables (de acuerdo con las estimaciones de la etapa 1). Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de producción de materia seca aérea para lograr los niveles de aportes de C necesarios.

NIVELES DE APORTES PARA STOCKS POTENCIALES

Para llevar los stocks actuales de COS a los niveles potenciales o de saturación calculados en la etapa 1 —es decir, alcanzar la máxima capacidad de almacenaje del suelo de una región determinada— se necesitarían aportes anuales promedio de 5.2 t C/ha. Los mayores requerimientos en términos de aportes estarían en zonas de alta capacidad de almacenaje como la zona núcleo y Entre Ríos, pero también en zonas de altas tasas de mineralización como el NOA (Figura 9). En términos de MS, representa en promedio generar 13.7 t MS/ha/año (Figura 10).

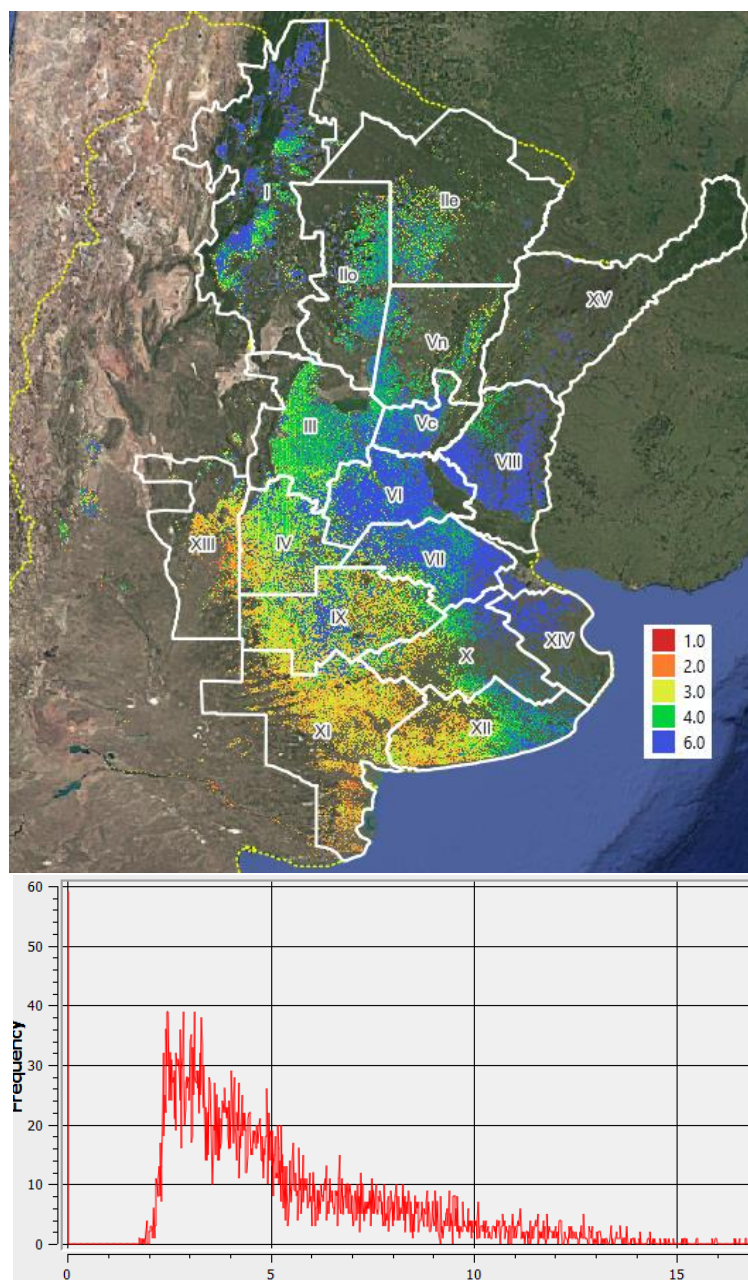


Figura 9. Arriba: Niveles de aportes de C al suelo (C inputs, en tC/ha/año), provenientes de rastrojo y raíces, necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles potenciales (etapa 1). Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales).
Abajo: histograma de distribución de frecuencias de niveles de aportes de C.

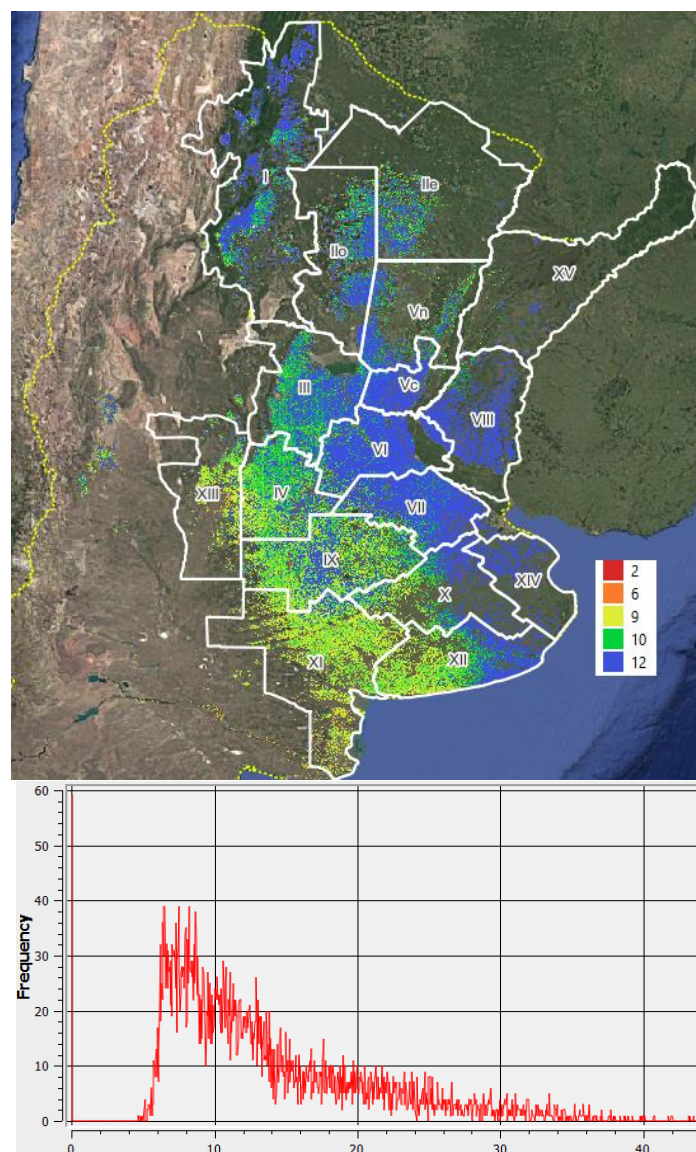


Figura 10. Arriba: Niveles aproximados de producción de Materia Seca aérea (en t MS/ha/año; grano + rastrojo) necesarios para subir los niveles actuales de carbono orgánico en el suelo hasta los niveles potenciales o de saturación (de acuerdo con las estimaciones de la etapa 1). Estimaciones a nivel de 1km x 1 km a partir de las estimaciones a nivel departamental. Se muestran los límites de las zonas RETAA (Relevamiento de Tecnología Agrícola de Bolsa de Cereales). **Abajo:** histograma de distribución de frecuencias de niveles de producción de materia seca aérea para lograr los niveles de aportes de C necesarios.

SUMA DE RESULTADOS Y PRODUCTOS GENERADOS

En promedio, las áreas agrícolas presentan aportes actuales de carbono de 2.56 t C/ha/año (Figura 11), valores muy cercanos a los requeridos para mantener los stocks de COS en su nivel actual (aportes de 2.45 t C/ha/año; aunque con variaciones regionales mencionadas previamente). Para elevar los niveles de COS a los niveles estimados como alcanzables, sería necesario aumentar los aportes de carbono a 2.9 t C/ha/año. Esto implicaría un incremento del 11% respecto a los aportes actuales. Sin embargo, para llevar los niveles de COS a su máxima capacidad de secuestro, los incrementos requieren ser considerablemente mayores. Se requerirían en promedio aportes de 5.9 t C/ha/año, lo que representaría duplicar los niveles de carbono que actualmente se están aportando al suelo en las áreas agrícolas.

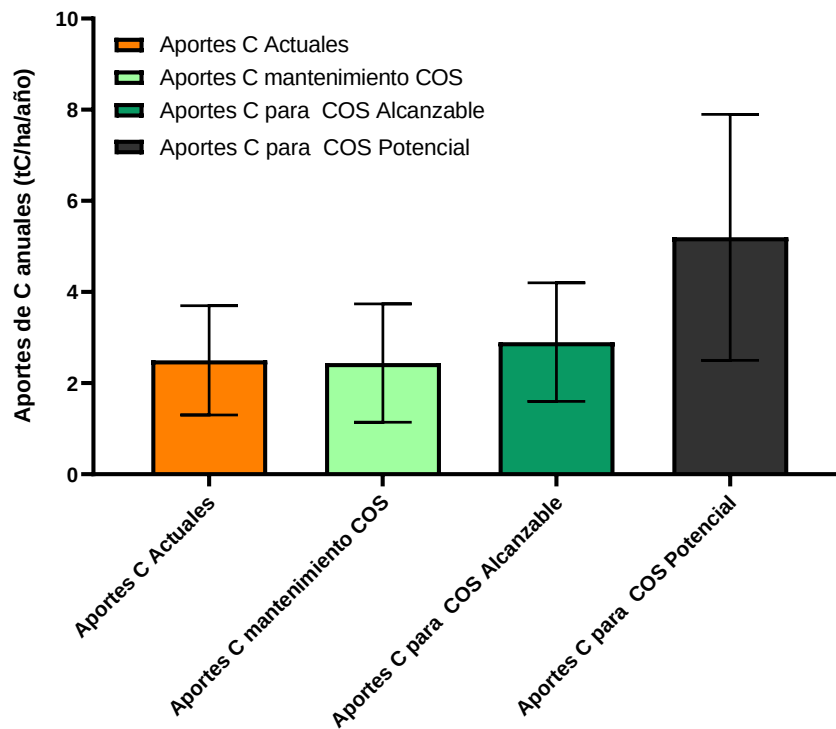


Figura 11. Niveles Promedio de aportes de C al suelo (C inputs, en t C/ha/año) actuales (a); necesarios para mantener los niveles de COS actuales (b); necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles alcanzables (c); y necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles potenciales (d), para las áreas agrícolas extensivas de Argentina.

La Figura 12 sintetiza los diferentes productos generados, ilustrando la distribución espacial de los aportes actuales de carbono y los necesarios para mantener o incrementar los niveles de carbono orgánico en el suelo (COS) en las distintas regiones productivas del país. Estos resultados permiten visualizar las áreas donde los aportes de C son suficientes para mantener los niveles de COS, así como aquellas regiones donde es necesario aumentar en mayor proporción los aportes para lograr mayores niveles de secuestro de carbono.

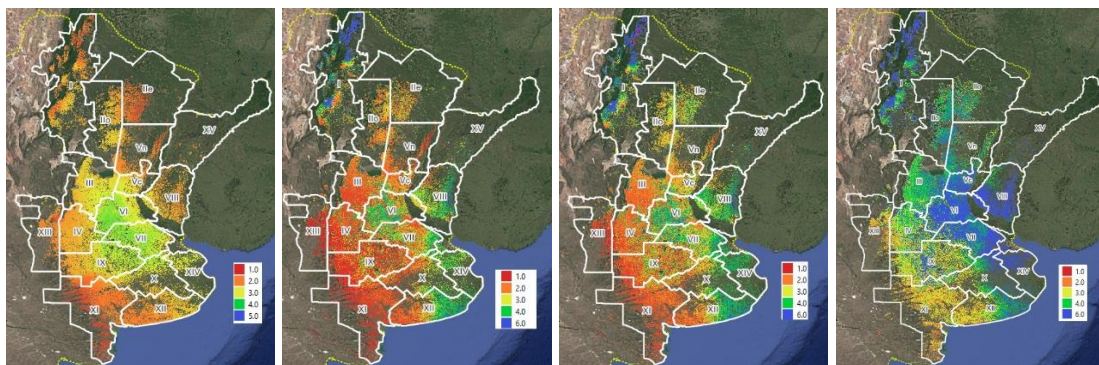


Figura 12. Distribución espacial de los Niveles de aportes de C al suelo (C inputs, en tC/ha/año) actuales (a); necesarios para mantener los niveles de COS actuales (b); necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles alcanzables (c); y necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles potenciales (d).

En términos de producción de materia seca, en promedio las áreas agrícolas están generando 6.5 t MS/ha/año (Figura 13), mientras que para mantener los stocks de COS en su nivel actual se necesitan niveles muy cercanos (6.3 t MS/ha/año; aunque nuevamente, con las variaciones regionales mencionadas previamente). Para llevar los niveles de COS a los alcanzables, sería necesario llevar los niveles de producción anual a un equivalente de 7.3 toneladas MS aérea/ha/año. Para llevar a los niveles de COS

potenciales, y generar los aportes de C necesarios, se requeriría una generación de biomasa aérea equivalente a 13.7 t MS/ha/año. La Figura 12 sintetiza los diferentes productos generados a nivel de producción de biomasa, ilustrando la distribución espacial de los niveles actuales y los necesarios para mantener o incrementar los niveles de COS en las distintas regiones productivas del país.

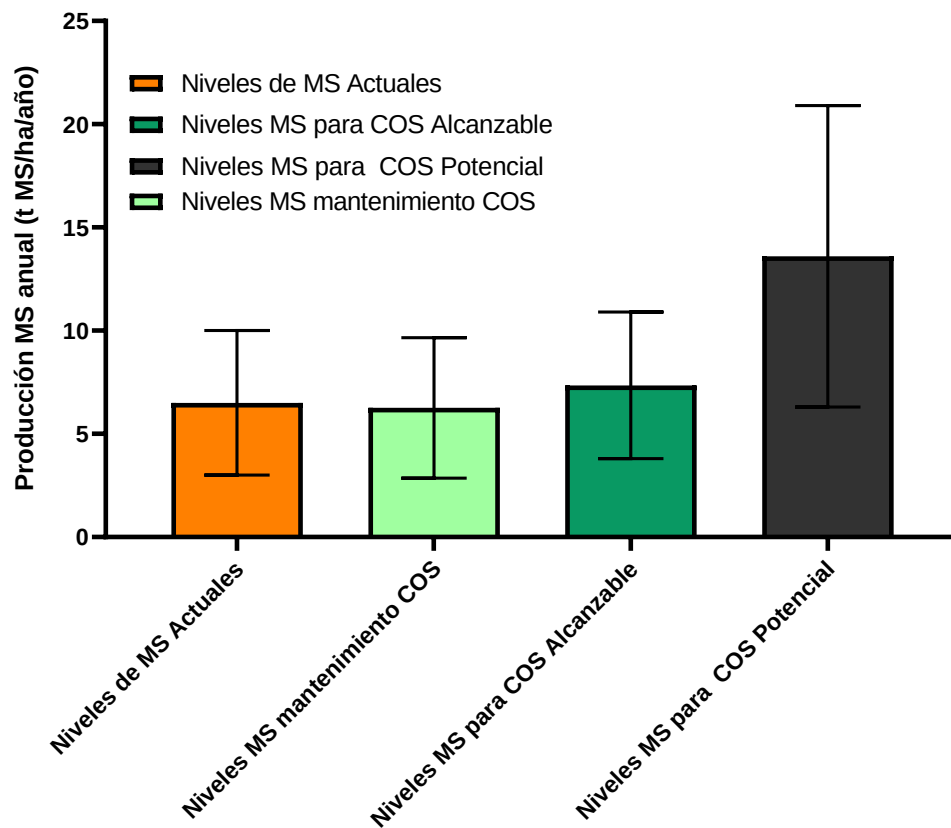


Figura 13: Niveles aproximados de producción de Materia Seca aérea (en t MS/ha/año; grano + rastrojo) actuales (a); necesarios para mantener los niveles de COS actuales (b); necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles alcanzables (c); y necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles potenciales (d).

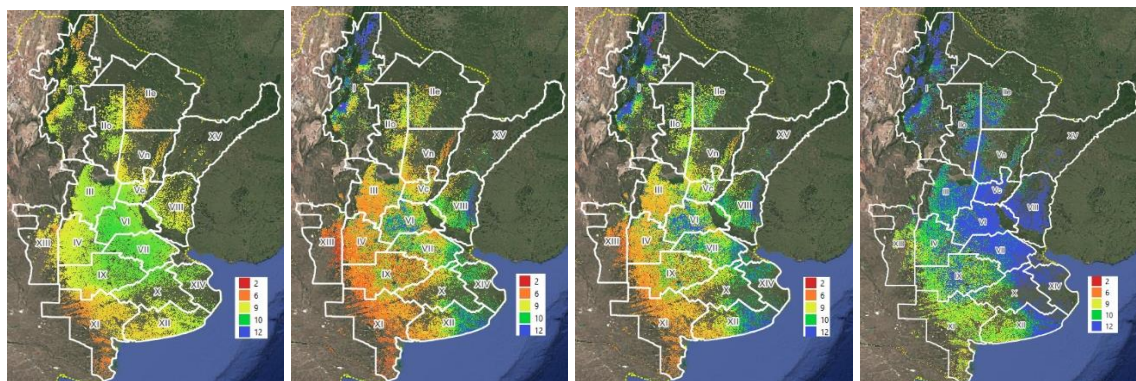


Figura 14. Distribución espacial de los Niveles producción de biomasa aérea (t MS/ha/año) actuales (a); necesarios para mantener los niveles de COS actuales (b); necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles alcanzables (c); y necesarios para llevar los niveles actuales de carbono orgánico en suelo hasta los niveles potenciales (d).

CONCLUSIONES

- Este proyecto ha identificado que los niveles actuales de aporte promedio están cerca de los necesarios para mantener los niveles de COS en los suelos. Sin embargo, también se ha señalado que, en ciertas regiones del país, los niveles actuales podrían estar por debajo de lo necesario para mantener estos stocks. Además, el cambio climático genera incertidumbre adicional que requerirá un incremento en los niveles actuales de aportes.
- Asimismo, se ha indicado que para alcanzar los objetivos de COS establecidos en la etapa 1, será necesario aumentar los aportes en un porcentaje promedio significativo (superior al 10%), y para llevar los suelos a su máxima capacidad, será necesario duplicar los niveles actuales de aportes de carbono.
- Esto indica que, si bien los suelos pueden desempeñar un papel clave en el camino hacia una producción de menor impacto ambiental, aún queda un largo camino por recorrer para lograr mayores aportes orgánicos y cerrar las brechas de carbono. Será fundamental escalar la adopción de prácticas ya implementadas y promover la adopción de otras estrategias o sistemas con mayor capacidad de secuestro de carbono, incluso en superficies puntuales (por ejemplo, sistemas mixtos y agroforestales). Además, se deberá potenciar el secuestro de carbono en tierras ganaderas y bajo otros usos.
- Aunque los mapas fueron elaborados a escala zonal, permiten generar información orientativa a nivel de lote de establecimiento y lote de producción. Los mapas permitirán a productores, técnicos y otros interesados comparar sus datos de producción de biomasa y aportes de carbono con los niveles aproximados de su zona, así como con los requeridos para aumentar los stocks de carbono. Esta información les ayudará a determinar si sus esquemas de manejo están generando aportes por encima o por debajo de los niveles medios actuales, y a conocer cuán lejos se encuentran de los niveles alcanzables y potenciales en su área. Estos resultados se incorporarán a la plataforma en línea de Brechas de C de AAPRESID, lo que permitirá a los interesados visualizar cada uno de los productos generados y comparar sus datos con los valores actuales, alcanzables y potenciales. En futuras versiones, al igual que en los mapas de stocks de COS, se podría mejorar la resolución espacial de los productos generados para acercarse aún más a una escala de lote.

REFERENCIAS

- Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., ... & Chabbi, A. (2020). Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature communications*, 11(1), 5427.
- Amundson, R., & Biardeau, L. (2018). Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(46), 11652-11656.
- Alvarez, R., & Berhongaray, G. (2021). Soil organic carbon sequestration potential of Pampean soils: comparing methods and estimation for surface and deep layers. *Soil Research*, 59(4), 346-358.
- Barré, P., Angers, D. A., Basile-Doelsch, I., Bispo, A., Cécillon, L., Chenu, C., ... & Pellerin, S. (2017). Ideas and perspectives: Can we use the soil carbon saturation deficit to quantitatively assess the soil carbon storage potential, or should we explore other strategies?. *Biogeosciences Discussions*, 1-12.
- Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & VandenBygaart, A. J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 29-42.
- Bolinder, M. A., Kätterer, T., Andrén, O., & Parent, L. E. (2012). Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(6), 821-833.
- Bossio, D. A., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., ... & Griscom, B. W. (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3(5), 391-398.
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D. A., Martin, M. P., & Walter, C. (2019). Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil and Tillage Research*, 188, 53-58.
- Chen, C., Hu, B., & Li, Y. (2021). Easy-to-use spatial random-forest-based downscaling-calibration method for producing precipitation data with high resolution and high accuracy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(11), 5667-5682.
- Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In *Evaluation of soil organic matter models: Using existing long-term datasets* (pp. 237-246). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Deng, L., Zhu, G. Y., Tang, Z. S., & Shangguan, Z. P. (2016). Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, 5, 127-138.
- FAO and ITPS. (2018). Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report. Rome. 162 pp. Available on line: <https://www.fao.org/3/I8891EN/i8891en.pdf>
- FAO and ITPS. (2021). Recarbonizing Global Soils - A technical manual of recommended sustainable soil management. Volume 3: Cropland, Grassland, Integrated systems, and farming approaches - Practices Overview. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb6595en>
- FAO. (2020). GSOCseq Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map Technical Manual. G. Peralta, L. Di Paolo, C. Omuto, K. Viatkin, I. Luotto, Y. Yigini, 1st Edition, Rome. Available online: <https://fao-gsp.github.io/GSOCseq/>
- FAO. (2022). Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – GSOCseq v.1.1. Technical report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9002en>
- Farage, P. K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E. A., Ball, A. S., & Pretty, J. N. (2007). The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil and Tillage research*, 94(2), 457-472.
- Feng, W., Plante, A. F., & Six, J. (2013). Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 112, 81-93.
- Gaitán, J.J.; Wingeyer, A.B.; Peri, P.; Moavro, E.; Peralta, G.; Fritz, F.; Berhongaray, G.; Adema, E.; Albarracin, S.; Álvarez, C.; Álvarez Cortés, D.J.; Bacigaluppo, S.; Balducci, E.; Ballón, M.; Banegas, N.; Barbaro, S.; Barral, P.; Behr, S.J.; Beider, A.M.; Bellanich, A.; Benedetto, M.V.; Boccolini, M.; Borrelli,

- L.; Buono, G.G.; Butti, L.R.; Canale, A.; Capurro, J.E.; Casasola, E.; Castro, F.E.; Cepeda, C.; Cesa, A.; Céspedes Flores, F.; Colazzo, J.C.; Chalco Vera, J.; Chaparro, S.A.; Clich, I.A.; Bustos, M.E.; Dure, J.L.; Ecclesia, P.; Eiza, M.; Enrico, J.M.; Erreguerena, J.; Fantozzi, A.; Fernandez López, C.; Ferrante, D.; Flores, J.; Gabioud, E.; Gándara, L.; Gerlero, G.D.; Giannini, A.P.; Goytía, S.Y.; Humano, G.; Irizar, A.; Iturralde, R.; Kehoe, E.; Kloster, N.; Kurtz, D.; Lara, J.; Lasagno, R.; López, A.; López Morillo, C.; Lupi, A.; Malmantile, A.; Martinefsky, M.J.; Mas, L.M.; Massara, P.V.; Mónaco, I.; Moretti, L.; Moreno, R.; Murray, F.; Oviedo, E.; Pagani, R.; Paredes, P.; Pereira, M.M.; Pinazo, M.; Dante Pueyo, J.; Radrizanni, A.; Reinaldi, J.A.; Restovich, S.; Rey Montoya, T.; Rojas, J.; Roldán, F.; Salas, D.G.; Salvagiotti, F.; Sánchez, H.; Sánchez, M.C.; Sello, E.; Sleiman, L.; Suarez, A.; Tenti, Vüegen, L.M.; Tomanek, E.; Torres, V.; Valiente, S.; Viana, A.; Villarino, S.; Vivar, M.E.; Velasco, V.; Von Wallis, A.; Wilson, M.; Wolf Celoné, U.I.; Ybarra, D.; Enriquez, A.S.; Gatica, G.; Gaute, M.; Gyenge, J.; Mansilla, N.P.; Martínez Pastur, G.; Mastrángelo, M.; Noretto, M.; Sandoval, M.; Villagra, P.; Gil, R.; Madias, A.; Accame, F.; Escobar, D.; Pascale, C.; Santillán, E.; Méndez, A.; Pérez Andrich, A.; Mercuri, P.; Sasal, M.C. (2023). Mapa de almacenamiento de C en los suelos de la República Argentina. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (Aapresid), Consorcio Regional de Experimentación Agrícola (CREA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.
- Gottschalk, P., Smith, J. U., Wattenbach, M., Bellarby, J., Stehfest, E., Arnell, N., ... & Smith, P. (2012). How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosciences*, 9(8), 3151-3171.
- Grassini, P., Torrión, J. A., Yang, H. S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K. G., & Specht, J. E. (2015). Soybean yield gaps and water productivity in the western US Corn Belt. *Field Crops Research*, 179, 150-163.
- Hoyle, Frances & Baldock, Jeffrey & Murphy, Daniel. (2011). Soil Organic Carbon – Role in Rainfed Farming Systems With Particular Reference to Australian Conditions. 10.1007/978-1-4020-9132-2_14.
- Hassink, J., Whitmore, A. P., & Kubát, J. (1997). Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *European Journal of Agronomy*, 7(1-3), 189-199.
- Hengl, T., MacMillan, R.A., (2019). **Predictive Soil Mapping with R**. OpenGeoHub foundation, Wageningen, the Netherlands, 370 pages, www.soilmapper.org, ISBN: 978-0-359-30635-0.
- Jordon, M. W., & Smith, P. (2022). Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe. *Soil and Tillage Research*, 222, 105428.
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20210084.
- Li Liu, D., Chan, K. Y., & Conyers, M. K. (2009). Simulation of soil organic carbon under different tillage and stubble management practices using the Rothamsted carbon model. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 65-73.
- Martin, M. P., Dimassi, B., Román Dobarco, M., Guenet, B., Arrouays, D., Angers, D. A., ... & Pellerin, S. (2021). Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon: A case study for France. *Global Change Biology*, 27(11), 2458-2477.
- Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., ... & Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154.
- McNally, S. R., Beare, M. H., Curtin, D., Meenken, E. D., Kelliher, F. M., Calvelo Pereira, R., ... & Baldock, J. (2017). Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand. *Global Change Biology*, 23(11), 4544-4555.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Molina, L. G., Moreno Pérez, E. D. C., & Pérez, A. B. (2017). Simulation of soil organic carbon changes in Vertisols under conservation tillage using the RothC model. *Scientia Agricola*, 74, 235-241.

- Montiel, F. S., Moreno, R., Domínguez, G. F., & Studdert, G. A. (2019). Validación de rothc para simular cambios en el carbono orgánico edáfico bajo rotaciones mixtas y siembra directa. *Ciencia del suelo*, 37(2), 281-297.
- Morais, T. G., Teixeira, R. F., & Domingos, T. (2019). Detailed global modelling of soil organic carbon in cropland, grassland and forest soils. *PloS one*, 14(9), e0222604.
- Nadeu, E., Gobin, A., Fiener, P., Van Wesemael, B., & Van Oost, K. (2015). Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at the regional scale: the role of lateral fluxes. *Global change biology*, 21(8), 3181-3192.
- Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., ... & León, R. J. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología austral*, 28(1), 40-63.
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global change biology*, 6(3), 317-327.
- Sanderman, Jonathan; Woolf, Dominic; Lehmann, Johannes; Rivard, Charlotte; Poggio, Laura; Heuvelink, Gerard; Bossio, Deborah, 2020, "Soils Revealed soil carbon futures", <https://doi.org/10.7910/DVN/HA17D3>, Harvard Dataverse, V1
- Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., ... & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56.
- Sierra, C. A., Müller, M., & Trumbore, S. E. (2012). Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 5(4), 1045-1060.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241, 155-176.
- Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., ... & Bolwig, S. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 811-922). Cambridge University Press.
- Smith, P., Smith, J. U., Franko, U., Kuka, K., Romanenkov, V. A., Shevtsova, L. K., ... & Lisovoi, N. V. (2007). Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; comparison of three models and implications for climate mitigation. *Regional Environmental Change*, 7, 105-119.
- Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86, 19-31.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... & Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Studdert, GA; MG Monterubbianesi & GF Domínguez. 2011. Use of RothC to simulate changes of organic carbon stock in the arable layer of a Mollisol of the southeastern Pampas under continuous cropping. *Soil Tillage Res.*117:191-200
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- Van Oort, P. A. J., Saito, K., Dieng, I., Grassini, P., Cassman, K. G., & Van Ittersum, M. K. (2017). Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritisation?. *Global Food Security*, 12, 109-118.
- Villarino, S. H., Studdert, G. A., Lateral, P., & Cendoya, M. G. (2014). Agricultural impact on soil organic carbon content: Testing the IPCC carbon accounting method for evaluations at county scale. *Agriculture, ecosystems & environment*, 185, 118-132.
- Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., ... & Kögel-Knabner, I. (2014). Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Global change biology*, 20(2), 653-665.

Wollenberg, E., Richards, M., Smith, P., Havlík, P., Obersteiner, M., Tubiello, F. N., ... & Campbell, B. M. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2 C target. *Global change biology*, 22(12), 3859-3864.