

Trabajo científico – Física, Química y Físico-química de los suelos

MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA REGIÓN CHACO-PAMPEANA Y SU ESTIMACIÓN MEDIANTE REFLECTANCIA DIFUSA EN EL RANGO VISIBLE

Patricia Lilia Fernández^{1,2*} , Filipe Behrends Kraemer^{1,2} ,
Mario Guillermo Castiglioni¹

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina).

RESUMEN

La materia orgánica del suelo (MO) es el atributo más utilizado como indicador de su salud, ya que afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas. Tradicionalmente, su determinación se realiza mediante combustión húmeda o seca. En el presente trabajo se exploró su estimación a partir de una metodología rápida, económica, no destructiva y precisa, como la espectroscopia de reflectancia difusa en el rango visible (VIS) (350-750 nm). Se midió MO por combustión húmeda, al mismo tiempo que se determinó la reflectancia difusa de muestras obtenidas de diferentes sitios: 187 de suelos correspondientes a Santiago del Estero (SE) (San José de Boquerón-SJB, n=79; Añatuya-A, n=108) y 409 del sur de Santa Fe (SF). La MO determinada por combustión húmeda presentó en SJB un rango de 0,75-6,13 %, en A este fue de 1,70-2,41%, mientras que en SF fue 1,04-9,27%; con un ordenamiento por uso de la tierra: agrícola-ganadero (AGR-GAN) (2,96%) > ganadero (GAN) (2,67%) > agrícola (AGR) (2,43%). Para el análisis quimiométrico se utilizó el programa PARLES. El comportamiento de los modelos (observados vs estimados), mostró que dos factores de manipulación de datos fueron significativos: transformación y diferenciación. En SE los resultados se analizaron en conjunto (SJB+A), obteniendo una ecuación de estimación con un coeficiente de determinación de 0,12. SF presentó un ajuste de 0,41. El análisis de las dos zonas en conjunto tuvieron un ajuste por segmento. En valores menores a 5,03% el ajuste se situó sobre la línea 1:1, mientras que existió una subestimación en valores mayores. Considerando el uso de la tierra, la ganadería presentó mejores ajustes sobre la línea 1:1 ($R^2=0,84$). Los resultados dan cuenta de las diferencias de carbono en diferentes áreas y usos, mientras que la estimación de la MO, a partir de una metodología sencilla como la reflectancia difusa en el espectro VIS, es promisoría. No obstante, es necesario explorar la robustez de esta metodología en un mayor número situaciones y regiones.

Palabras clave: combustión húmeda, PARLES, ganadería, agricultura, sistemas mixtos.

ESTIMATION OF ORGANIC MATTER CONTENT IN SOILS FROM THE CHACO-PAMPEAN REGION THROUGH DIFFUSE REFLECTANCE IN THE VISIBLE RANGE

ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) is the most widely used indicator of soil health, as it influences the physical, chemical, and biological properties of the soil. Traditionally, SOM is determined through wet or dry combus-

* Autor de contacto:
fpl@agro.uba.ar

Recibido:
19-05-25

Recibido con revisiones:
05-09-25

Aceptado:
05-09-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

tion. In this work, a rapid, economical, non-destructive, and precise methodology for estimating SOM, such as diffuse reflectance spectroscopy in the visible range (VIS) (350-750 nm) was evaluated. A total of 187 soil samples from Santiago del Estero (SE) [San José de Boquerón (SJB), $n=79$; Añatuya (A), $n=108$] and 409 samples from southern Santa Fe (SF) were taken to determine SOM by wet combustion and by diffuse reflectance spectroscopy. SOM determined by wet combustion ranged from 0.75 to 6.13% in SJB, from 1.70 to 2.41% in A, and from 1.04 to 9.27% in SF. Variation in SOM was also observed when comparing land uses: mixed farming system (AGR-GAN) (2.96%) > livestock system (GAN) (2.67%) > agriculture (AGR) (2.43%). Additionally, the PARLES software was used for chemometric analysis. Models behavior (observed vs. estimated data) showed that transformation and differentiation were significant manipulation factors. In SE, the results were pooled (SJB+A) and an estimation equation was obtained with a determination coefficient of 0.12. A segmental fit of 0.41 was found in SF, following the 1:1 line at values below 5.03%, while there was an underestimation at higher values. Considering land use, livestock system showed better fits on the 1:1 line ($R^2=0.84$). The results account for the differences in carbon content across different sites and different land uses. Although organic matter estimation based on a simple methodology such as diffuse reflectance in the VIS spectrum appears to be promising, it is necessary to explore the robustness of this methodology throughout other management conditions and regions.

Keywords: wet combustion, PARLES, livestock, agriculture, mixed farming systems.

INTRODUCCIÓN

El uso conservacionista y racional de los recursos naturales define gran parte de la sustentabilidad del planeta. El mantenimiento de un adecuado funcionamiento de los sistemas naturales es de vital importancia para asegurar una continua provisión de bienes y servicios ecosistémicos, que permitan el desarrollo de las actividades humanas y de la vida en general (Balvanera y Cotler, 2007). Un apropiado manejo del suelo en los sistemas agropecuarios, cumple un rol fundamental para el continuo suministro de servicios ecosistémicos, como es el abastecimiento de alimentos, el control de inundaciones, la captura y almacenamiento de carbono, entre otros (Pereira et al., 2018).

La materia orgánica del suelo (MO) desempeña un papel fundamental en la salud y la productividad de los suelos en los agroecosistemas (Lal, 2016). Este componente orgánico influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas, como la fertilidad, la retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico, la actividad microbiana y la estabilidad de los agregados, entre otros (Six et al., 2000). Un componente tan relevante requiere de su gestión y monitoreo para mantener o mejorar la calidad del suelo. Por tal motivo, existen proyectos internacionales como el Environmental Monitoring of Arid and Semiarid Regions (MARAS) (Oliva et al., 2020), la Food Agricultural Organization (FAO) en la Alianza por los Suelos de América Latina y el Caribe (ASLAC), con diversos resultados en términos de publicaciones y mapas (i.e. GSOCmaps v1.6 2022) (<https://www.fao.org/global-soil-partnership/regional-partnerships/america-latina-y-el-caribe/>). Del mismo modo, existen monitoreos y mapeos a nivel nacional realizados a distintas escalas espaciales y temporales, desde agencias nacionales como el INTA, la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca, universidades y organismos privados (Gaitán et al., 2023), como también desde el Observatorio Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación (ONDTyD) (www.desertificacion.gob.ar).

En suelos arenosos (con menos del 15% de arcilla) y francos (con contenido de arcilla entre 15 y 35%), la influencia de la MO es muy alta para la formación de la estructura y su estabilidad, mientras que la contribución que representan los mecanismos abióticos (e.g. expansión-contracción) para la agregación son reducidos (Oades, 1993; Taboada et al., 2004). En este contexto, la MO favorece la agregación de las partículas, actúa como un agente de unión favoreciendo la formación de agregados, estabilizando los mismos ante la acción de fuerzas externas (e.g. impacto de la gota de lluvia), al mismo tiempo que reduce la densidad aparente del suelo y su resistencia a la penetración, aumenta la retención y disponibilidad hídrica y su capacidad de aireación (Martínez et al., 2008).

En la Argentina, particularmente en la región chaco-pampeana, los suelos poseen un alto porcentaje de limo (Álvarez y Lavado, 1998; Behrends Kraemer, 2015), que puede llegar al 90% (INTA, 2002). Por lo tanto, un manejo sustentable de estos suelos implica que la MO se mantenga o aumente en el tiempo, haciendo necesario su monitoreo con la suficiente precisión para poder captar los cambios ocurridos. La determinación de este parámetro, según el enfoque tradicional como la oxidación húmeda (Walkley y Black, 1934) de laboratorio, es laboriosa y costosa (Nanni y Dematté, 2006). Por ello, las técnicas espectrométricas que emplean la reflectancia difusa han emergido como herramientas prometedoras para su predicción (Dema-

tté y da Silva Terra, 2014; Vasques et al., 2014). La espectroscopia es rápida, oportuna, menos costosa, no destructiva, directa, y no requiere de un procesamiento previo, costoso y/o prolongado de las muestras, ni del uso de extractores químicos perjudiciales para el ambiente (Viscarra Rossel et al., 2016; Soriano-Disla et al., 2013). Todas estas características la tornan una buena alternativa para mejorar o reemplazar los métodos convencionales de análisis de suelo, ya que supera algunas de sus limitaciones.

La espectroscopía de reflectancia difusa es utilizada desde mediados del siglo XX, para la identificación de algunos minerales y compuestos. Sudduth y Hummel (1991) evaluaron la utilidad del infrarrojo cercano (NIR) y el visible (VIS), para inferir propiedades edáficas, principalmente MO, continuando posteriormente con el desarrollo de esta tecnología para la medición de otras propiedades edáficas. Ben-Dor y Banin (1994) determinaron por este medio las concentraciones de carbonatos, óxidos de hierro y aluminio en el rango visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) (400 – 1100 nm). Hill y Schütt (2000) utilizaron una función polinómica para caracterizar el contenido de MO en el rango de 400 y 1600 nm. Nanni y Dematté (2006) demostraron que la información espectral se puede utilizar para la clasificación de los suelos, dado que estos presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus perfiles espectrales (Bastidas-Obando y Carbonell, 2010).

Estos antecedentes resaltan a esta metodología como valiosa como fuente de información de las propiedades edáficas. En condiciones controladas, las firmas espectrales son la respuesta a cambios de vibración en los diferentes grupos de átomos que forman las moléculas y los cristales. La luz que el instrumento emite penetra en el cuerpo, donde se absorbe de manera selectiva y dependiente de los grupos moleculares involucrados (Alomar y Fuchslocher, 1998). La obtención de la información espectral se debe a la energía reflejada por la muestra como resultado de la interacción de la luz emitida por el instrumento sobre los constituyentes del suelo. Esta energía resulta principalmente de la interacción del contenido de MO, de la humedad del suelo, de los tipos y cantidades de minerales y de la textura (Van der Meer, 1999). Así, los cambios de luz que se detectan mediante un sensor, son relacionados con la composición de las muestras (Bonett Jimenez, 2013). Esta técnica permite la generación de firmas espectrales, las cuales sirven para conocer algunos de los constituyentes fundamentales del suelo, gracias a la absorción de ciertas longitudes de onda, y con ello es posible construir grandes librerías espectrales para caracterizar a los suelos (Viscarra Rossel et al., 2016).

En los últimos años, creció el interés mundial por la obtención de dichas librerías, con la finalidad de poder predecir ciertas propiedades del suelo. Estudios como el de Viscarra Rossel et al. (2016) presentan librerías de gran magnitud debido a la contribución de firmas espectrales de 92 países de diferentes continentes. En este sentido, Argentina contribuyó con apenas 77 firmas espectrales. Una de las desventajas de los modelos globales obtenidos a partir de la espectroscopía VIS-NIRS es la pérdida de exactitud cuando se intentan hacer predicciones en escalas locales (Miloš et al., 2022; Chang et al., 2005). En cambio, los modelos desarrollados con muestras sitio-específicas, donde la variabilidad edáfica es más reducida, tienden a ser más exactos en la predicción de las propiedades de suelo. Un ejemplo de ello es el trabajo de Ortiz et al. (2024), donde se amplía el número de firmas espectrales de Argentina con 154 lecturas de diferentes suelos, en el cual se incluyen distintos órdenes (Inceptisoles, Molisoles, Entisoles y Vertisoles).

Por todo lo mencionado, el presente trabajo tiene por objetivos: (i) analizar los contenidos de materia orgánica del suelo en situaciones edafoclimáticas diferentes y bajo distintos usos; (ii) interpretar los modelos de estimación de la materia orgánica a partir del uso de la reflectancia difusa en el espectro VIS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

Las muestras que se utilizaron para este trabajo fueron tomadas de tres sitios, dos de los cuales se ubican en Santiago del Estero (SE) (Añatuya - A y, San José de Boquerón - SJB) y, el otro en Santa Fe (SF) en la cuenca del río Ludueña cuya ciudad de referencia es Zavalla. En la Figura 1 se detalla su ubicación, mientras que algunas características edafoclimáticas de dichos lugares se presentan en la Tabla 1. La distribución por tamaño de partículas, para la obtención de la textura de los suelos para la capa 0-20 cm, se determinó por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1936). Los suelos de ambas regiones presentan más del 40% de limos y las arenas corresponden en su mayoría a arenas muy finas (50-100 μm), que tienen un comportamiento similar al de los limos en cuanto a su relación con la erodabilidad del suelo y a la necesidad de estabilizar las estructuras formadas mediante la MO (Wishmeier y Smith, 1978).

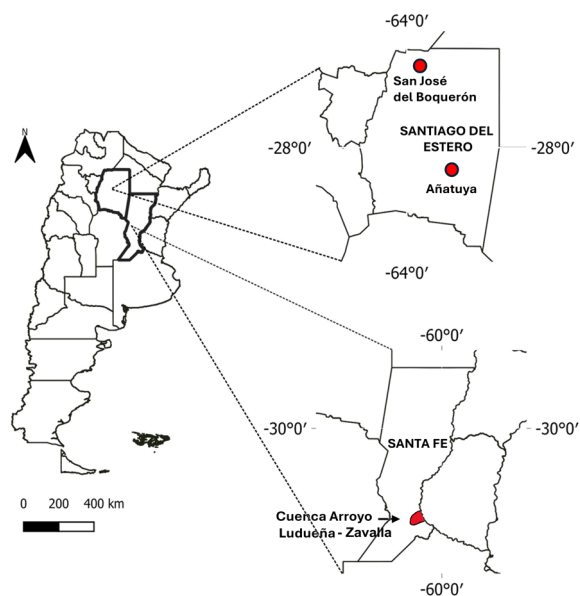


Figura 1. Mapa con la ubicación de los sitios donde se realizaron los ensayos utilizados en este trabajo.

Figure 1. Map showing the location of the sampling sites used in this study.

Tabla 1. Información climática y edáfica de los sitios utilizados en el trabajo. Valores que aparecen entre paréntesis indican el error estándar.

Table 1. Climate and soil information for the test sites used in this study. Values in parentheses indicate the standard error.

	Santiago del Estero		Santa Fe
	Añatuya	San José de Boquerón	Zavalla
Temperatura media anual	20°C	21°C	17°C
Temperatura máxima	35°C	35°C	35°C
Temperatura mínima	7°C	9°C	6°C
Precipitaciones	680 mm	600 mm	960 mm
Arcilla (%)	20,7 (1,1)	38,2 (2,3)	51,9 (1,8)
Limo (%)	45,7 (0,5)	54,1 (2,8)	42,7 (1,4)
Arena (%)	33,3 (1,3)	7,7 (1,7)	2,2 (0,1)
Textura	Franca	Franco arcillo limosa	Arcillo limosa
Taxonomía Suelos (Staff, 1998)	Haplustoles énticos	Haplustoles énticos	Argiudoles típicos, Argiudoles vérticos y Natracualfes típicos

Los sistemas productivos que se seleccionaron para la realización del presente trabajo son representativos de los existentes en cada uno de los sitios evaluados, tomándose las muestras de suelo de los primeros 20 cm en lotes de productores. En San José de Boquerón (SE) el uso de la tierra es la ganadería extensiva en el monte (GAN) (Andisco, 2023). En Añatuya (SE), el uso de la tierra también responde a una ganadería extensiva (GAN), realizada en tres establecimientos que presentan diferentes niveles de degradación (arbustal, monte bajo y monte alto) (García Buscarini, 2023). En SF los muestreos se realizaron sobre tres usos de la tierra diferentes: 1- agricultura (maíz o soja) bajo siembra directa, con pasada ocasional de disco por la compactación superficial (AGR); 2- sistemas mixtos, con pasturas consociadas (AGR-GAN); 3- ganadería en pastizal natural (GAN) (Fernández, 2019; Manzo, 2019).

Determinación de MO y obtención de la firma espectral

Para la obtención de MO se determinó el carbono oxidable por el método de Walkley y Black (1934), mediante la oxidación húmeda de la muestra de suelo con dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Luego, los valores de carbono orgánico fueron transformados a MO de acuerdo con el factor de Van Bemmelen.

Para la determinación de las firmas espectrales por reflectancia difusa se mortereó el suelo (\sim 200 μ m, mortero de ágata) para eliminar el efecto de la micro-rugosidad y granulometría (Soriano-Disla et al., 2013), realizando duplicados de esta técnica por cada una de las muestras tomadas. Previo a cada lectura las muestras fueron secadas 24 hs a 40 °C para evitar errores debido al contenido de humedad de las muestras. La lectura dentro del espectro visible (VIS – 380-750 nm) se realizó mediante un espectrómetro AvaSpec-ULS, con un instrumento equipado con una esfera integradora (reflectancia difusa). El orden de medición de las muestras fue completamente aleatorio dentro de cada región de origen del material. Previamente a la adquisición de las curvas se calibró el equipo mediante la determinación de un estándar de color blanco puro en forma de pastilla providenciado por el mismo proveedor del equipo. En este sentido se aseguró cuidadosamente que dicha pastilla no esté expuesta al polvo. La frecuencia de barrido de las muestras fue de 5 nm.

Para el análisis de las curvas se utilizó el software quimiométrico PARLES v3.1 (Viscarra Rossel, 2008). El programa facilita la implementación de una gran cantidad de técnicas de preprocesamiento, así como los paquetes asociados al PLSR, que puede mejorar la robustez y la precisión de los modelos. El comportamiento de los modelos estimados se realizó mediante la evaluación de dos factores de manipulación de datos: transformación de datos (sin transformar y con los datos transformados en absorbancia: R to Log; 1/R) y tres de diferenciación de datos (sin diferenciar, primera y segunda derivada). Además, todos los espectros fueron centrados mediante la opción del PARLES “mean center”. Los modelos estadísticos y estrategias aplicadas para el análisis quimiométrico de las muestras están incluidas con mayor detalle en Viscarra Rossel et al. (2016).

A partir de cada una de las combinaciones entre transformación y diferenciación, se materializaron los 15 componentes principales y luego se procedió a realizar la validación cruzada PLSR, analizando cuáles eran los números de factores que minimizaban la raíz del error cuadrático medio (RSME). Este es el índice más utilizado para la validación de modelos de sistemas físicos (Hyndman y Koehler, 2006). Su resultado se expresa en las unidades de la variable medida, que en este caso es MO, y pondera los pronósticos que están más alejados del valor.

Luego, a partir de la combinación de factores de manipulación de datos que minimizaron el RSME, se calculó la relación entre la MO observada y la estimada, obteniendo una ecuación para cada regresión. La decisión de tomar el menor valor de RSME está asociado con el menor AIC (criterio de información Akaike), ya que cuanto menor es su valor mejor es el modelo de predicción, estando el mismo a su vez relacionado con un mayor R^2 . Por ende, al elegir este número de factores que disminuyen el RSME, se maximiza la relación entre los resultados observados y los predichos. De esa manera se pudo definir con un mayor grado de confianza, la zona de la curva de reflectancia con mayor capacidad de predecir la MO. Además, se realizó un análisis descriptivo de los parámetros para las áreas evaluadas, los sistemas productivos bajo estudio y para el total de las muestras. Finalmente, se relacionó el R^2 ajustado y el RMSE con el número de muestras tomadas en cada situación y con la amplitud del rango de resultados de MO.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de MO encontrados en este trabajo mostraron medias relativamente similares entre regiones, a pesar de sus diferencias en clima y suelo (Tabla 2), como también entre los distintos usos de la tierra

analizados (AGR, AGR-GAN, GAN). No obstante, los suelos de SE (A y SJB) presentaron un valor de MO promedio de 13,75 % inferior al de SF (Tabla 2). Esto puede ser explicado por las distintas características biofísicas y climáticas de los ambientes en los que se desarrollaron los suelos de cada región (Tabla 1). Los suelos de SE son menos evolucionados (secuencia de horizontes: A-AC-C), coincidiendo con un régimen de precipitación menor respecto a SF (lluvia media anual: 640 mm y 960 mm, respectivamente), mientras que la mayor temperatura media anual en SE (20,5°C) promueve una mineralización más acentuada respecto a SF (temperatura media anual: 17°C) (Álvarez y Lavado, 1998) (Tabla 1). Esta combinación en SE resulta en una menor productividad y un limitado aporte al suelo de materia seca (Adámoli et al., 1990; Abril et al., 1993; Abril y Bucher, 1999), estableciendo un límite a la incorporación y secuestro de carbono (Elbasiouny et al., 2022; Rodrigues et al., 2023) (Tabla 1). En cambio, en SF los valores medios de MO fueron más altos y similares a los reportados en la literatura (~2,71% de MO, Banegas et al., 2019) (Tabla 2).

La MO está controlada por las características edafoclimáticas pero también por el uso de la tierra. Es así que los manejos que incluyeron ganadería (GAN), mostraron promedios más altos y un rango de valores más amplio para esta propiedad. En este sentido, existen numerosos antecedentes que indican que los sistemas que incluyen a la ganadería presentan mayores contenidos de MO y superiores fluctuaciones para esta propiedad en el tiempo (Studdert et al., 1997; García-Prehác et al., 2004), lo que probablemente dé como resultado una mayor heterogeneidad. Aunque la heterogeneidad pudo ser debido a que la GAN analizada aquí se realiza en dos regiones.

Tabla 2. Análisis descriptivo de la materia orgánica del suelo según el área geográfica [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)] y el uso de la tierra [Agricultura (AGR); Agrícola Ganadero (AGR-GAN); Ganadería (GAN)] y todas las muestras juntas (TOTAL). D.E.: Desvío estándar; E.E.: Error estándar; C.V.: Coeficiente de variación.

Table 2. Descriptive parameters of soil organic matter content by geographic area [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)], and land-use [Agriculture (AGR); mixed farming system (AGR-GAN); livestock system (GAN)] and total values (TOTAL) all samples pooled. D.E.: Standard Deviation; E.E.: Standard error; C.V.: Coefficient of Variation.

	n	Media	D.E.	E.E.	C.V.	Mín.	Máx.	Rango
AGR	283	2,43	0,85	0,05	34,98	1,04	6,84	5,8
AGR-GAN	101	2,96	1,41	0,14	47,59	1,25	9,27	8,02
GAN	212	2,67	1,34	0,11	50,23	0,75	7,77	7,02
SF	409	2,69	1,21	0,06	44,8	1,04	9,27	8,23
SE	187	2,32	0,86	0,07	37,19	0,75	6,13	5,38
TOTAL	596	2,6	1,14	0,05	43,93	0,75	9,27	8,52

En la Tabla 2 se detallan los valores promedio de MO de los diferentes sistemas productivos. Se observó que los más bajos mostraron desvíos, coeficientes de variación y rangos inferiores, respecto a aquellos con valores superiores para este parámetro. Por otra parte, de acuerdo con el manejo del suelo, el contenido de esta propiedad se ordenó de la siguiente manera: AGR-GAN>GAN>AGR (Tabla 2). El promedio mayor en AGR-GAN puede relacionarse con el impacto benéfico de la actividad ganadera extensiva en términos de conservación del carbono orgánico, por la continua presencia de raíces en las pasturas, promoviendo la actividad biológica y aumentando la cantidad y calidad de los agentes de agregación y estabilización del suelo (Fernández et al., 2011).

En el caso de las situaciones bajo agricultura en siembra directa evaluadas en este trabajo, no todas cumplieron con las premisas de la agricultura conservacionista: presencia permanente de cobertura, diversificación de cultivos y la no remoción del suelo. Estas a menudo no son alcanzadas dadas las características actuales de la producción agrícola en la zona núcleo: 1) tendencia a la monocultura de soja, con bajo aporte de materia seca y baja relación C/N; 2) secuencias de cultivos simplificadas, con ausencia de cultivos invernales en muchas campañas (Bedano y Domínguez, 2016; Pinto et al., 2017; Behrends Kraemer et al.,

2021), alta homogeneidad en la estructura radical, en los compuestos orgánicos generados y en la actividad microbiana (Yang y Crowley, 2000), resultando en un bajo secuestro de carbono (Six et al., 2000); 3) uso creciente de implementos mecánicos (disco y/o cincel) para eliminar estratos densificados o estructuras laminares y para el control de malezas no afectadas por los herbicidas. Esta alteración en la continuidad del sistema siembra directa afecta no sólo a los hábitats microbianos y a la fauna en general, sino que también al destruir los agregados del suelo aumenta la superficie reactiva del mismo y la mineralización y pérdida de la MO (Kabiri et al., 2016). En este trabajo, la disminución relativa de la MO en AGR con respecto a GAN fue del 9% (Tabla 2). Este resultado coincide con lo reportado en diversos trabajos tanto locales como internacionales (Fernández et al., 2011; García-Prechác et al., 2004). Berhongaray et al. (2013) mencionaron que, en los primeros 50 cm de suelos de la región Pampeana bajo agricultura, se observó una caída promedio del carbono orgánico del 16 %. En la región del Chaco Semiárido, luego de la deforestación y bajo agricultura continua, se comprobó una caída del 30% del carbono orgánico en los primeros 30 cm de suelos franco-franco limosos (46% de limos) (Villarino et al., 2017).

La estimación de MO, a partir de las determinaciones espectroscópicas de reflectancia difusa en el rango visible (VIS), fue muy variable según su agrupamiento por área de estudio o por uso de la tierra (Tabla 3). El coeficiente de determinación (R^2) presentó un rango de 0,12 a 0,84 (SE y GAN, respectivamente), mientras que el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) tuvo disminuciones menores al 5% respecto al R^2 (Tabla 3). Por otro lado, la mejor combinación entre transformación de datos y diferenciación se dio con combinaciones sin transformar y sin diferenciar para AGR, GAN y SE (Tabla 3). Por su parte, los únicos agrupamientos de los sitios que mejoraron su performance predictiva al transformar el set de datos (transformación a R), fueron aquellos que poseían una mayor amplitud en el rango de MO y cuya heterogeneidad en cuanto al uso de la tierra fue mayor (SF y TODOS), encontrándose presentes usos productivos contrastantes (AGR y GAN).

Tabla 3. Selección de resultados obtenidos del PARLES (R^2 , R^2 ajustado y RMSE) para las simulaciones con distinta transformación y factor de diferenciación según el área geográfica [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)] y el uso de la tierra [Agricultura (AGR); Agrícola Ganadero (AGR-GAN); Ganadería (GAN)] y todas las muestras juntas (TOTAL).

Table 3. Selection of the results obtained by PARLES (R^2 , R^2 adjusted and RMSE) for the simulations using different transformation and differentiation criteria based on geographic area [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)], and land-use [Agriculture (AGR); mixed farming system (AGR-GAN); livestock system (GAN)] and total values (TOTAL) all samples pooled.

	R^2	R^2 ajustado	RMSE	Transformación	Factor de diferenciación
AGR	0,40	0,40	0,66	No tranf.	Sin diferenciación
AGR-GAN	0,15	0,14	0,14	R	Sin diferenciación
GAN	0,84	0,84	0,63	No tranf.	Sin diferenciación
SF	0,41	0,41	0,93	R	Sin diferenciación
SE	0,12	0,12	0,86	No tranf.	Sin diferenciación
TOTAL	0,34	0,34	0,93	R	Sin diferenciación

En la literatura, también se menciona que la predicción de MO por espectroscopía de reflectancia difusa dentro del rango VIS-NIR presenta una alta variabilidad, encontrándose valores de R^2 de 0,65 a 0,86 (Daniel et al., 2004; Shibusawa, 2001). A su vez, se ha observado que, en general, esta estimación muestra un mayor grado de ajuste cuando se utiliza NIR o MIR (Ben-Dor y Banin, 1994; Masserschmidt et al., 1999). En este sentido, se debe aclarar que existe un fuerte compromiso entre los bajos costos de los equipamientos de VIS respecto de los NIR y MIR y su capacidad de predicción de MO. Estos últimos equipos examinan otras regiones del rango electromagnético y, por ejemplo, pueden discernir entre distintas labilidades de MO al poder separar los compuestos alifáticos de los aromáticos, entre otros (Ludwig et al., 2008; Peltre et al., 2014; Behrends Kraemer et al., 2023; de Lima et al., 2024). A esto debe añadirse que la estimación del carbono orgánico es sitio-dependiente, ya que los materiales originales, la melanización del material y los

efectos de otros procesos formadores del suelo, interfieren en la precisión y exactitud de la predicción efectuada (Stoner y Baumgardner, 1981; Ben-Dor y Banin, 1994; Azzali et al., 2011). Por ejemplo, en determinaciones del contenido de otros elementos como el cromo, el cual posee una señal espectrométrica muy clara, pueden producirse interferencias con el contenido de distintos tipos de hierro (O'Rourke et al., 2016; Li et al., 2021; Behrends Kraemer et al., 2023), mientras que la presencia de diferentes calidades de carbono o de carbono disperso por efecto del sodio, pueden ser fuentes de variabilidad que disminuyen la potencia del modelo para inferir el contenido de MO. La alta proporción de carbono orgánico particulado en SE (Andisco, 2023), pueden explicar los resultados, en donde el material mineral tiene una menor melanización y se encuentra bajo uso estrictamente ganadero, pudiendo subestimar la MO en los modelos (Tabla 2, Figura 2b).

En este trabajo, la mayoría de los usos de la tierra y áreas de muestreo y, sus combinaciones presentaron modelos estimativos de MO con un comportamiento similar entre sí (Figura 2). En SF el ajuste fue bueno ($R^2=0,41$), y cuya relación con la línea 1:1 fue buena a bajos contenidos de MO, pero se produjo una subestimación a elevados valores de MO (Figura 2a). El ajuste de SE fue baja ($R^2=0,12$) y no siguió la línea 1:1 (Figura 2b). Cuando se analizan TODOS (Figura 2g) la estimación se asoció con la línea 1:1 (de ajuste absoluto). Mediante la utilización de regresiones lineales segmentadas fue que se halló para TODOS que el rango de eficacia fue 0 - 5,03 % ($P<0,01$) de MO (Figura 2h). Para el resto de las combinaciones, no fue posible establecer un rango que cuente con validez estadística. La bibliografía presentó respuestas de estimación diferentes. Utilizando 232 suelos de China, el R^2 mejoró la predicción de la MO, cuando se analizó la respuesta con el mismo material parental (Xu et al., 2016). Sin embargo, Ortiz et al. (2024) con 154 muestras en 4 suelos contrastantes de Argentina, utilizando reflectancia difusa VIS-NIR, obtuvieron una calibración y validación con una clasificación de muy bueno (máxima desviación predictiva residual > 3).

En el uso de la tierra bajo GAN y GAN-SF, además de presentar un alto R^2 , mostró en todo su rango de estimación en torno a la línea 1:1 (Figura 2c, e). La estimación de la MO en GAN del área de SF fue alta a partir de los espectros en el rango VIS (Figura 2e). Si bien esta área incluye consociaciones y complejos con diferentes procesos pedogenéticos que puede modificar las variables colorimétricas como el matiz (HUE) e intensidad de grises (CHROMA), fue la luminosidad (VALUE) la que determinó la buena performance de este modelo (Fernández, 2019). La microtopografía presentes en esta área pudo ser la responsable de los patrones de acumulación de MO y de este modo el VIS recogió estas diferencias de la luminosidad (VALUE).

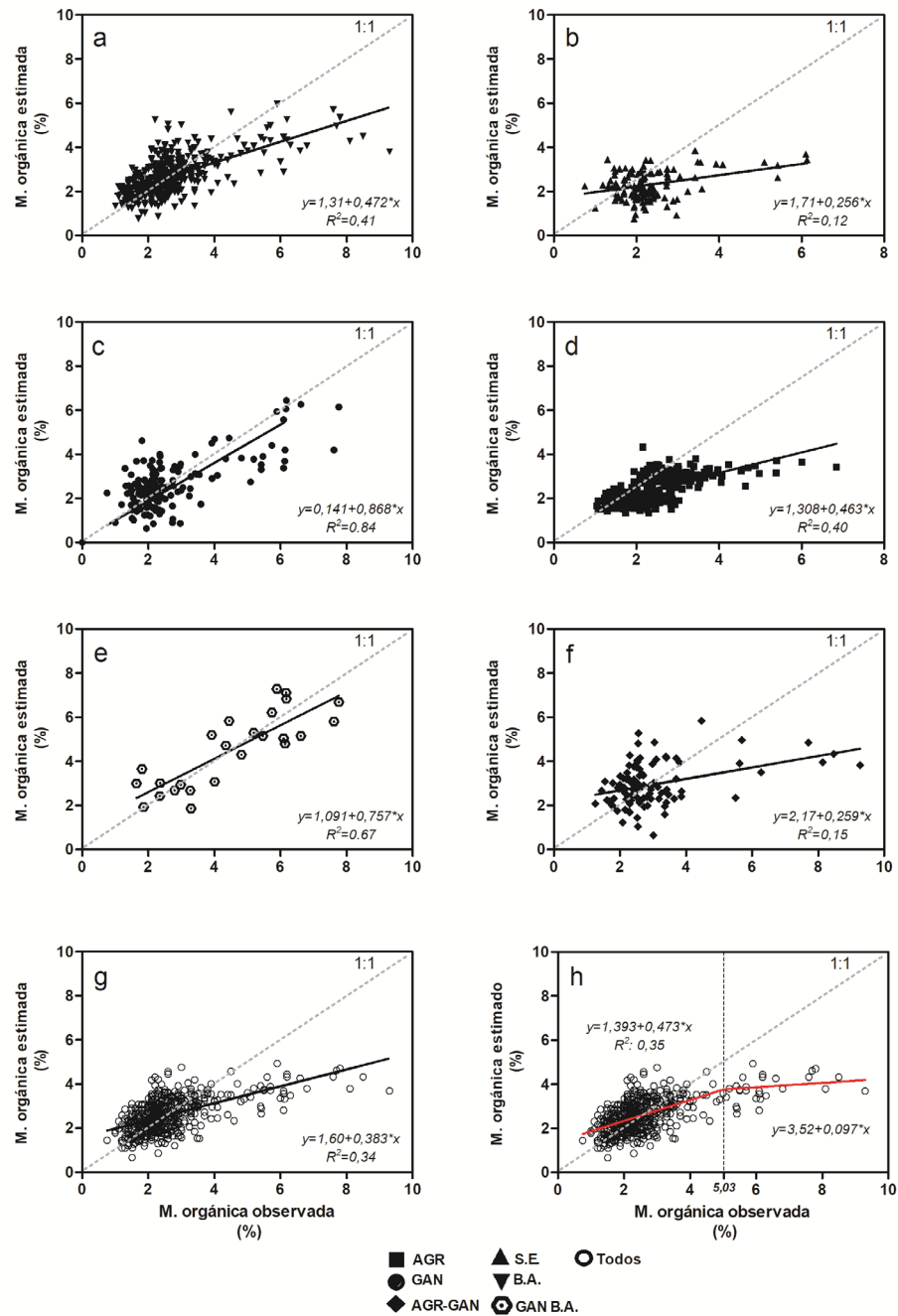


Figura 2. Materia orgánica predicha y observada obtenida a partir del software PARLES según el área geográfica (a: Santa Fe, b: Santiago del Estero), el uso agropecuario (c: Ganadería; d: Agricultura; f: Agrícola Ganadero), la combinación de ganadería en Santa Fe (e) y todas las muestras juntas (g) y con análisis segmentado (h). Se presenta la ecuación del modelo y el R².

Figure 2. Predicted and observed organic matter content obtained from PARLES software based on geographic area (a: Santa Fe, b: Santiago del Estero), land use (c: livestock; d: agriculture; f: mixed-farming), the combination of livestock systems in Santa Fe (e), and all samples pooled (g) and with segmented analysis (h). Both model equation and R² are presented.

En cuanto a las distintas variables que pueden explicar el comportamiento de los niveles de estimación mediante VIS se encuentra el rango de la variable utilizada y el número de muestras analizadas (Figura 3). Según lo mencionado en la bibliografía, en general el aumento del R² y la disminución de la RSME están

asociados a un número de muestras creciente (Kuang y Mouazen, 2012; Zaarour y Melachrinoudis, 2019). En este trabajo, el efecto del número de muestras en el R^2 ajustado fue inestable, tanto al considerar un bajo número de muestras (GAN-SF) como cuando se consideró el máximo de muestras (TODOS) (Figura 3a). Si se excluyen los valores de estos dos casos mencionados, el comportamiento de la relación número de muestras- R^2 ajustado respondió de acuerdo con lo esperado (Figura 3a). En cuanto al RMSE tuvo un comportamiento inversamente proporcional en relación con el número de muestras pero no significativo (Figura 3c). Por otro lado, el coeficiente de determinación presentó una relación directamente proporcional con la amplitud del rango de MO cuando se excluyó a TODOS, SF y AGR-GAN (Figura 3b), mientras que la RMSE mostró una relación inversamente proporcional con la amplitud del rango de MO al excluir SF y TODOS (Figura 3d). La racionalidad de la exclusión de estas combinaciones ya fue explicada anteriormente y se fundamenta en los distintos procesos de edafización (Azam et al., 2020), contenidos diferenciales de carbono orgánico particulado (Haddix et al., 2020), contenidos de carbono variables en el tiempo y debido a la heterogeneidad de suelos (Álvarez y Lavado, 1998; Fernández et al., 2011). Por todo esto, en este trabajo se observa que la estimación de MO a partir de la espectroscopía de reflectancia difusa en el rango VIS, no tuvo una buena performance cuando se consideraron en forma conjunta suelos y usos de la tierra heterogéneos. Por ello se hipotetiza que suelos con diferencias en cuanto a sus procesos de edafización deben ser analizados separadamente para poder producir estimaciones de la materia orgánica con mayor precisión. En este sentido, por lo menos por lo que se desprende de este trabajo, lo ideal sería contar con un número de muestras para la calibración de los modelos de alrededor de 400 (Figura 3a) y un rango nominal de al menos 2% de MO.

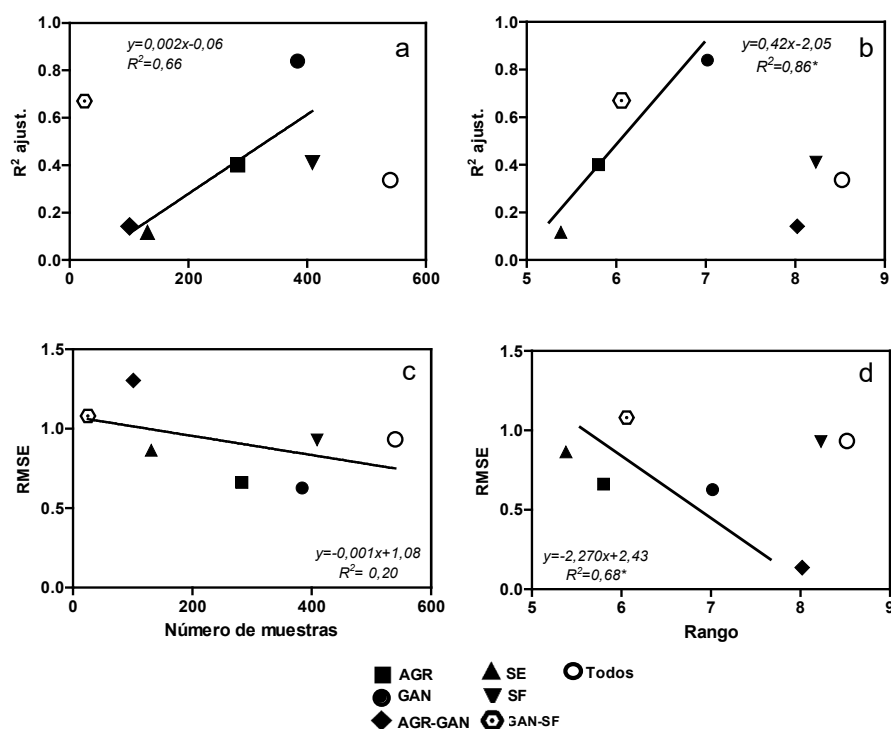


Figura 3. Relación entre el número de muestras y el R^2 ajustado (a) y RSME (c) y el rango y el R^2 ajustado (b) y RSME (c) según el área geográfica [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)] y el uso de la tierra [Agricultura (AGR); Agrícola Ganadero (AGR-GAN); Ganadería (GAN)] y todas las muestras juntas (Todos). (*) La ecuación del modelo y el R^2 presentan cuando son significativos $P < 0,1$.

Figure 3. Relationship between the number of samples and R^2 adjusted (a) and RSME (c) and range and R^2 adjusted (b) and RSME (c) according to geographic area [Santiago del Estero (SE); Santa Fe (SF)], and land-use [Agriculture (AGR); mixed farming system (AGR-GAN); livestock system (GAN)] and total values (TOTAL) all samples pooled. (*) Model equation and R^2 are presented when statistically significant $P < 0,1$.

CONCLUSIONES

Santiago del Estero presentó un promedio de MO menor (2,32 %) respecto de Santa Fe (2,69 %) atribuido a las características edafoclimáticas de cada una de las zonas.

Los sistemas mixtos (agrícolas-ganaderos) presentaron los valores más altos de MO debido a la inclusión de períodos de pasturas, y los más bajos correspondieron con la agricultura debido a la ausencia de prácticas conservacionistas.

La estimación de MO mediante el uso de la espectroscopía de reflectancia difusa en el rango visible (VIS) en las dos áreas bajo estudio (sin considerar el tipo de uso) presentó un rango en el coeficiente de determinación de 0,12 a 0,84, siendo menor la capacidad estimativa en Santiago del Estero y las mayores las ganaderas.

Si bien el incremento en la amplitud del rango de MO considerado y el número de muestras mejoraron el comportamiento estimativo de esta propiedad, al combinar los efectos de ambas áreas y de los usos de la tierra, disminuyó el R² y aumentó el RMSE.

Los resultados hallados en este trabajo indican que la estimación de MO a partir de la espectrometría de reflectancia difusa en el rango VIS está muy condicionada por el sitio y manejo analizado.

REFERENCIAS

- Abril, A., Acosta, M., Bachmeier, O., y Rollan, A. (1993). Efecto de la cobertura vegetal sobre la actividad biológica de un suelo del Chaco Árido. *Revista argentina de microbiología*, 25, 15-26.
- Abril, A., y Bucher, E. H. (1999). The effects of overgrazing on soil microbial community and fertility in the Chaco dry savannas of Argentina. *Applied Soil Ecology*, 12(2), 159-167. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00162-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00162-0)
- Adámoli, J., Sennhauser, E., Acero, J. M. y Rescia, A. (1990). Stress and disturbance: vegetation dynamics in the dry Chaco region of Argentina. *Journal of biogeography*, 17(4-5), 491-500. <https://doi.org/10.2307/2845381>
- AgriNova Science. 2023. La utopía del 5% de la materia orgánica. España. Consultado el 18 de diciembre de 2023 de: <https://agri-nova.com/noticias/la-utopia-del-5-de-la-materia-organica/>
- Alomar, D. y Fuchslocher, R. (1998). Fundamentos de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes. *Agro sur*, 26(1), 88-104. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1998.v26n1-11>
- Álvarez, C. R., Torres Duggan, M., Chamorro, E. R., y Taboada, M. A. (2009). Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del suelo*, 27(2), 159-169.
- Álvarez, R. (2005). Carbon stocks in Pampean soils: a simple regression model for estimation of carbon storage under nondegraded scenarios. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(11-12), 1583-1589. <https://doi.org/10.1081/CSS-200059082>
- Álvarez, R. y Lavado, R. S. (1998). Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83(1-2), 127-141. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00141-9)
- Andisco, A. D. (2023). *Sistemas de producción campesino-indígena en el noroeste de la Provincia de Santiago del Estero: impacto de las prácticas de manejo sobre el contenido de materia orgánica del suelo y su estimación mediante reflectancia difusa* [Tesis de grado. Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/ti/document/2023andiscoagustinadaniela>
- Angueira, C., Cruzate, G., Zamora, E. M., Olmedo, G. F., Sayago, J. M., y Castillejo González, I. (2016). Soil mapping based on landscape classification in the semiarid Chaco, Argentina. En: J. A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco y H. F. Del Valle (Eds) *Geopedology* (pp. 285-303). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19159-1_17
- Azam, A., Akhtar, M. S., Rukh, S., Mehmood, A., Imran, M., Khan, A., Qayyum, A., Ahmad, W. y Gurmani, A. R. (2020). Changes in soil organic carbon fractions across a loess toposequence. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1193-1202. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00204-2>
- Azzali, E., Carbone, C., Marescotti, P., y Lucchetti, G. (2011). Relationships between soil colour and mineralogical composition: application for the study of waste-rock dumps in abandoned mines. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 188(1), 75. <http://dx.doi.org/10.1127/0077-7757/2011/0195>
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica*, 84-85, 8-15.
- Bastidas-Obando, E., y Carbonell, J. A. (2010). Caracterización espectral y mineralógica de los suelos del valle del río Cauca por espectroscopía visible e infrarroja (400-2.500 nm). *Agronomía Colombiana*, 28(2), 291-301.
- Bedano, J. C., y Domínguez, A. (2016). Large-scale agricultural management and soil meso-and macrofauna conservation in the Argentine Pampas. *Sustainability*, 8(7), 653. <https://doi.org/10.3390/su8070653>
- Behrends Kraemer, F. (2015). *Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con*

- distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa* [Thesis doctoral. Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2015behrendskraemerfilipe.pdf>
- Behrends Kraemer, F., Morrás, H. J. M., y Castiglioni, M. G. (2018). Evaluación micromorfométrica de la porosidad de un Argiudol típico bajo siembra directa con dos intensidades de uso bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 36(1): 138-156.
- Behrends Kraemer, F., Morrás, H., Fernández, P. L., Duval, M., Galantini, J., Garibaldi, L. (2021). Influence of edaphic and management factors on soils aggregates stability under no-tillage in Mollisols and Vertisols of the Pampa Region, Argentina. *Soil and Tillage Research*, 209, 10490. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104901>
- Behrends Kraemer, F., y Sabatté, L. (2023). Degradación de las tierras con énfasis en la región pampeana argentina. En: F. Behrends Kraemer, C. I. Chagas, M. Castiglioni y M. Massobrio (Eds.), *Manejo y conservación de suelos, con énfasis en la región pampeana: Aportes para una gestión racional del uso agropecuario de sus tierras* (pp. 1-35). Editorial Facultad de Agronomía.
- Behrends Kraemer, F., Thoisy, J., Plessis, C., Fernández, P., Petraud, J. P. y Chenu, C. (29 y 30 de noviembre y 1 de diciembre 2023). *Evaluación de la calidad de suelos mediante espectroscopia del infrarrojo medio (DRIFT) en suelos bajo manejos alternativos* [Presentación de trabajo]. III Congreso Argentino de Agroecología. El Bolsón, Río Negro, Argentina.
- Ben-Dor, E., y Banin, A. (1994). Visible and near-infrared (0.4–1.1 μm) analysis of arid and semiarid soils. *Remote Sensing of Environment*, 48(3), 261-274. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90001-9)
- Bonett Jiménez, J. P. (2013). *Uso de la espectroscopia de reflectancia difusa (MIR) para la determinación de las propiedades químicas en suelos agrícolas de Colombia* [Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/items/df70eb24-098f-46f1-a953-21cf47cf11aa>
- Bouyoucos, G. J. (1936). Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. *Soil Science*, 42(3), 225-230.
- Chang, C. W., Laird, D. A., y Hurburgh Jr, C. R. (2005). Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties. *Soil Science*, 170(4), 244-255. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000162289.40879.7b>
- Daniel, K. W., Tripathi, N. K., Honda, K., y Apisit, E. (2004). Analysis of VNIR (400–1100 nm) spectral signatures for estimation of soil organic matter in tropical soils of Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3), 643-652. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139944>
- de Lima, B. C., dos Santos, C. H., Tiritan, C. S., Demattê, J. A., Gomez, A. M., Albarracín, H. S., y Bartsch, B. A. (2024). Analysis of organic and mineral nitrogen, total organic carbon and humic fractions in Ferralsols: an approach using Vis-NIR-SWIR, MIR and X-ray fluorescence spectroscopy. *Discover Environment*, 2(1), 79. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00097-3>
- Demattê, J. A., y da Silva Terra, F. (2014). Spectral pedology: a new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. *Geoderma*, 217, 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.012>
- Facio, F. (2022). *Efecto del pastoreo con descansos estivales sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo en diferentes tipos de cobertura del Chaco semiárido de Santiago del Estero*. [Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2022faciofacundo.pdf>
- Fernández, D. A. (2019). *Predicción del carbono orgánico en suelos agrícolas ganaderos en la Provincia de Santa Fe a partir del uso de la espectroscopia de reflectancia difusa: estimación de parámetros de color Munsell* [Tesis de Grado]. Universidad de Buenos Aires.
- Fernández, P. L., Alvarez, C. R., y Taboada, M. A. (2011). Assessment of topsoil properties in integrated crop–livestock and continuous cropping systems under zero tillage. *Soil Research*, 49(2), 143-151. <https://doi.org/10.1071/SR10086>
- Franzluebbers, A. J., y Arshad, M. A. (1997). Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1382-1386. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100050014x>
- Gaitan, J. J., Wingeyer, A. B., Peri, P. L., Moavro, E. A., Peralta, G., Fritz, F. G., Berhongaray, G., Adema, E. O., Albarracín Franco, S. y Alvarez Cortes, D. J. (2023). *Mapa de almacenamiento de carbono en los suelos de la República Argentina*. INTA Ediciones.
- García Buscarini, L. (2023). *Reflectancia difusa como método para estimar el carbono orgánico del suelo en el sudeste de la provincia de Santiago del Estero*. [Tesis de Grado. Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/ti/document/2023garciabuscariniluisina>
- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G., y Terra, J. A. (2004). Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.002>
- Gentile, R. M., Martino, D. L., y Entz, M. H. (2005). Influence of perennial forages on subsoil organic carbon in a long-term rotation study in Uruguay. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1-2), 419-423. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.002>
- Haddix, M. L., Gregorich, E. G., Helgason, B. L., Janzen, H., Ellert, B. H., y Cotrufo, M. F. (2020). Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 363, 114160. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>
- Hill, J., y Schütt, B. (2000). Mapping complex patterns of erosion and stability in dry Mediterranean ecosystems. *Remote sensing of environment*, 74(3), 557-569. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00146-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00146-2)
- Hyndman, R. J., y Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International journal of forecasting*, 22(4), 679-688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>
- INTA (1975). *Carta de suelos: Carcarañá, Andino, Cañada de Gomez-Rosario, Casilda, Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos*.

Ediciones INTA.

INTA. (2009). *Cartas de Suelos de la República Argentina – Provincia de Buenos*. Ediciones INTA.

- Kabiri, V., Raiesi, F., y Ghazavi, M. A. (2016). Tillage effects on soil microbial biomass, SOM mineralization and enzyme activity in a semi-arid Calcixerepts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.022>
- Kuang, B., y Mouazen, A. M. (2012). Influence of the number of samples on prediction error of visible and near infrared spectroscopy of selected soil properties at the farm scale. *European Journal of Soil Science*, 63(3), 421-429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01456.x>
- Lal, R. (2000). Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, 165(3), 191-207. <https://doi.org/10.1097/00010694-200003000-00002>
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and energy security*, 5(4), 212-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Li, F., Xu, L., You, T., y Lu, A. (2021). Measurement of potentially toxic elements in the soil through NIR, MIR, and XRF spectral data fusion. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106257>
- Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K. y Flessa, H. (2008). Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(3), 384-391. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700022>
- Manzo, I. E. (2019). *Predicción del carbono orgánico en suelos agrícolas y ganaderos de la Provincia de Santa Fe a partir del uso de la espectroscopía de reflectancia difusa : análisis quimiométrico mediante el Programa Parles*. [Tesis de Grado. Universidad de Buenos Aires]. SIUBDU. <https://cosehador.siu.edu.ar/bdu/Record/B-22-48047>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., Silva, P., Valle, S. y Acevedo, E. (2008). Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.001>
- Masserschmidt, I., Cuelbas, C. J., Poppi, R. J., De Andrade, J. C., De Abreu, C. A. y Davanzo, C. U. (1999). Determination of organic matter in soils by FTIR/diffuse reflectance and multivariate calibration. *Journal of Chemometrics*, 13(3-4), 265-273. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199905/08\)13:3/4<265::AID-CEM552>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199905/08)13:3/4<265::AID-CEM552>3.0.CO;2-E)
- Miloš, B., Bensa, A. y Japundžić-Palenkić, B. (2022). Evaluation of Vis-NIR preprocessing combined with PLS regression for estimation soil organic carbon, cation exchange capacity and clay from eastern Croatia. *Geoderma Regional*, 30, e00558. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00558>
- Mouazen, A. M., Karoui, R., Deckers, J., De Baerdemaeker, J. y Ramon, H. (2007). Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. *Biosystems Engineering*, 97(2), 131-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.023>
- Nanni, M. R. y Demattê, J. A. M. (2006). Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 393-407. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0285>
- Oades, J. M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 53, 377-400. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90123-3)
- Oliva, G., Dos Santos, E., Sofía, O., Umaña, F., Massara, V., García Martínez, G., Caruso, C., Cariac, G., Echevarría, D., Fantozzi, A. y Butti, L. (2020). The MARAS dataset, vegetation and soil characteristics of dryland rangelands across Patagonia. *Scientific Data*, 7(1), 327. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00658-0>
- O'Rourke, S. M., Minasny, B., Holden, N. M. y McBratney, A. B. (2016). Synergistic use of Vis-NIR, MIR, and XRF spectroscopy for the determination of soil geochemistry. *Soil Science Society of America Journal*, 80(4), 888-899. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.10.0361>
- Ortiz, D., de Dios Herrero, J. M. y Kloster, N. (2024). Uso de la espectroscopia visible e infrarrojo cercano para estimar propiedades de suelo en Argentina. *Ciencia del Suelo*, 42(1), 1-13.
- Peltre, C., Bruun, S., Du, C., Thomsen, I. K. y Jensen, L. S. (2014). Assessing soil constituents and labile soil organic carbon by mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 77, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.022>
- Peña Zubiato, C. A. y Salazar Lea Plaza, J. C. (1982). Carta de suelos de los departamentos de Belgrano y General Taboada, provincia Santiago del Estero. En: E. Tonelli (Ed.), *Informe de diez años de labor* (pp. 78-179). INTA Santiago del Estero.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M. y Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Pinto, P., Long, M. E. F. y Piñeiro, G. (2017). Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.028>
- Sasal, M. C., Andriulo, A. E. y Taboada, M. A. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.025>
- Shibusawa, S. (2001). Soil mapping using the real-time soil spectrophotometer. *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture* (pp. 485-490). AgroMontpellier.
- Siri-Prieto, G. y Ernst, O. (2009). Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage*

- Research*, 105(2), 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.08.001>
- Six, J. A. E. T., Elliott, E. T. y Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099-2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Sudduth, K. A. y Hummel, J. W. (1991). Evaluation of reflectance methods for soil organic matter sensing. *Transactions of the ASAE*, 34(4), 1900-1909. <https://doi.org/10.13031/2013.31816>
- Soriano-Disla, J. M., Janik, L., McLaughlin, M. J., Forrester, S., Kirby, J., Reimann, C., y EuroGeoSurveys GEMAS Project Team. (2013). The use of diffuse reflectance mid-infrared spectroscopy for the prediction of the concentration of chemical elements estimated by X-ray fluorescence in agricultural and grazing European soils. *Applied geochemistry*, 29, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.11.005>
- Stoner, E. R. y Baumgardner, M. F. (1981). Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1161-1165. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060031x>
- Studdert, G. A., Echeverría, H. E. y Casanovas, E. M. (1997). Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typical Argiudoll. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1466-1472. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100050026x>
- Taboada, M. A., Barbosa, O. A., Rodríguez, M. B. y Cosentino, D. J. (2004). Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*, 123(3-4), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.009>
- van der Meer, F. (1999). Can we map swelling clays with remote sensing? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1(1), 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(99\)85025-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(99)85025-9)
- Vasques, G. M., Demattê, J. A. M., Rossel, R. A. V., Ramírez-López, L. y Terra, F. S. (2014). Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. *Geoderma*, 223, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019>
- Villarino, S. H., Studdert, G. A., Baldassini, P., Cendoya, M. G., Ciuffoli, L., Mastrángelo, M., y Piñeiro, G. (2017). Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. *Science of the Total Environment*, 575, 1056-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.175>
- Viscarra Rosell RA (2008). ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.006>
- Viscarra Rossel, R., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V. Aichi, H., B.G. Barthès I, Bartholomeus, H. M., Bayer, A. D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C. W., Chappell, A., Fouad, Y., ... y Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*, 155, 198-230. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012>
- Walkley, A. y Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office.
- Yang, C. H. y Crowley, D. E. (2000). Rhizosphere microbial community structure in relation to root location and plant iron nutritional status. *Applied and environmental microbiology*, 66(1), 345-351. <https://doi.org/10.11114/jets.v7i12.4492>
- Xu, S., Shi, X., Wang, M. y Zhao, Y. (2016). Effects of subsetting by parent materials on prediction of soil organic matter content in a hilly area using Vis-NIR spectroscopy. *PLoS One*, 11(3), e0151536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151536>
- Zaarour, N. y Melachrinoudis, E. (2019). What's in a coefficient? The "Not so Simple" Interpretation of R², for Relatively Small Sample Sizes. *Journal of Education and Training Studies*, 7(12). <https://doi.org/10.11114/jets.v7i12.4492>