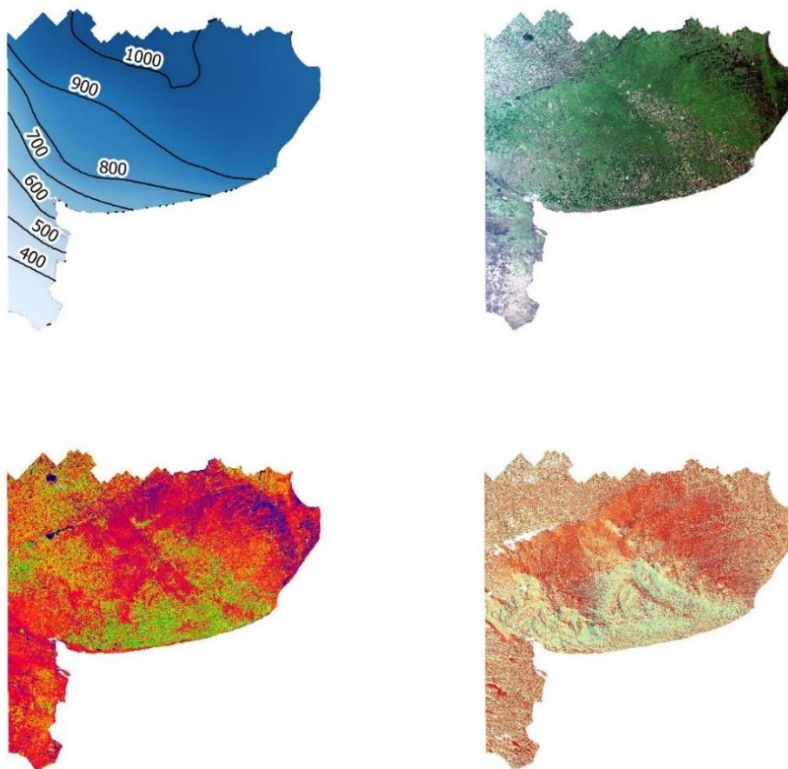




## ***“MAPA DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS 0-30) DEL CENTRO SUR DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES”***



Trabajo de Intensificación del Ciclo profesional de la carrera Ingeniería  
Agronómica

Autora: Laura Lujan Vallejos Bubicz

Docente tutor: Dr. Oscar Abel Bravo

Docentes consejeros: Ing. Agr. (Mg.) Franco Frolla

Dr. Alejandro Presotto

Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur

Noviembre 2021



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Sur y al Departamento de Agronomía, a todo el plantel docente y no docente, por formarme como agrónoma y como persona, incentivarme a dar lo mejor de mí y superarme. Por la oportunidad de estudiar idiomas y darme la oportunidad de cursar un semestre en Toulouse, Francia. A l'École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse por recibirme como estudiante de intercambio, especialmente a Zulma Vitezica por su ayuda y orientación.

A mi tutor de tesis, Oscar Bravo, por haberme ayudado a dar los primeros pasos en la teledetección, por su paciencia, disposición y apoyo. Por estar siempre dispuesto a formarme, ayudarme a desarrollarme profesionalmente y darme herramientas y oportunidades.

A mis consejeros Franco Frolla y Alejandro Presotto, por colaborar en este trabajo, por sus consejos y asesoramiento.

A mi familia, en especial a mis papás, que me apoyaron todos estos años.

A mis amigos de la carrera, por hacer las cursadas y el estudio más liviano, y darme una mano cuando lo necesité. A mis amigas de la vida, por su amistad y apoyo, especialmente a Mecha y Rochi por ayudarme en este trabajo.

A Gabriela Minoldo, con quien trabajé como tutora alumna, por su predisposición a ayudarme y aconsejarme durante toda mi carrera.

A Cecilia Pellegrini, por el apoyo y orientación que me dio en mi intercambio, y por estar presente cuando quedé varada por el Covid-19. Por confiar en mí como *buddy* de estudiantes extranjeros.

A las Cátedras de Morfología Vegetal y Agrometeorología, donde me desempeñé como Ayudante B.

A Cesar Mussini por dejarme realizar los trabajos prácticos en su campo.

***¡Muchas gracias!***

## RESUMEN

El carbono orgánico del suelo (COS) es un parámetro fundamental dado que afecta a un gran número de las propiedades edáficas físicas, químicas y biológicas. Representa casi el 70% del carbono orgánico de la biosfera y juega un papel importante en el calentamiento global, pudiendo cumplir tanto el rol de sumidero como de fuente de liberación de gases de efecto invernadero (GEI). Es necesario entender la variabilidad espacial del COS para preservar la sustentabilidad del ambiente. El objetivo del presente trabajo es generar un mapa regional de la distribución de COS para el centro y sur de la provincia de Buenos Aires, a partir de técnicas de interpolación aplicada a datos de carbono medidos a campo. El área de estudio abarca 20 10<sup>6</sup> ha de la Provincia de Buenos Aires, con marcada variabilidad de clima, suelos y sistemas de producción. Se generó una base digital de datos edáficos que abarca 501 pedones geo-posicionados, pertenecientes al SiSINTA (347 perfiles) y a la base de datos Génesis DA-UNS (154). En cada perfil se calculó el almacenamiento de COS en Mg ha<sup>-1</sup> a partir del espesor de horizontes, densidad aparente (medida o estimada) y el contenido de carbono orgánico determinado en los horizontes para la profundidad de 0 a 30 cm (COS 0-30). A partir de los datos calculados y datos de sensores remotos (DEM "TanDEM-X", con resolución espacial de 90 m; Sentinel 3: índice de clorofila) y climáticos regionales de precipitación y evapotranspiración potencial, se calcularon mapas de COS 0-30 estimado por el método de *Kriging Universal*. La metodología permite la inclusión de variables regresoras, las cuales fueron seleccionadas mediante modelos lineales de regresión múltiples ajustados por stepwise. Las mejores correlaciones entre COS 0-30 y las variables analizadas corresponden a la evapotranspiración ( $r=-0,59$ ) y a las precipitaciones ( $r=0,49$ ). El producto obtenido se comparó con el *Global Soil Organic Carbon Map* de FAO (GSOCmap 0-30), mostrando un excelente ajuste ( $r=0,87$ ,  $p<0,001$ ). El mapa regional muestra que el COS 0-30 oscila entre 6 a 170 Mg ha<sup>-1</sup>, creciente en el sentido de las precipitaciones. Para el total de la región ( $n= 501$ ) los valores de COS 0-30 para los perfiles presentan una distribución asimetría positiva y platokúrtica, con un rango de 6 a 204 Mg ha<sup>-1</sup>. El 50 % de los datos se encuentran entre 39 y 84 Mg ha<sup>-1</sup>. El Sudoeste ( $n=82$ ) presenta un valor promedio de 31 Mg ha<sup>-1</sup> y la mayoría de los datos se ubican entre 21 y 39 Mg ha<sup>-1</sup>. Para el Sudeste ( $n=36$ ) la media es de 112 Mg ha<sup>-1</sup>, con la mitad de los datos entre 88 y 136 Mg ha<sup>-1</sup>. Estos resultados ponen de manifiesto la marcada variabilidad espacial del carbono almacenado en los suelos. Dicho aspecto debe ser considerado al establecer planes de mitigación regional en cuanto al cambio climático, favoreciendo el secuestro de C en suelos pobres, como los del sur de la provincia, y previniendo su liberación en suelos ricos, como los de la zona centro-este.

Palabras clave: pedones, sensores remotos, *kriging*.

## ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is an important soil parameter, as it affects a large number of physical, chemical and biological soil properties. It represents almost 70% of the organic carbon in the biosphere and contributes to the global warming since soil can behave both as a sink and as a source of greenhouse gas (GHG). Understanding SOC variation in space is important to preserving environmental sustainability. The objective of this work is to obtain a regional SOC distribution map for the south-central area of the Province of Buenos Aires, utilising interpolation techniques applied to SOC samples taken from agricultural fields. The study area covers 20 10<sup>6</sup> ha in Buenos Aires Province, which has marked variability in climate, soils and production systems. An edaphic database stock was created containing 501 geo-located pedons, belonging to SiSINTA (347) and *Génesis* DA-UNS (154). SOC content (Mg ha<sup>-1</sup>) was determined for each profile, using soil horizon thickness, bulk density (measured or estimated), and SOC content at a 30 cm-soil depth (SOC 0-30). With the database as well as with the data from remote sensors (DEM "TanDEM-X", 90 m spatial resolution; Sentinel-3: Terrestrial Chlorophyll Index (OTCI)) and with the regional average climate variables of precipitation and potential evapotranspiration, a SOC 0-30 map was developed using the Universal Kriging method. Interpolation allows for the stepwise inclusion of the regression variables. The best correlations between SOC 0-30 and the analysed variables correspond to the evapotranspiration ( $r=-0,88$ ) and precipitations ( $r=0,71$ ). The map was compared to the Global Soil Organic Carbon Map, from FAO (GSOCmap 0-30), showing an excellent correlation ( $r=0,87$ ,  $p<0,001$ ). The map shows SOC values ranging from 6 to 170 Mg ha<sup>-1</sup>, with values increasing in the direction of the increasing precipitation. For the studied area, SOC values show a positive asymmetric platykurtic distribution, between 6 to 204 Mg ha<sup>-1</sup>. Fifty percent (50%) of the SCO values are between 39 and 84 Mg ha<sup>-1</sup>. The mean SOC value for the western portion of the study area is 31 Mg ha<sup>-1</sup>, with most of the values ranging from 21 to 39 Mg ha<sup>-1</sup>. In the eastern portion of the study area, the mean SOC value is 112 Mg ha<sup>-1</sup>, with half of the values in the range of 88 and 136 Mg ha<sup>-1</sup>. These results display the noticeable spatial variability of SOC. This variability should be considered when establishing regional climate change mitigation plans by favouring C sequestration in poor soils, such as those in the south of the province, and the prevention of its release in rich soils, such as those in the central-eastern part of the province.

Keywords: pedons, remote sensors, kriging

## RESUMO

O carbono orgânico do solo (COS) é um parâmetro fundamental visto que afeta um grande número de propriedades do solo físicas, químicas e biológicas. Representa quase um 70% do carbono orgânico na biosfera e desempenha um papel importante no aquecimento global, pode atuar como sumidouro ou como fonte de liberação de gases de efeito de estufa (GEE). Entender a variabilidade espacial do COS é importante para preservar a sustentabilidade do ambiente. O objetivo deste trabalho é gerar um mapa regional da distribuição do COS para o centro sul da Província de Buenos Aires, a partir de técnicas de interpolação aplicadas a amostras de carbono retiradas no campo. A área de estudo tem uma superfície de  $20 \times 10^6$  ha na Província de Buenos Aires, com marcada variabilidade de clima, solos e sistemas de produção. Foi gerada uma base de dados digital do solo, compreendendo 501 pedões geo-posicionados, que pertencem ao SiSINTA (347) e a base de dados Génesis DA-UNS (154). Para cada perfil foi calculado o armazenamento do COS em  $\text{Mg ha}^{-1}$  a partir da espessura dos horizontes, a densidade aparente (medida ou calculada) e o conteúdo de carbono a 0-30 cm de profundidade. Com os dados obtidos e dados de sensores remotos (DEM "TanDEM-X, 90 m de resolução espacial, Sentinel-3: índice de clorofila) e climáticos da região, precipitações e evapotranspiração potencial, foram calculados mapas de COS 0-30, estimados pelo método de *Kriging Universal*. A interpolação permite a inclusão de variáveis regressoras por *stepwise*. As correlações mais altas entre COS 0-30 e as variáveis analisadas foram a evapotranspiração ( $r=-0,88$ ) e as precipitações ( $r=0,71$ ). O mapa foi comparado com o Global Soil Organic Carbon Map de FAO (GSOCmap 0-30), dando como resultado um excelente ajuste ( $r=0,87$ ,  $p<0,001$ ). No mapa regional observa-se que os valores de COS 0-30 variam entre 6 a  $170 \text{ Mg ha}^{-1}$ , crescendo no sentido das precipitações. No total da região, os valores de COS 0-30 apresentam uma distribuição assimétrica positiva e platocúrtica, com um intervalo de 6 a  $204 \text{ Mg ha}^{-1}$ . O 50% dos dados variam entre 39 e  $84 \text{ Mg ha}^{-1}$ . No Sudoeste, a média tem um valor de  $31 \text{ Mg ha}^{-1}$ , a maioria dos dados encontra-se entre 21 e  $39 \text{ Mg ha}^{-1}$ . No Sudeste a média é de  $112 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com a metade dos dados no intervalo de 88 a  $136 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Os resultados comprovam a marcada variabilidade espacial do COS. De ser tomado em conta ao estabelecer planos regionais de mitigação do aquecimento global, favorecendo o sequestro de C em solos pobres, como os do Sudoeste, e evitando a liberação desde solos ricos, como na zona centro-leste.

Termos de indexação: pedões, sensores remotos, *kriging*



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT .....	3
RESUMO .....	4
INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS .....	9
MATERIALES Y MÉTODOS .....	10
ÁREA DE ESTUDIO .....	10
CLIMA REGIONAL.....	11
SUELOS DE LA REGIÓN .....	14
BASE DE DATOS EDÁFICA .....	17
INFORMACIÓN DIGITAL RECOLECTADA.....	18
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN .....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS .....	40
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) representa el mayor almacenamiento de carbono en el ecosistema terrestre, ocupando un 69,8% del carbono orgánico de la biosfera (FAO, 2001), mayor que el contenido en la atmósfera y vegetación terrestre sumados. No obstante, el COS es dinámico; la actividad del hombre puede favorecer tanto el secuestro de CO<sub>2</sub> de la atmósfera en el suelo como su liberación hacia la atmósfera. En los horizontes superficiales el ciclo del carbono y el secuestro de carbono son más activos. A mayores profundidades, el suelo tiene mayor capacidad de almacenar carbono y de forma más estable. La profundidad 0-30 cm es la más importante para la agricultura y que más impacto tiene en la liberación de gases de efecto invernadero (GEI).

Se han desarrollado prácticas agronómicas que favorecen la captura de C en el suelo. Entre ellas, la siembra directa (SD), es un sistema de manejo que consiste en la implantación de los cultivos sin necesidad de remover el suelo previamente, mediante la utilización de equipos de siembra especiales que cortan la cobertura superficial del suelo, abriendo una pequeña línea de siembra, donde depositan la semilla y cierran el surco. En Argentina, la superficie sembrada en SD en la campaña 2016/2017 fue de 33.189.747 ha, un 91% de toda la superficie cultivable del país. Otro de los beneficios de la SD es la disminución de la exposición por labranzas del C de los agregados del suelo al ataque microbiano, inclemencias climáticas y erosión hídrica y eólica (Nocelli Pac, 2018).

Desde el punto de vista agronómico, el COS es importante dado que afecta casi en su totalidad las propiedades del suelo, físicas: estructura y porosidad; químicas: CIC y pH; biológicas: aporte de nutrientes, entre ellos el nitrógeno es el más importante. El COS forma parte de la materia orgánica del suelo (MOS), conteniendo esta un 58% de carbono orgánico. La MOS posee alta capacidad de retención de agua e iones, mejorando las propiedades antes mencionadas, su mineralización aporta nutrientes a la solución del suelo, que serán utilizados por las plantas en su crecimiento. Una mayor disponibilidad de



nutrientes favorecería una mayor acumulación de biomasa y fijación del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, que luego se incorporará al suelo (Martínez et al., 2008).

La Agenda para el Desarrollo Sostenible de 2030 reconoce el papel del COS en sus Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS): 2 “Hambre Cero”, 3 “Salud y Bienestar”, 6 “Agua limpia y Saneamiento”, 13 “Acción por el clima” y 15 “Vida de ecosistemas terrestres” (FAO 2017). Para esto, señalan la importancia de restaurar suelos degradados y la adopción de prácticas que favorezcan la retención del C en el suelo. Se estima que en la conversión de un ecosistema natural a agricultura convencional se pierde un 30% a 50% de la reserva de COS, pudiéndose recuperar hasta un 70% con el uso de prácticas agronómicas conservacionistas (Lal, 2002). Dentro de estas prácticas, se incluyen la ya mencionada SD, cultivos de cobertura, variedades con mayor producción de biomasa radical (rica en lignina y suberina), rotaciones, uso acertado de fertilizantes, entre otras. La adopción de estas prácticas de manera acertada permite la producción agrícola de los suelos más fértiles para obtener mayores rendimientos de manera sustentable, permitiendo a los suelos más marginales un uso menos intensivo, preservándolos (Lal, 2002).

La información edáfica, a escala global y local, es la variable que suele escasear cuando se realizan predicciones de producción de alimentos y fibras. La importancia de las bases de datos edáficas radica en su contribución al estudio de riesgo de degradación del suelo (especialmente de erosión eólica), de impacto ambiental, planeamiento sustentable del manejo de suelos, productividad potencial y a la expansión de la agricultura de manera sustentable, para encaminarnos hacia la seguridad alimentaria y al desarrollo de una agricultura sustentable, teniendo en cuenta la mitigación del cambio climático y la necesidad de adaptarse.

La realización de mapas de suelo es costoso y laborioso, especialmente de zonas marginales y poco productivas. Las técnicas de interpolación geoestadísticas juegan un papel muy importante en esta área, debido a la posibilidad de predecir atributos del suelo, como el COS, mediante un conjunto de datos distribuidos en el área de interés. La precisión de los valores dependerá





de la estructura espacial de los datos, de la cantidad y la calidad de los datos y, por último, de la técnica utilizada. El *Kriging* es una técnica de interpolación, nombrada así por su creador D.G. Krige, basada en el análisis geoestadístico de la variable de interés. La técnica comprende distintos pasos, 1) Análisis descriptivo de los datos a utilizar, 2) Construcción del semivariograma, 3) Modelado del semivariograma, 4) Cálculo de valores para nuevos puntos. El semivariograma es parte central de la técnica y es la que analiza la estructura espacial de los datos, para ello se calcula para un conjunto de distancias determinadas la semivarianza entre puntos. La semivarianza es una medida para determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza. El análisis del semivariograma nos brinda información de cuanta variabilidad de los datos puede ser explicada con el conjunto de datos evaluado, la autocorrelación de estos puntos en el espacio y permite inferir la calidad del producto final. Los puntos cercanos estarán más relacionados y tendrán mayor peso en la interpolación, disminuyendo a medida que aumenta la distancia (Henríquez et al., 2008).



## OBJETIVOS

- 1) Generar una base de datos edáfica local y regional.
- 2) A partir de datos relevados a campo, generar un mapa de distribución de carbono orgánico del suelo, estimando los niveles almacenados en los primeros 30 cm del perfil para el centro y sur de la Provincia de Buenos Aires.
- 3) Comparar el producto cartográfico obtenido con el *Global Soil Organic Carbon Map* de FAO (GSOCmap 0-30).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en un amplio sector ubicado en la zona centro-sur de la Provincia de Buenos Aires, comprendido dentro de la Región Pampeana. El área comprende una superficie de aproximadamente  $20 \cdot 10^6$  has.

En la región el paisaje predominante es la llanura pampeana, que se caracteriza por su bajo y marcadamente plano relieve, gracias al accionar eólico. Cuenta con bajas pendientes, excepto en las zonas serranas y periserranas, orientadas hacia el litoral atlántico y los ríos Paraná y de la Plata. Con respecto a la altitud, el 90% se encuentra por debajo de los 200 m, encontrándose las máximas alturas en las Sierras Australes (1200 m) y en las Sierras Septentrionales (500 m). Los principales procesos geomorfológicos son: proceso fluvial, proceso eólico y proceso litoral-marino. Se diferencian 11 unidades geomorfológicas principales: Pampa Ondulada, Pampa Arenosa, Pampa Endorreica, Delta del Paraná y Delta del Colorado, Pampa Deprimida, Planicies litorales pampeanas, Sierras Septentrionales bonaerenses, Pampa Interserrana, Sierras Australes bonaerenses, Depresión lacunar occidental, Planicies estructurales norpatagónicas. Dentro del área de estudio se encuentran la Pampa Arenosa al oeste de la Provincia de Buenos Aires, la Pampa Deprimida en la zona central y oriental de la provincia, las Planicies litorales atlánticas sobre todo el litoral atlántico, las Sierras Septentrionales bonaerenses, Pampa Interserrana y Sierras Australes bonaerenses en la zona central y sur de la provincia, hacia el sur se encuentra el Delta del Colorado, y en el extremo sur las Planicies estructurales norpatagónicas (Pereyra, 2018).

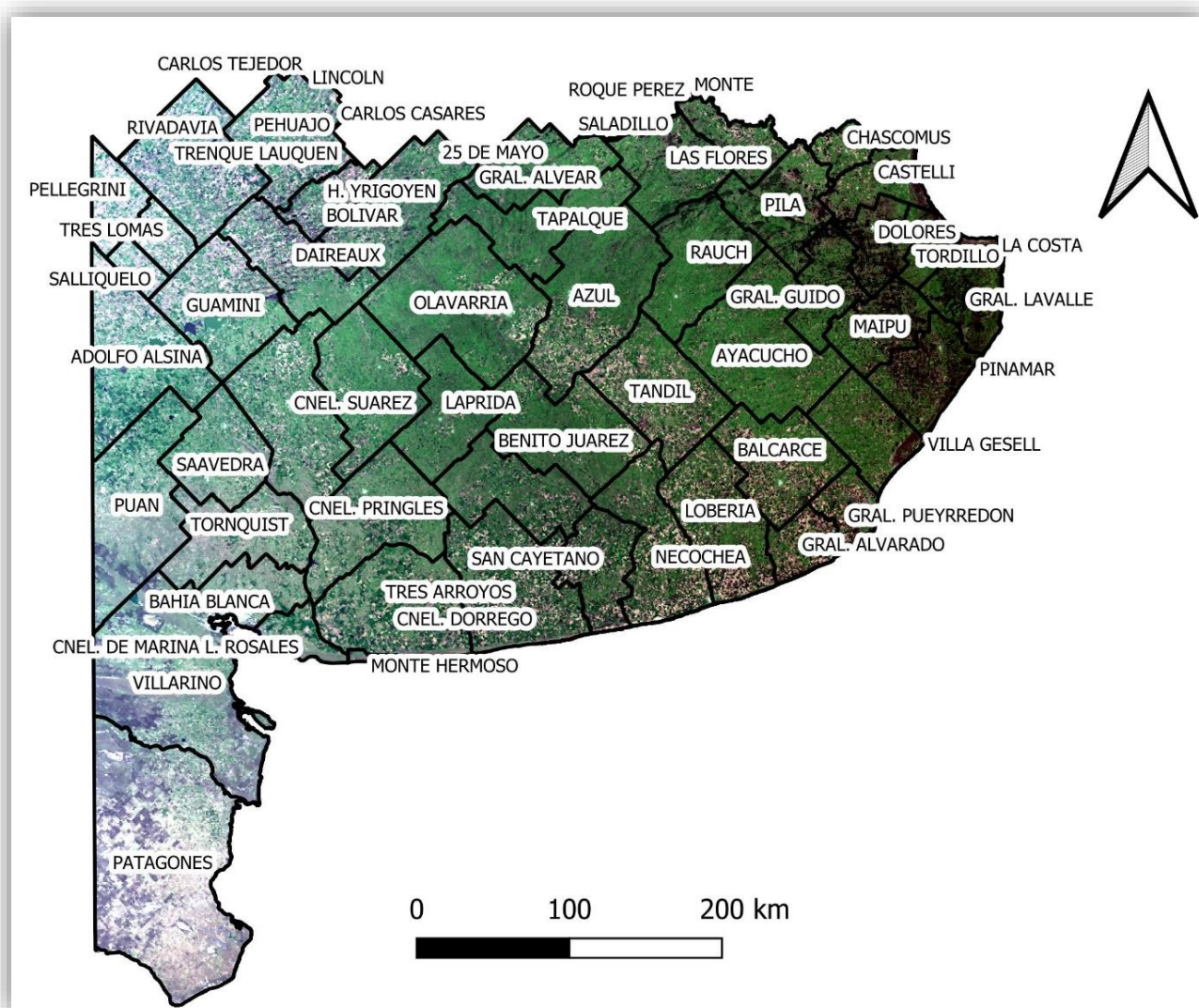


Figura 1. Área de estudio. Imagen True Color de Sentinel-3.

## CLIMA REGIONAL

En la Región Pampeana se encuentran los suelos más productivos del país. Está comprendida entre las latitudes 31° y 39° S y las longitudes 57° y 65° W. La componen las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, centro-este de La Pampa, centro-sur de Santa Fe, Córdoba y San Luis y sur de Corrientes, sumando una superficie total de 613.532 km<sup>2</sup> (Aliaga, 2018).

El clima de la región es templado-húmedo, con precipitaciones que disminuyen desde el noreste (1000 mm) hacia el sudoeste (400 mm), pasando

del clima húmedo a semiárido. La temperatura media anual decrece desde el norte hacia el sur, siendo la temperatura media máxima 20,6 °C y la media mínima de 10,1 °C. Las amplitudes térmicas diarias y anuales son atenuadas debido al factor de oceanidad, que decrece del este hacia el oeste, adentrándose en el continente. Las precipitaciones anuales presentan una estacionalidad marcada en los meses de otoño (marzo-abril) y primavera (octubre-noviembre), siendo la estación seca correspondiente al invierno. Las mayores precipitaciones se concentran en el noroeste de la Región Pampeana, y las menores en la parte más austral.

Dentro de esta clasificación, la zona bajo análisis se encuentra dentro del clima templado. Comparado a latitudes similares en el Hemisferio Norte, la Provincia de Buenos Aires se beneficia de condiciones climáticas más favorables gracias al efecto de la oceanidad, con veranos más frescos e inviernos menos fríos. Este efecto es más marcado en el este de la provincia, y a medida que nos adentramos hacia la parte oeste, se hace más presente el factor contrario, la continentalidad. Es por esto que las amplitudes térmicas diarias y anuales crecen en sentido este-oeste de la provincia. La diferencia térmica del mes más cálido y del mes más frío es de 12-13 °C al este, y mayor de 16 °C al oeste. La temperatura también disminuye gradualmente en sentido norte a sur. En enero el valor medio es de 24 °C en el noroeste y de 20 °C en el sudeste, y en julio de 10 °C en el nordeste y alrededor de 7 °C en el sudoeste, mientras que la temperatura media anual ronda los 18 °C al norte y 14 °C al sur. La Provincia de Buenos Aires se encuentra entre las isotermas de 14 y 18 °C de temperatura media (Fig. 2). Con respecto a las precipitaciones, la estación más lluviosa corresponde al verano, con valores máximos en el mes de marzo, y valores mínimos registrados en el mes de julio. Cabe destacar que las precipitaciones de verano son menos aprovechadas debido a su mayor intensidad, por lo que una parte importante escurre, pudiendo incluso ser perjudicial para el suelo y el COS por efectos de la erosión hídrica. La evapotranspiración potencial sigue un patrón similar a las precipitaciones, siendo de aproximadamente 850 mm anuales al norte y 750 mm anuales en el sur de la provincia (INTA, 1989).



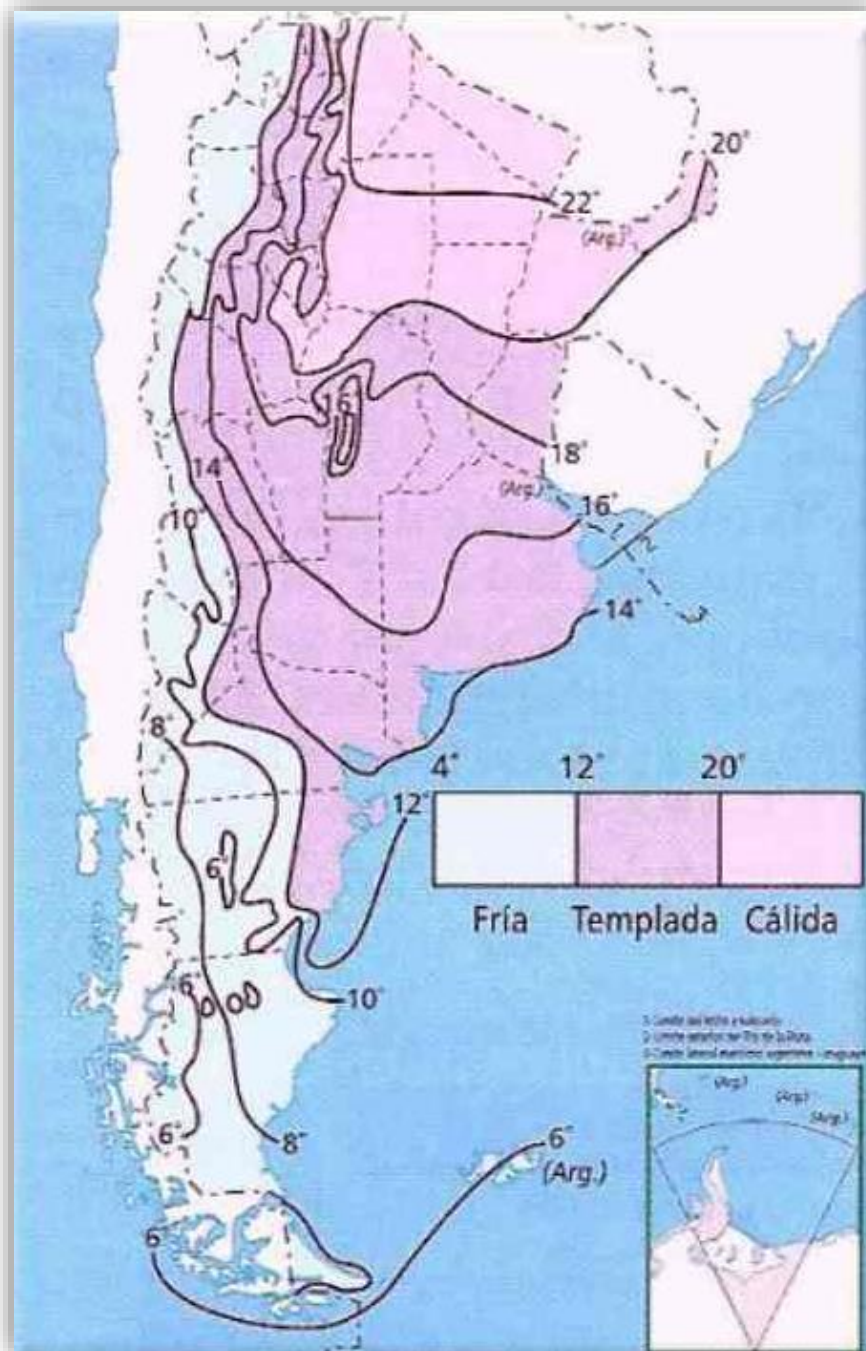


Figura 2. Mapa de isotermas de la República Argentina.

## SUELOS DE LA REGIÓN

El sistema de clasificación de suelos norteamericano, *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff. 1999) incluye doce ordenes: Alfisoles, Andisoles, Aridisoles, Entisoles, Gelisoles, Histosoles, Inceptisoles, Molisoles, Oxisoles, Espodosoles, Ultisoles y Vertisoles. En la región pampeana se han identificado cinco de ellos (los cuales se pueden observar en la Fig. 3):

**Molisoles:** es el orden predominante en la provincia de Buenos Aires. Se encuentran principalmente en las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Córdoba, Santa Fe y el sureste de Entre Ríos. Está asociado a diversos paisajes. Se caracterizan por presentar un horizonte superficial oscuro y espeso, con buena estructura, un contenido de materia orgánica moderado a alto, y la saturación con bases mayor al 50%. El horizonte superior debe cumplir los requisitos de epipedón mólico.

**Vertisoles:** están presentes en el centro-este de la llanura entrerriana y centro-norte de la costa bonaerense. Son suelos arcillosos, con porcentajes de arcilla expandible mayores o iguales a 30% en todos sus horizontes, por lo tanto, son de escasa permeabilidad, de alta densidad cuando el suelo se encuentra seco, sufren cambios volumétricos según el contenido de humedad, movimientos en masa y tensiones que se traducen en traslocación de material (debido a las arcillas expansibles), dando como resultado una morfología de perfil más homogéneo.

**Alfisoles:** están ubicados mayormente en el centro-este de Buenos Aires, centro de Santa Fe, noroeste y sureste de Córdoba, relacionados a condiciones de drenaje deficitario, en paisajes plano-cóncavos que se encuentran anegados una parte del año, como en bordes de lagunas, microdepresiones y en la base de las pendientes, asociados a Molisoles y Vertisoles. Son suelos bien desarrollados, con moderada a alta saturación de bases, con la presencia de un horizonte subsuperficial argílico que surge de un aporte secundario de arcillas, tiene presencia de agua una parte del año, un horizonte superficial de bajo espesor y color claro, son de bajo contenido de materia orgánica, de estructura masiva y dura en seco, correspondiente a un epipedón ócrico.





Entisoles: orden muy heterogéneo, azonal, asociado a gran variedad de paisajes, se encuentran en los márgenes del Río Paraná y Uruguay y en la zona de dunas costeras de Buenos Aires. Se caracterizan por el mínimo desarrollo de horizontes, con perfiles simples del tipo A – C, escaso contenido de materia orgánica, textura del material originario areno-franca y presencia de epipedones ócricos. Las propiedades son gobernadas por las características del material originario.

Aridisoles: Están presentes al este de la provincia de La Pampa, suroeste de Buenos Aires y centro-norte de Córdoba. Típicos de regiones áridas, donde la evapotranspiración supera la precipitación y con déficit hídrico por períodos prolongados. Presenta horizontes superficiales pobres en materia orgánica, epipedón ócrico no masivo ni duro en seco, endopedones cámbico, cálcico, petrocálcico, gípsico, petrogípsico y/o duripan. Pueden contener un horizonte argílico o nátrico (Scoppa y Di Giacomo, 1998).

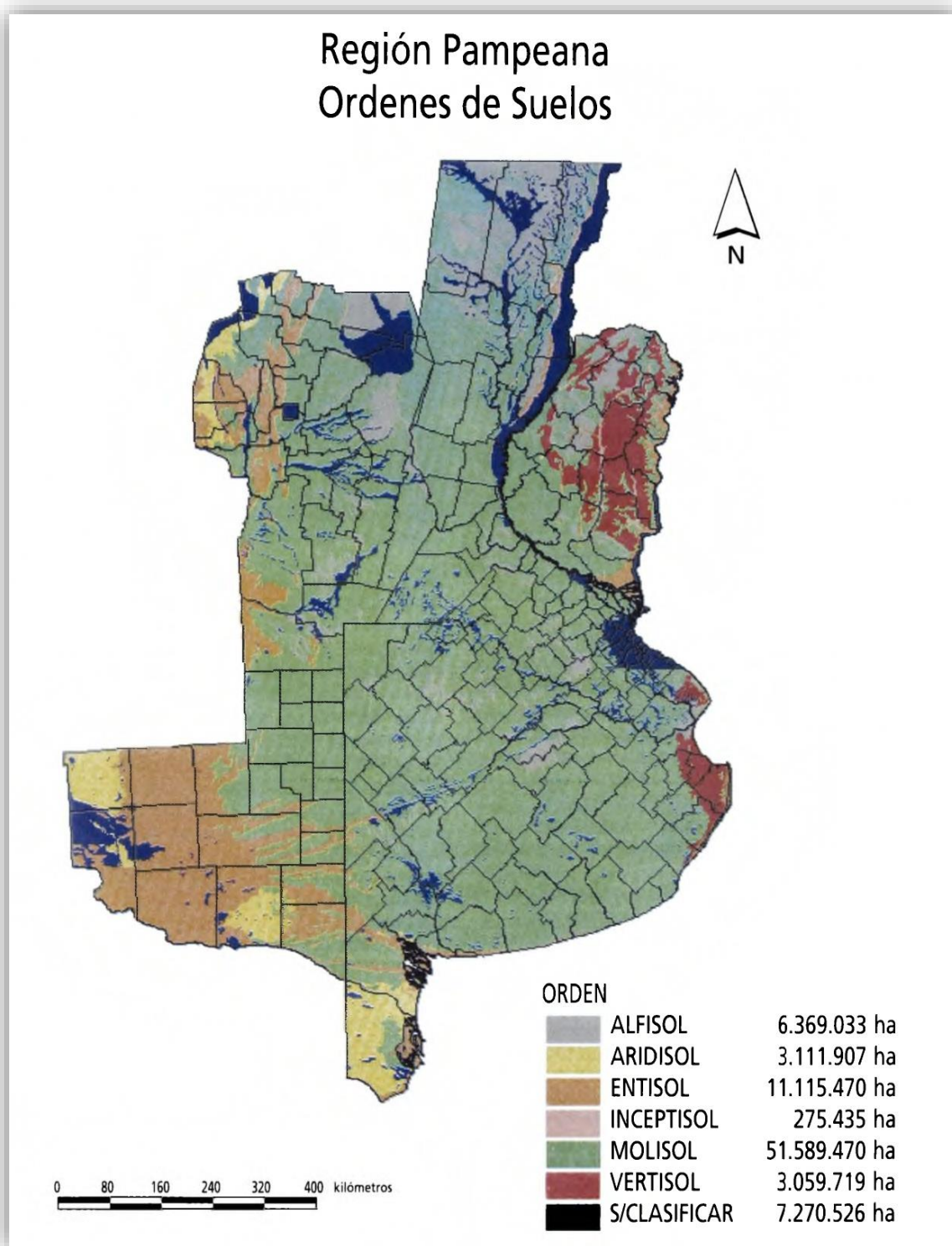


Figura 3. Ordenes de suelos de la Región Pampeana (Scoppa y Di Giacomo, 1998).

## BASE DE DATOS EDÁFICA

Los datos se recopilaron de trabajos de intensificación realizados por estudiantes de la Tecnicatura en Suelos y Aguas e Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Sur, en las que se realizó un estudio detallado de los suelos en distintas localidades de la zona según las normas del *Soil Survey Manual* (Soil Survey Staff, 1993), procediendo al muestreo y caracterización fisicoquímica de los mismos. En una planilla Excel, se cargó cada perfil de suelo con los siguientes datos: geolocalización del sitio de estudio, indicando latitud y longitud del punto; variables de sitio: zona geomorfológica, geoforma, drenaje, material parental, uso de la tierra, profundidad efectiva, relieve, material parental y pendiente; para cada perfil se identificaron los horizontes genéticos (sistema ABC), y para cada horizonte se cargaron datos de la descripción morfológica del perfil: espesor, color en seco y húmedo, descripción de la estructura (tipo, clase y grado), y datos fisicoquímicos: reacción al HCl al 10%, textura, contenido de arenas (muy gruesa, gruesa, fina, muy fina), limo y arcilla por horizonte, capacidad de campo (CC), punto de marchitez parmente (PMP), densidad aparente ( $D_a$   $Mg/m^3$ ), carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total (NT), fósforo (P) carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), pH del en agua (1:2,5), capacidad de intercambio catiónico (CIC), suma de bases, porcentaje de saturación de bases, conductividad eléctrica y porcentaje sodio intercambiable (PSI).

Para calcular el COS a 30 cm de profundidad "COS 0-30", se calculó el valor de carbono orgánico por horizonte ("COSH"), mediante la fórmula:

$$COSH = \frac{COS \left( \frac{g}{kg} \right) * Dap \left( \frac{Mg}{m^3} \right) * espesor\ horizonte(cm)}{10}$$

Luego, para el cálculo de COS 0-30, se procedió a sumar el COSH de los horizontes hasta llegar a 30 cm.

De la base de datos de INTA se seleccionaron los perfiles de suelo que se encontraban comprendidos de la zona de estudio delimitada. Se procedió a estimar la densidad aparente de todos los perfiles a partir de los datos de

carbono orgánico (CO%), arcilla (a%), limo (L%) y arena (A%) mediante la fórmula de Rawls (1983), donde:

$$Dap = \frac{100}{\left( \left( CO\% * 1,72 * \frac{0,1}{0,224} \right) \right) + \left( \frac{100 - CO\% * 1,72 * 0,1}{0,52 + 0,242 * LN(A\%)} \right)} * 0,9$$

Los datos de carbono orgánico se convirtieron de porcentaje al Sistema Internacional de Unidades, g/kg y se calcularon el COSH y COS 0-30 de la misma manera que para la base de datos anterior. Luego, se unificaron todos los datos en una planilla, conteniendo los datos de COS 0-30 cm georreferenciados.

La planilla de Excel se convirtió a CSV (*comma-separated values*) para poder exportarse como archivo vectorial y utilizarse en el software QGIS.

## INFORMACIÓN DIGITAL RECOLECTADA

Se descargó el DEM (*digital elevation model*) “TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements*)”, realizados por dos satélites casi idénticos equipados con tecnología SAR-X, lanzados en conjunto por el Centro Aeroespacial Alemán y EADS Astrium. El DEM presenta una resolución espacial de 3 arcoseg (90 m), de cobertura global permitiendo generar un mapa 3D de la superficie terrestre. El producto descargado es un archivo comprimido en formato ZIP (\*.zip), que incluye una capa ráster DEM en formato GeoTIFF(\*.tif), 7 rásters conteniendo información, en formato GeoTIFF(\*.tif) (*auxfiles*), y la vista previa en formato GeoTIFF(\*.tif) y archivos en formato KML (*preview*). Mediante herramientas del software QGIS se obtuvieron los siguientes productos derivados del DEM: *valley depth*, *twi*, sombreado analítico, *relative slope position*, pendiente, *ls factor*, *curvature*, *cnd*, *closed depressions*, *Channel Network Base Level* y aspecto.

Las imágenes satelitales se obtuvieron del sensor óptico Sentinel-3, desde la plataforma Sentinel Hub ([sentinel-hub.com](https://sentinel-hub.com)). Pertenecen al Programa Copérnico de observaciones terrestres, desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Sentinel-3 posee una constelación de dos satélites (Sentinel-3A y

Sentinel-3B) ubicados en la misma órbita heliosíncrona, separados por 180°. Los satélites cuenta con 21 bandas, con longitudes de onda desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano (<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-3-olci-l1b/>). El objetivo de esta misión es obtener imágenes multiespectrales de resolución media de la superficie terrestre y del océano para recolectar información sobre la temperatura, la topografía y color del océano y superficie terrestre. En este trabajo se utilizaron las imágenes OLCI (Instrumento para el Color del Océano y del Suelo) del día 4 de octubre de 2021, para obtener el índice de clorofila terrestre (OTCI). Este se basa en la combinación de las bandas B10, B11 y B12. La resolución espacial es de 300 m y el tiempo de revisita es de máximo 2 días. Se cuenta con datos desde mayo del 2016.

$$OTCI = (B12 - B11)/(B11 - B10)$$

Los datos climáticos de precipitaciones medias mensuales de la República Argentina se obtuvieron de la página Geoportal Idesa (<http://geoportal.idesa.gob.ar/>) en formato GeoTIFF (\*.tif). En QGIS, se procedió a recortar la capa en el formato del área de estudio, y luego mediante la herramienta “extracción-curvas de nivel” se calcularon las isohietas cada 100 mm de precipitación.

Los datos de evapotranspiración potencial se tomaron de la plataforma *Google Earth Engine*. Pertenecen al dataset “*TerraClimate*”. Este es un conjunto de datos que modelan distintas variables climatológicas originados del análisis de otros modelos predictivos de las mismas variables.

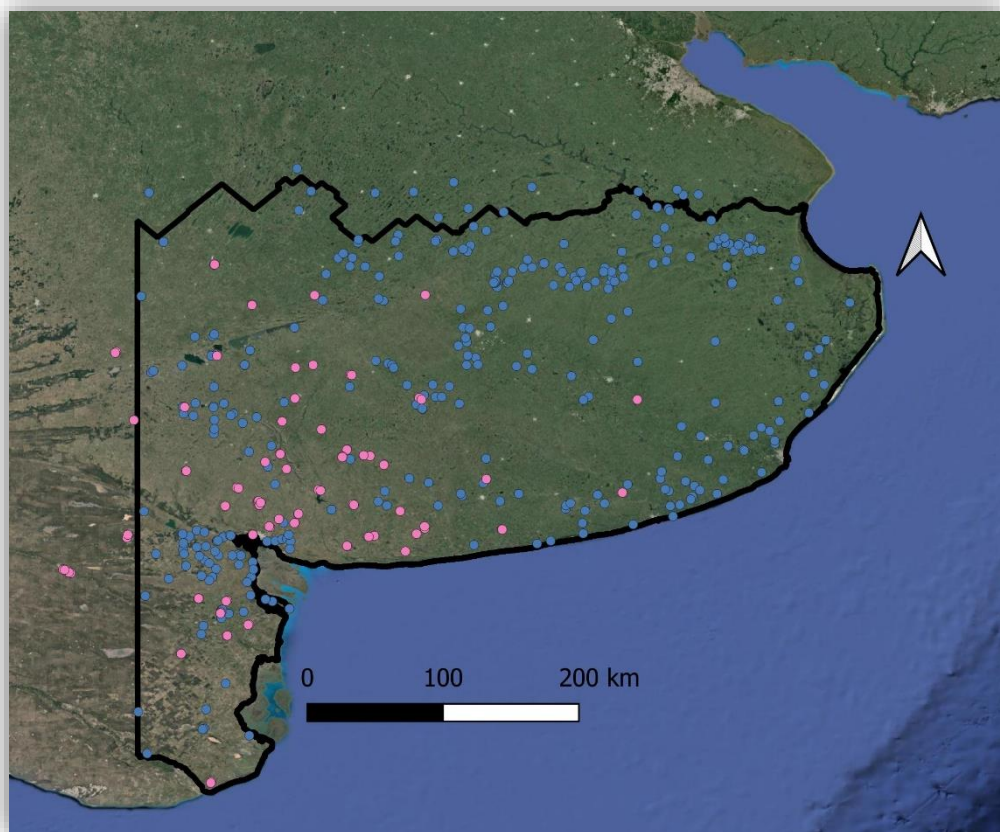
Las imágenes GeoTIFF (\*.tif) de precipitaciones, índice de clorofila, aspecto del relieve, GSOCmap y el producto obtenido de este estudio fueron procesadas en QGIS generando una cartografía adecuada para cada variable (Fig. 5 a 11, 13 y 14). Los procesos para la presentación incluyeron: selección de la escala, selección de la paleta de colores, adecuación de valores (máximo y mínimo) del histograma, confección de la leyenda y orientación (norte).



## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Se analizaron las variables regresoras a utilizar mediante modelos lineales de regresión múltiple ajustados por stepwise, seleccionando aquellas que resultaban significativas.

A la base de datos obtenida con trabajos finales de carrera del Departamento de Agronomía de la UNS (154), se agregaron 347 perfiles de la base de datos de SiSINTA ubicados en el área de estudio delimitada hasta alcanzar una cantidad de 501 pedones geolocalizados en los cuales se ha determinado el contenido de COS 0-30 cm en  $\text{Mg ha}^{-1}$ . En la Fig. 4 se observa la ubicación de los puntos de muestreo. Los puntos azules pertenecen a SiSINTA, y los puntos rosas a Génesis DA-UNS.



*Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo. Imagen de Google Satellite.*

Para confeccionar el mapa de COS se analizó la información recopilada. El método de interpolación utilizado fue *Kriging Universal*. Se utilizó el software y lenguaje de programación R para realizar el mapa (R core team, 2021).

Se analizaron las variables COS 0-30, DEM y derivados (*valley depth*, *twi*, sombrero analítico, *relative slope position*, pendiente, *ls factor*, *curvature*, *cnd*, *closed depressions*, *Channel Network Base Level* y aspecto), evapotranspiración potencial, índice de clorofila, precipitaciones medias mensuales y el producto de *GSOCmap*, que se utilizó para validar el modelo. Mediante la herramienta “*point sampling tool*” se extrajeron los puntos (georreferenciados en los puntos de muestreo de carbono) de todas las capas para su análisis estadístico.

La variable COS 0-30 fue caracterizada por medidas de centralización (media, mediana), de dispersión (coeficiente de variación) y de posición (Q1, Q3). En el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo, 2020) se analizaron las medias por el método ANOVA y para la comparación de las medias se utilizó la prueba de Tukey, con un nivel de significación de 0,05.

Se dividieron cuatro regiones ambientales para su análisis estadístico:

- Sudoeste: partidos de Villarino y Patagones, con n=82.
- Sudeste: partidos de Necochea, Lobería, Tandil, sur de Azul, Balcarce, General Alvarado y General Pueyrredón, con n=36.
- Noroeste: partidos de Adolfo Alsina, Guaminí, Daireaux, Yrigoyen, Bolivar, Pehuajo, Trenque Lauquen, Pellegrini, Tres Lomas y Salliquelo, con n=36.
- Centro-norte partidos: Tapalque, norte de Azul, Rauch, Las Flores, General Belgrano, Pila, Chascomús, Castelli, y General Guido, con n=57.

Con las variables extraídas de los archivos ráster para cada punto de muestreo, se confeccionó una matriz de correlación lineal simple ( $r$ ) para determinar cuál podría predecir el comportamiento de COS 0-30. Valores de  $r \geq 0,16$  se consideraron significativos con  $p < 0,05$ . Asimismo, los valores medios de las 4 regiones fueron analizados por ANOVA y comparados por test de Tukey con  $p < 0,05$  (Di Rienzo, 2020).



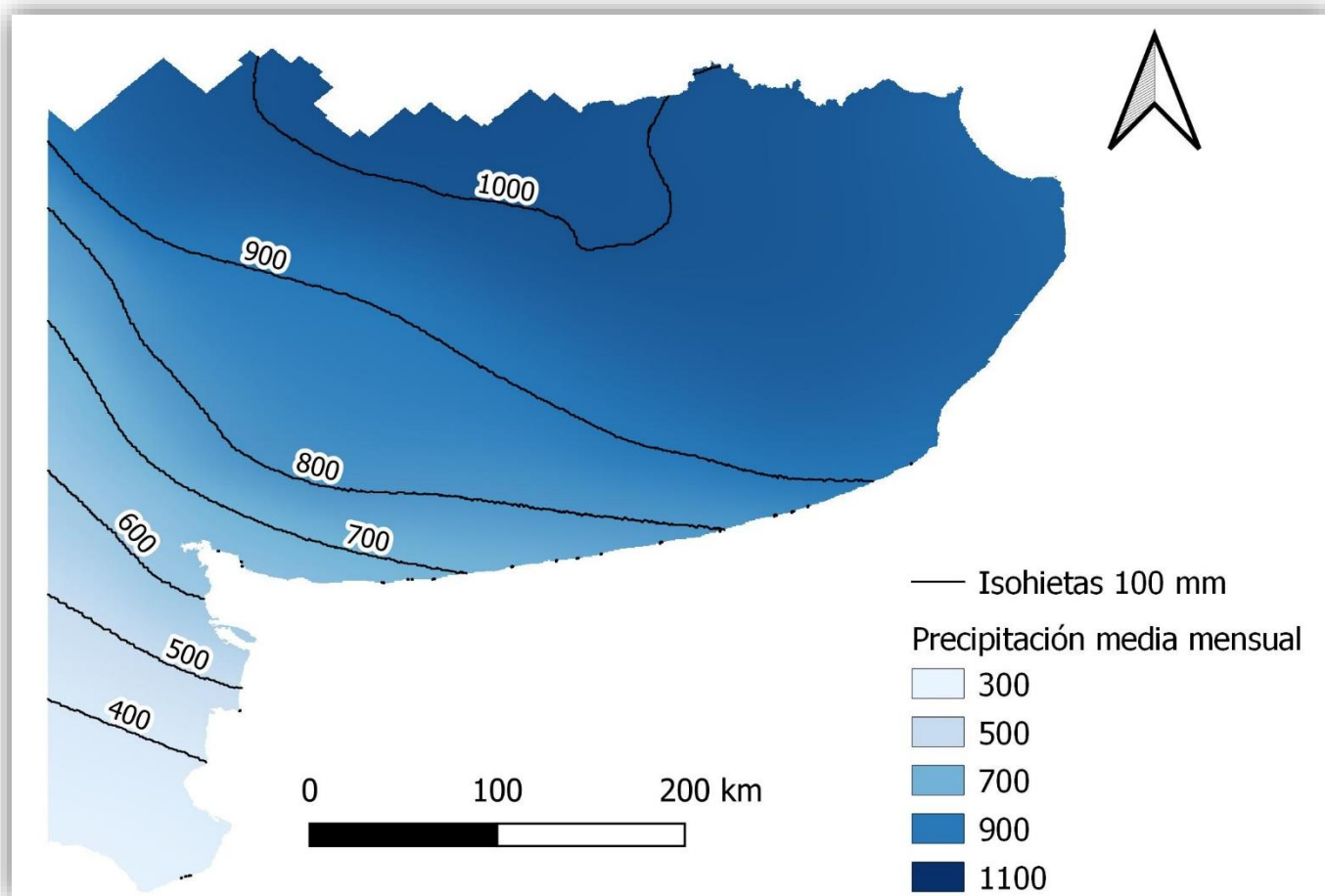


## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generaron dos bases digitales de datos edáficos, una regional que abarca 501 pedones geo-posicionados, pertenecientes al SiSINTA (347 perfiles) y base de datos Génesis DA-UNS (154) con valores de COS 0-30 cm, y otra con la base de datos Génesis DA-UNS (154) de perfiles completos, con los datos mencionados en el apartado de base de datos edáfica.

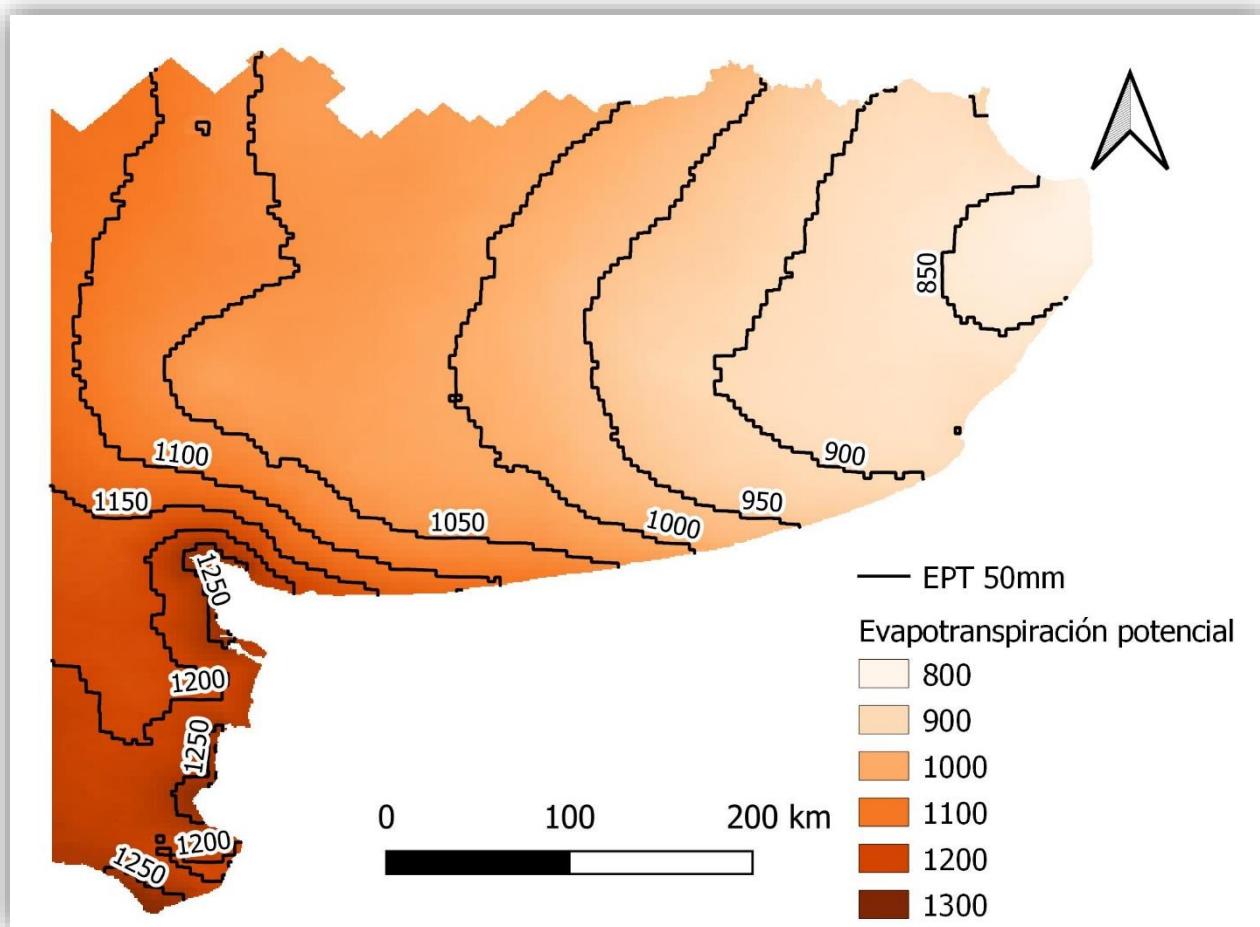
La base de datos puede consultarse en el siguiente enlace:

<https://github.com/LauraVallejosBubicz/datasetedaficouns>



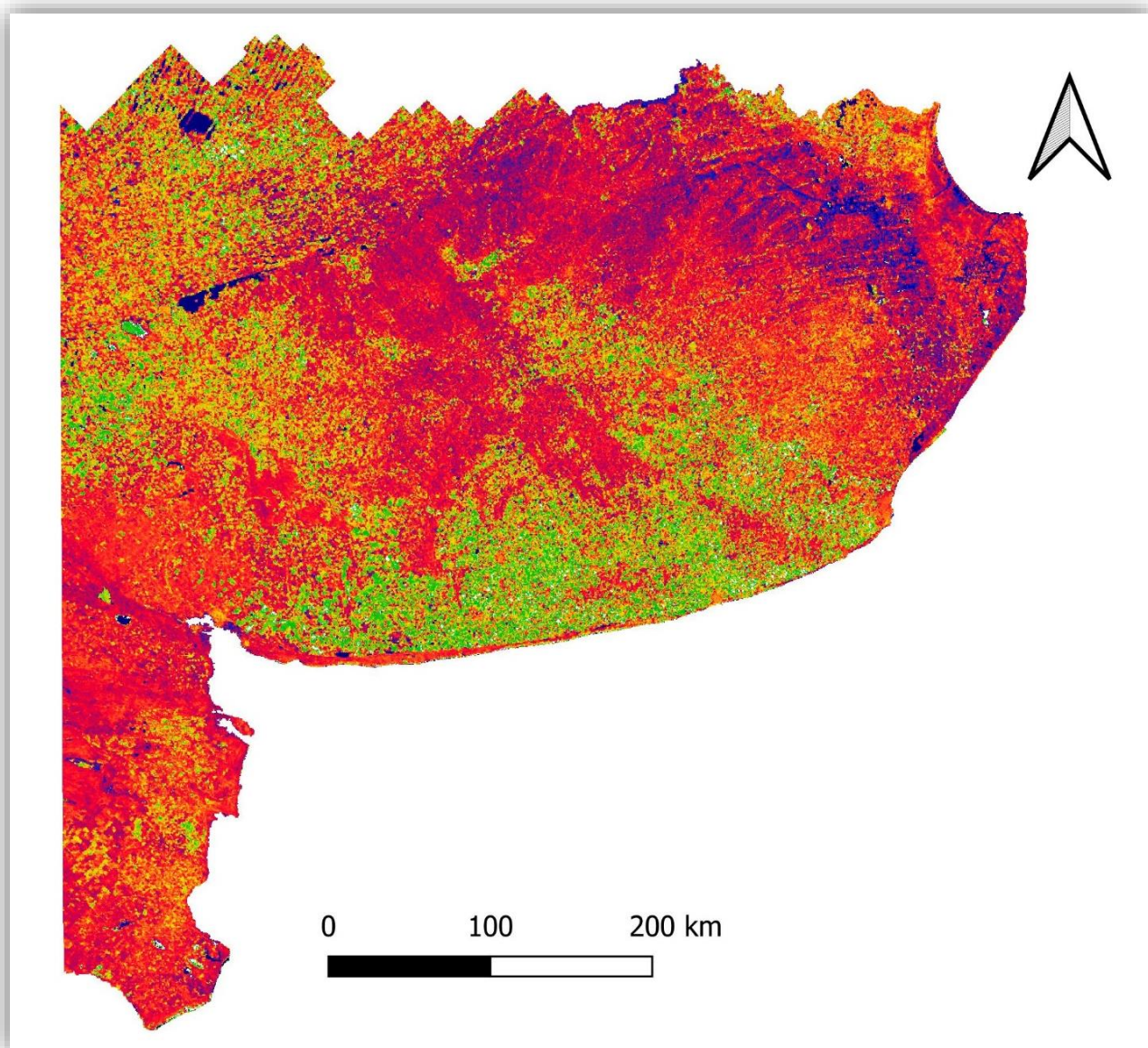
*Figura 5. Mapa de precipitación media anual con isohietas cada 100 mm de precipitación.*

En el mapa de precipitaciones (Fig. 5) podemos observar la tendencia decreciente de precipitaciones en sentido noreste-sudoeste. Estos valores coinciden parcialmente con el COS ( $r=0,49$ ). En la zona de menores precipitaciones, el Sudoeste, se encuentran los menores valores de COS, pero en la zona de mayores precipitaciones, zona Centro-norte, no se encuentran los mayores valores (sudeste).



*Figura 6. Evapotranspiración potencial.*

En la Fig. 6 se puede observar el aumento de la evapotranspiración potencial anual desde el noreste hacia el sudoeste. Las curvas conectan puntos de igual evapotranspiración potencial. Esta variable, dentro de las analizadas, es la que mayor explicación a la variabilidad espacial del COS ( $r=-0,59$ ). La relación es inversa, a mayor evapotranspiración potencial, menor COS. El Sudoeste es la zona donde se encuentran los menores valores de COS, coincidiendo con los mayores valores de evapotranspiración (1150-1250 mm). La zona de menor evapotranspiración potencial (menor a 950 mm) no coincide con la zona de mayores valores de COS (Sudeste), pero si presenta altos valores de carbono (90 a 100 Mg ha<sup>-1</sup>).



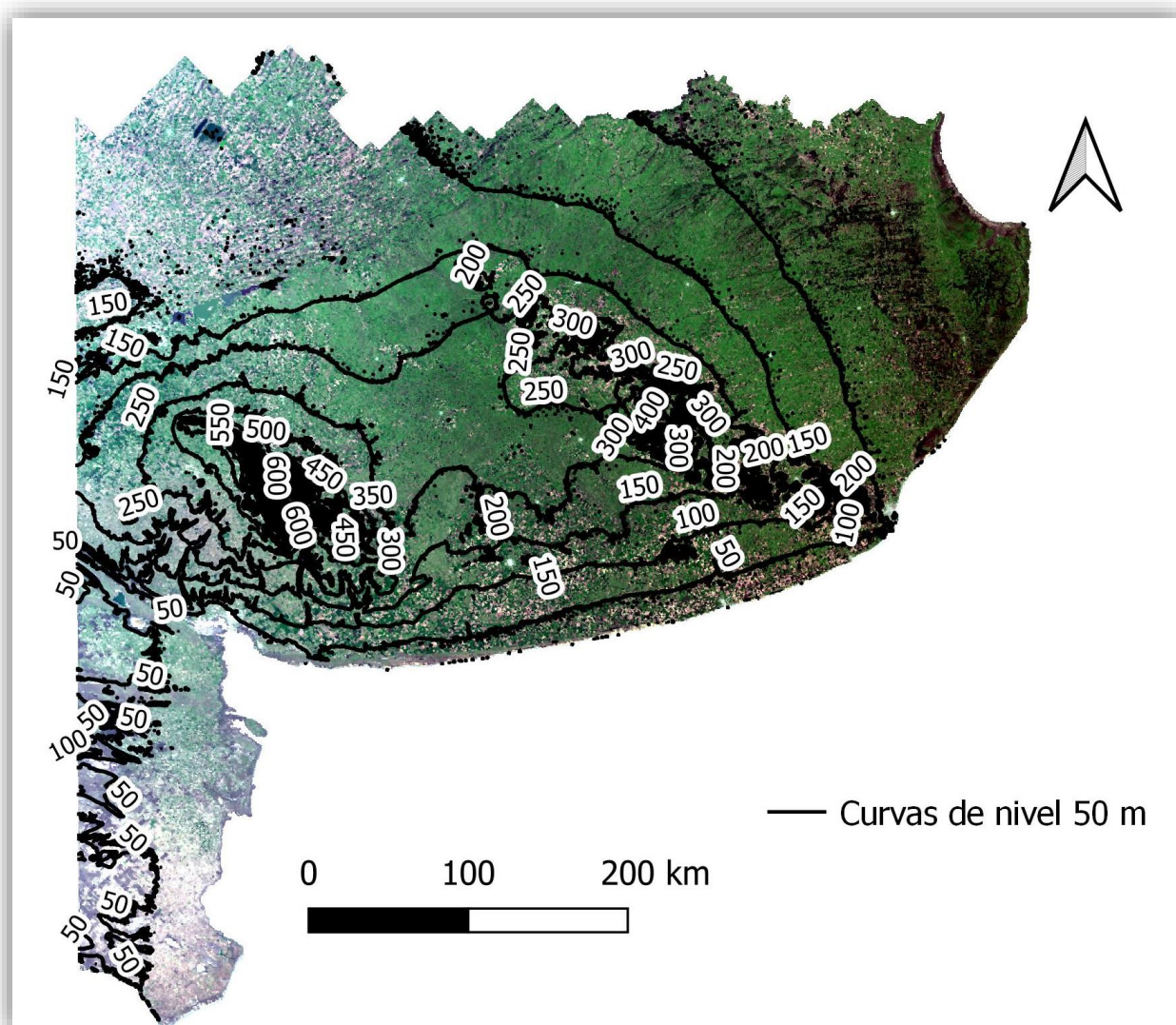
*Figura 7. Imagen Sentinel-3 OLCI. Índice de clorofila terrestre (OTCI).*

La Fig. 7 muestra al producto OTCI, tonalidades rojizas indican valores pequeños de OTCI y en verde oscuro se observan valores elevados. El color azul representa agua, arena o nieve. Valores blancos indican que no hay clorofila, y puede corresponder a suelo desnudo, rocas o nubes. Se observa que el área con mayor índice de clorofila es la zona Sudeste de la Provincia de Buenos Aires, coincidente con los valores puntuales de COS detectados en la base de datos generada. Valores bajos de índice de clorofila se observan en la



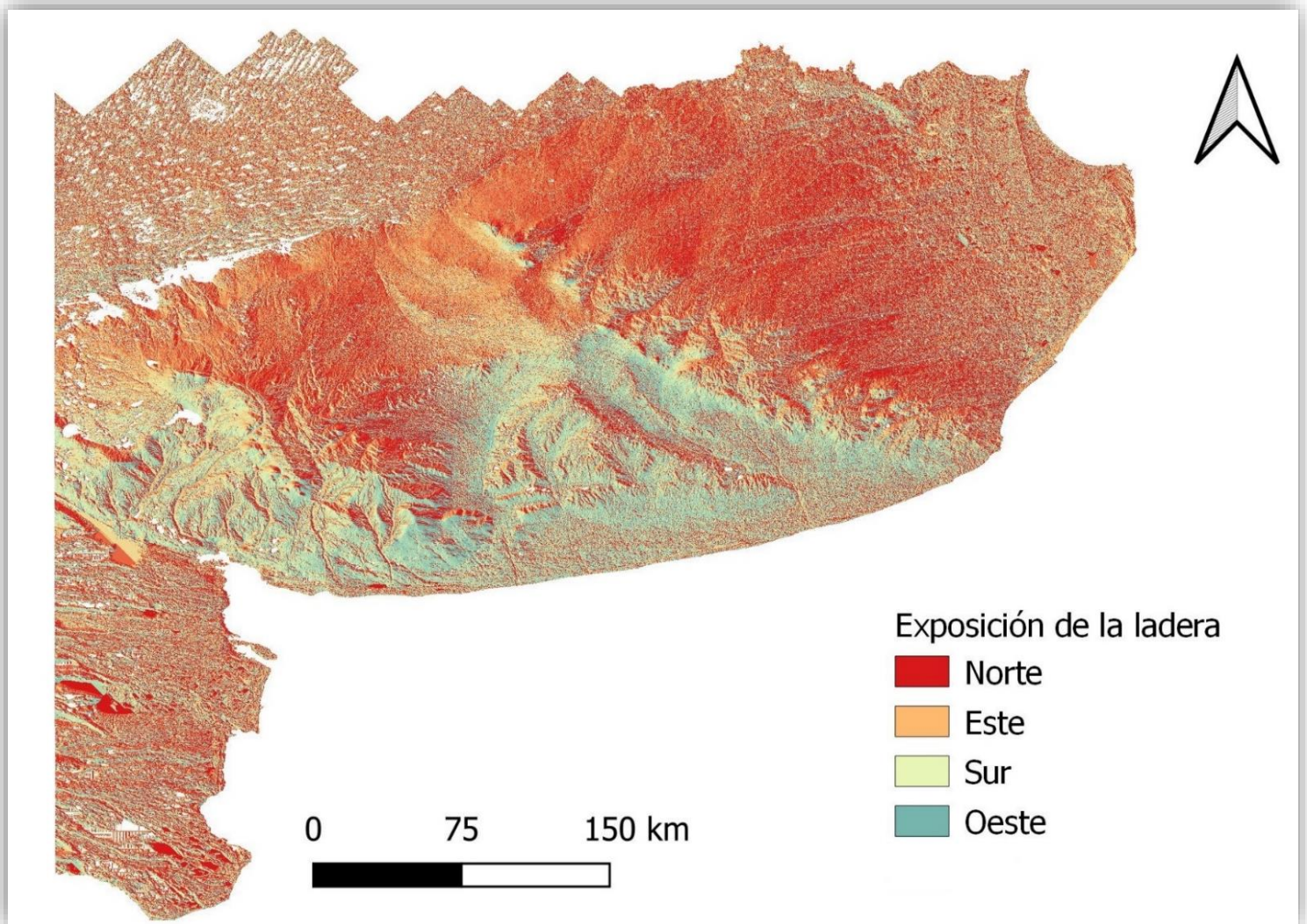
zona Sudoeste, donde estan los valores puntuales más bajos de COS de la base de datos.





*Figura 8. Curvas de nivel en la Provincia de Buenos Aires.*

En la Fig. 8 se observa que toda la zona de estudio muestra un gran plano levemente interrumpido por los sistemas serranos de Tandilia (máxima cota= 524 msnm) y Ventania (máxima cota= 1238 msnm) También puede apreciarse en los partidos de Villarino y Patagones el límite entre la terraza patagónica (arriba de los 50 m) y la zona de contacto o de declive (50 a 10 m) hacia las terrazas marinas (10 a 0 m).



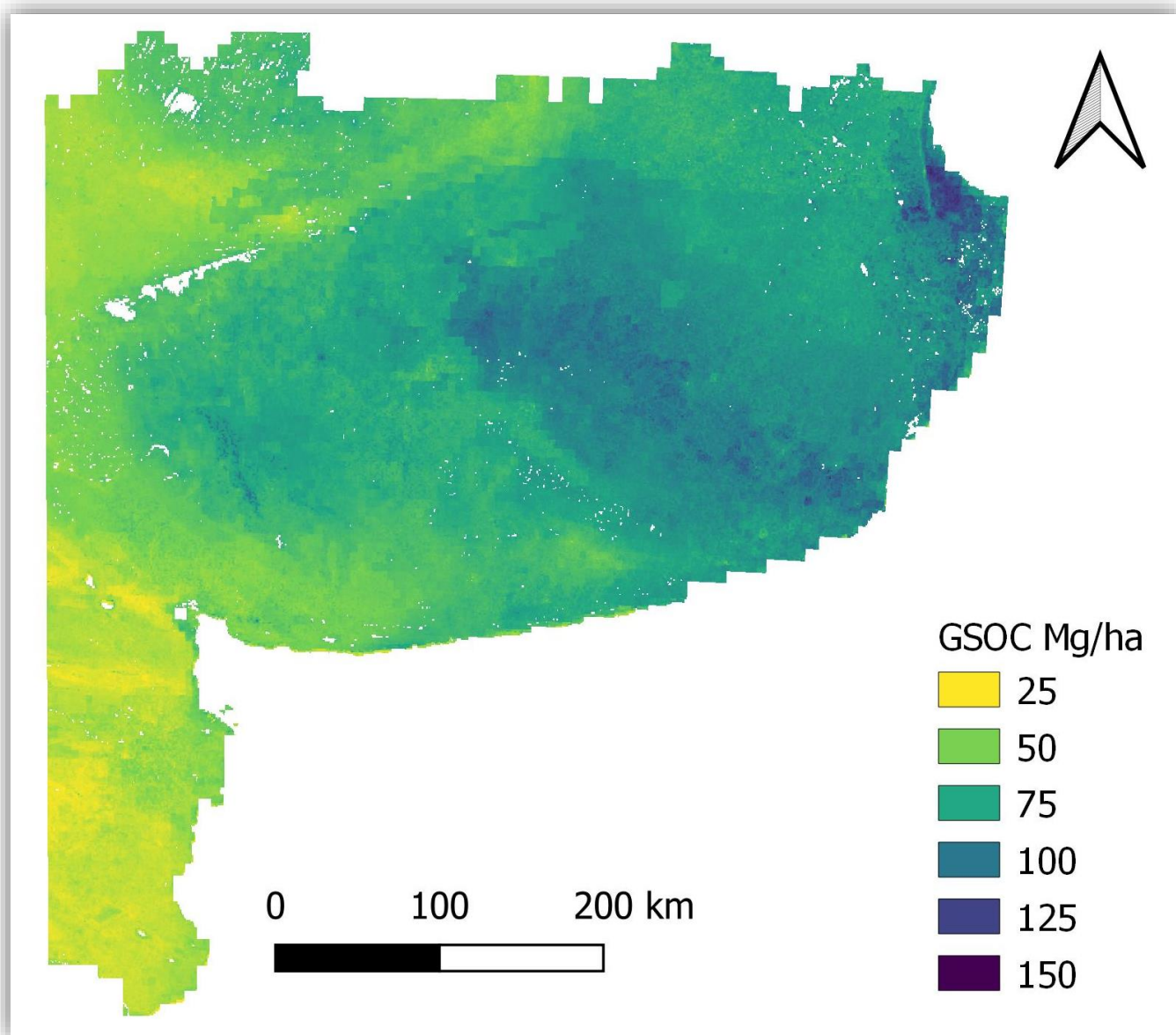
*Figura 9. Exposición de las laderas.*

En la Fig. 9 se puede observar la exposición de las laderas, en rojo exposición al norte, amarillo al este, blanco al sur y verde al oeste. En la zona Sudoeste no está clara la orientación de las laderas, pero se puede observar que hay una pendiente desde el continente hacia el mar, producto de fluctuaciones en el nivel del mar a lo largo de miles de años. La zona Noroeste tampoco es clara, pero se observa que el terreno es más llano. Esta zona coincide con la Pampa Areonosa. La zona Centro-norte tiene relieve con predominancia de exposición al norte, y en la Sudeste la predominancia es de laderas con





exposición al oeste. También se observa como a partir del sistema de lagunas en cadena de Guaminí cambia el relieve serrano del sistema de Ventania a un relieve plano. Al sur del sistema de ventania se extiende una planicie suavemente ondulada. Al noreste del sistema de Tandilia se ve el cambio hacia la Pampa Deprimida. En la zona costera sur predominan la exposición oeste.



*Figura 10. Global Soil Organic Carbon Map de FAO (GSOCmap 0-30).*

En el mapa del GSOC (Fig. 10) se observan que los valores de COS aumentan de sentido sudoeste a noroeste. Como indica la matriz de correlación para la variable longitud, los valores de COS aumentan de oeste a este, siendo los mayores cercanos al Sistema de Tandilia (zona Sudeste).

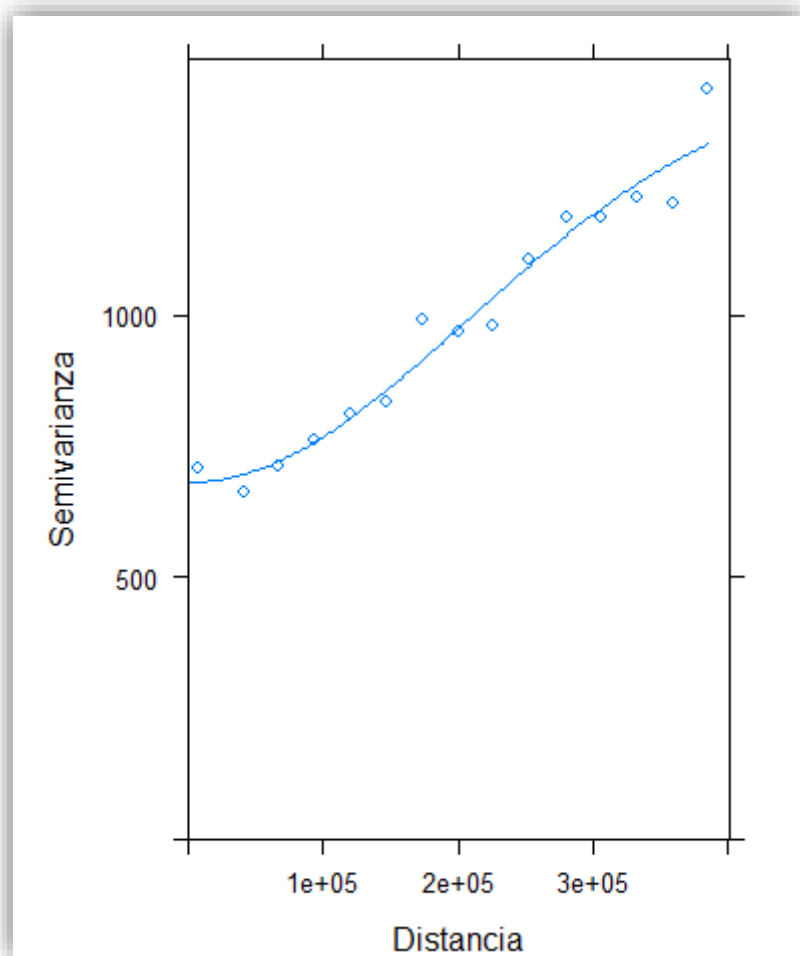
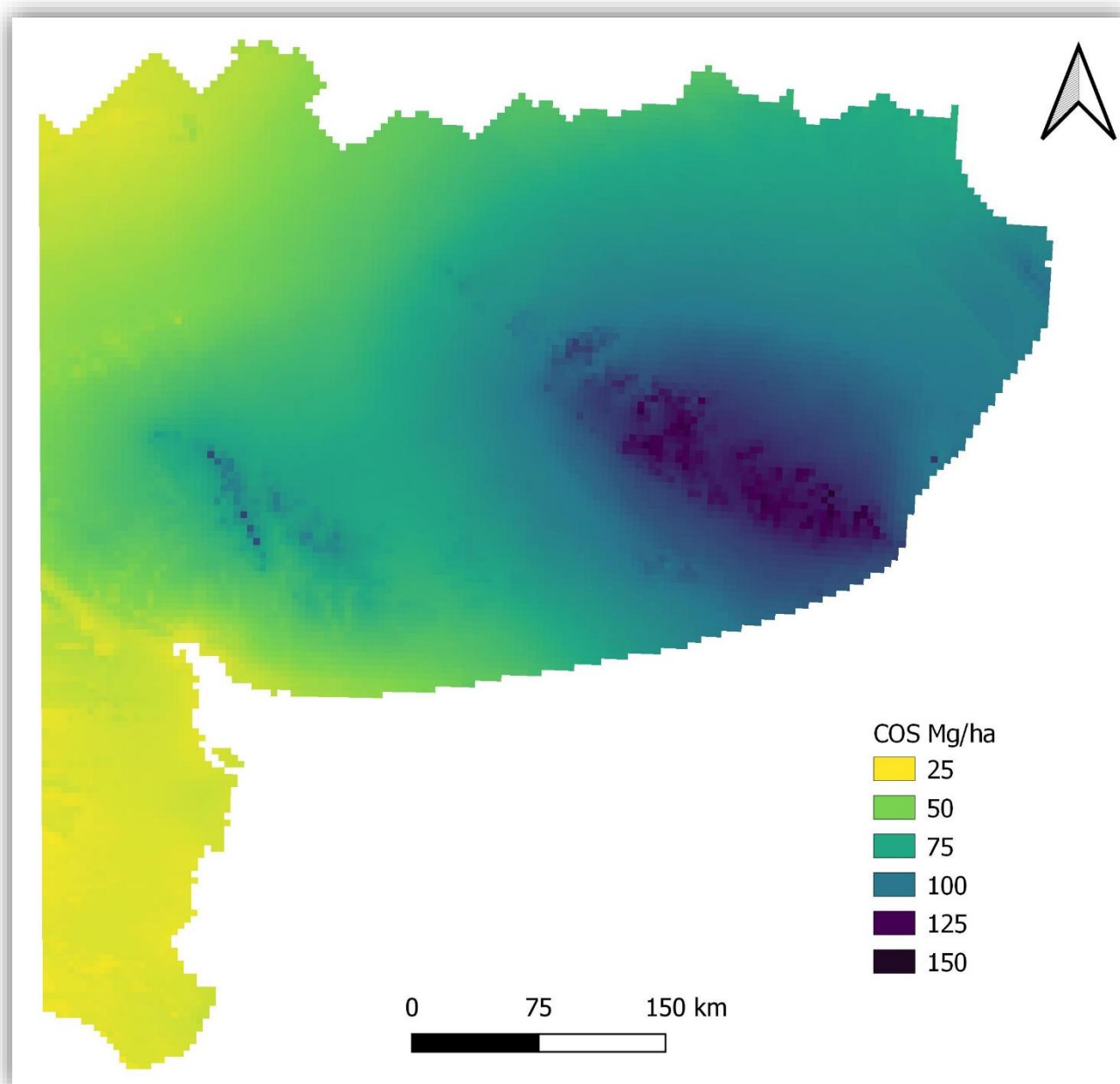


Figura 11. Semivariograma COS 0-30.

El semivariograma obtenido (Fig. 11) presenta buen ajuste, los puntos se posicionan sobre la curva. Demostrando que hay una marcada relación espacial entre los datos analizados. Se seleccionó el modelo de ajuste Gaussiano.



*Figura 12. Mapa de distribución espacial del COS 0-30 cm.*

Se obtuvo un mapa de COS 0-30 para el centro sur de la Provincia de Buenos Aires mediante interpolación con *Kriging Universal* (Fig. 12), a partir del semivariograma (Fig. 11). La densidad de puntos fue de 1 observación cada 40000 ha, generando un producto cartográfico a escala 1:500.000 (reconocimiento). Al igual que en el mapa del GSOC, se observa que los valores de COS crecen en sentido sudoeste hacia noreste. Los valores máximos de COS



se encuentran en la zona alrededor de los sistemas de Tandilia y Ventania. Los valores mínimos se encuentran en el sudoeste, partido de Patagones. La distribución de COS 0-30 muestra una tendencia a relacionarse espacialmente con la evapotranspiración potencial (inversamente) y la precipitación regional (directamente). Sin embargo, hay sectores con comportamiento diferencial, como son las cercanías al Sistema de Ventania (valores altos).

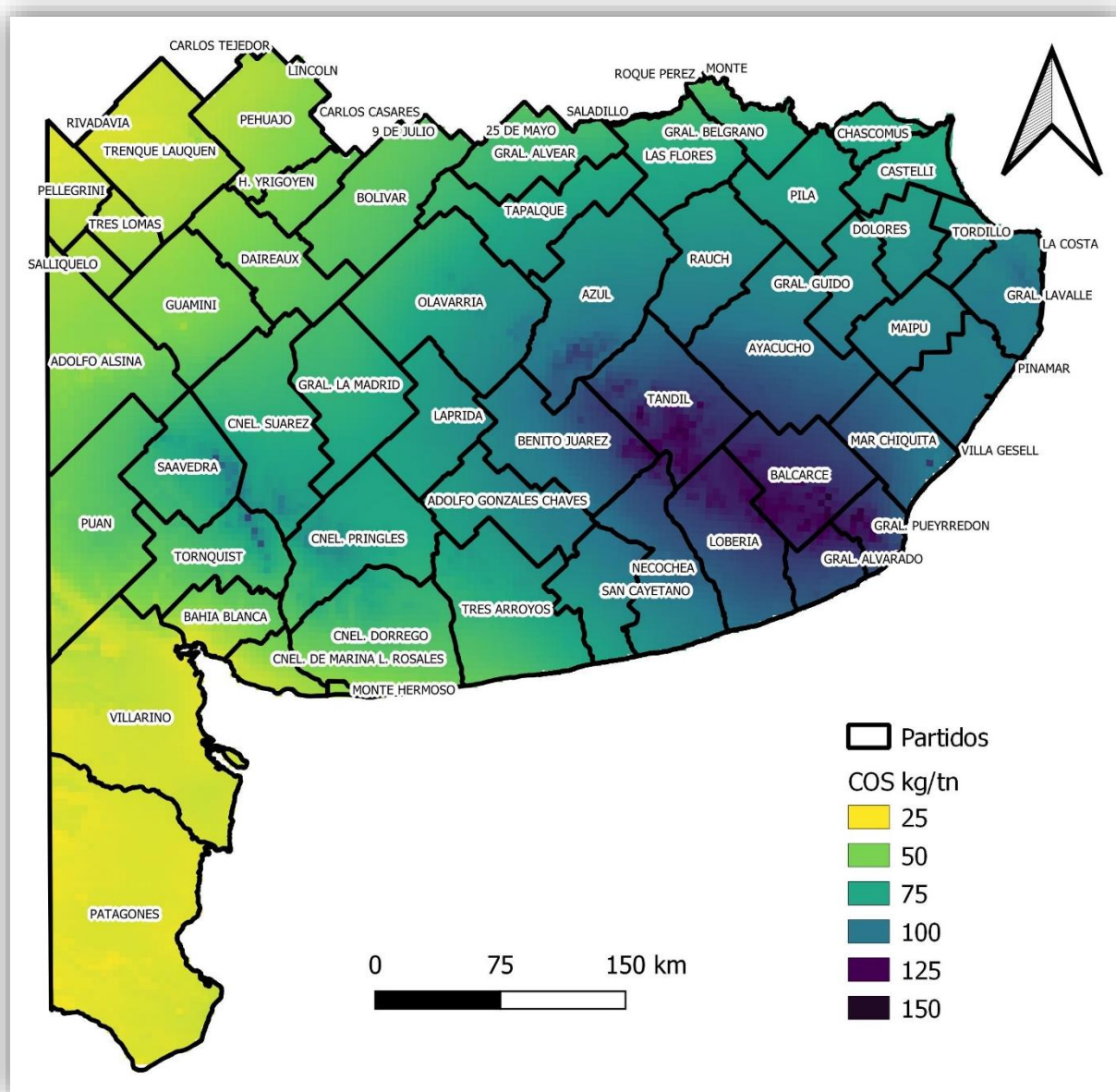


Figura 13. Mapa de COS 0-30 con delimitación de partidos.



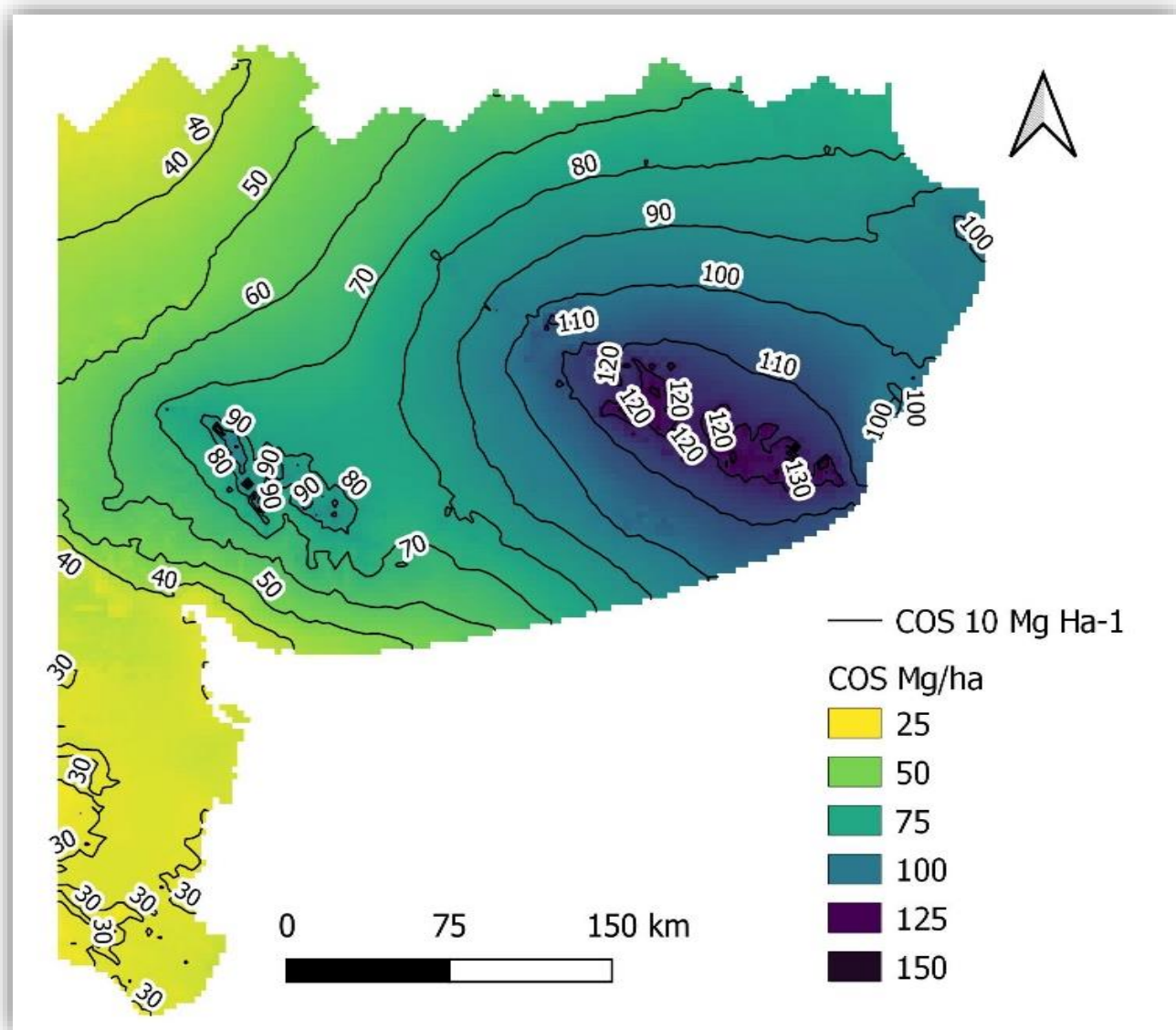


Figura 14. Curvas de COS cada 10 Mg Ha<sup>-1</sup>.

En la Fig. 14 se puede observar curvas que unen puntos de COS de igual valor, en un rango de 10 Mg ha<sup>-1</sup> entre curvas. Las de mayor valor están en los sistemas serranos, y las de menor valor en los partidos de Villarino y Patagones.



## RELACIÓN ENTRE VARIABLES ANALIZADAS

Latitud	1																			
Longitud	0,539	1																		
<b>COS 30 cm</b>	<b>0,303</b>	<b>0,562</b>	1																	
OTCL_1	-0,141	-0,189	-0,115	1																
OTCL_2	-0,140	-0,123	-0,008	-0,177	1															
OTCL_3	0,227	0,229	0,125	-0,259	-0,690	1														
GSOCmap	0,534	0,701	<b>0,754</b>	-0,179	-0,059	0,198	1													
<b>Kriging</b>	<b>0,450</b>	<b>0,813</b>	<b>0,743</b>	-0,146	-0,036	0,145	<b>0,865</b>	1												
Precipitaciones	0,908	0,729	<b>0,489</b>	-0,198	-0,104	0,221	0,713	<b>0,709</b>	1											
valley_dep	-0,115	0,283	0,110	0,000	-0,037	0,070	0,060	0,155	-0,008	1										
twi	-0,042	0,004	-0,039	-0,070	-0,037	0,102	-0,069	-0,087	-0,053	0,018	1									
sombrado a	-0,111	0,057	-0,009	0,022	0,101	-0,123	0,000	-0,007	-0,045	-0,021	-0,172	1								
relativesl	-0,096	-0,213	0,021	0,040	0,044	-0,094	0,012	-0,001	-0,089	-0,372	-0,311	0,036	1							
pendiente	0,074	0,031	0,053	0,012	0,036	-0,056	0,052	0,126	0,118	-0,055	-0,708	0,248	0,120	1						
dem	0,068	-0,300	0,139	0,048	0,146	-0,138	0,232	0,173	0,140	-0,234	-0,182	-0,082	0,416	0,171	1					
closed dep	-0,201	-0,336	<b>-0,240</b>	0,148	-0,243	0,088	-0,261	<b>-0,285</b>	-0,281	-0,171	-0,199	0,105	-0,042	0,090	-0,012	1				
Channel Ne	0,078	-0,306	0,126	0,042	0,150	-0,135	0,227	<b>0,164</b>	0,145	-0,227	-0,158	-0,088	0,354	0,167	0,994	-0,009	1			
aspecto	-0,075	-0,140	0,010	0,066	0,002	-0,004	-0,006	-0,033	-0,090	-0,016	-0,014	-0,526	0,065	-0,032	0,156	-0,071	0,157	1		
ETP	-0,716	-0,904	<b>-0,595</b>	0,187	0,091	-0,210	-0,785	<b>-0,876</b>	-0,871	-0,118	0,027	0,011	0,084	-0,062	-0,034	0,319	-0,033	0,091	1	
	Latitud	Longitud	<b>COS 30 cm</b>	OTCL_1	OTCL_2	OTCL_3	GSOCmap	<b>Kriging</b>	Precipitacio	valley_dep	twi	sombrado a	relativesl	pendiente	dem	closed dep	Channel Ne	aspecto	ETP	

Tabla 1. Matriz de correlación entre variables incluidas en el estudio. En negrita, coeficientes de correlación( $r$ )>0,16 son significativos con  $p<0,05$ .

Se tomaron algunos puntos según las 4 zonas subdivididas (Sudoeste, Sudeste, Noroeste y Centro-norte) y se realizó el análisis estadístico correspondiente.

	Sudoeste	Noroeste	Centro-norte	Sudeste
n	82	36	57	36
Media	31,18	47,04	79,74	112,42
Mediana	28,37	43,12	80,74	113,83
Asimetría	1,5	0,59	0,34	-0,22
Q1	21,03	32,09	55,83	88,87
Q3	38,38	60,85	95,73	136,31
Kurtosis	3,55	-0,29	0,07	0,36

*Tabla 2. Análisis estadístico según zonas.*

Los resultados de la tabla 2 indican que para la zona Sudoeste el valor medio de carbono es de 31,18 Mg ha<sup>-1</sup> y la mediana es de 28,37 Mg ha<sup>-1</sup>, el valor del coeficiente de asimetría es 1,5, por lo tanto, la curva es asimétrica, lo que quiere decir que la moda está posicionada en contenidos bajos de carbono. El valor de kurtosis indica que los datos están concentrados en torno a la media, es una curva leptocúrtica. El Q1 involucra el 25% de los datos más bajo, es decir, el 25% de los pedones se encuentra por debajo de 21,03 Mg ha<sup>-1</sup>. Entre Q1 y Q3 se ubican el 50% de los datos, que representan los valores del 21,03 a 38,38 Mg ha<sup>-1</sup>.

En la zona Noroeste la media es de 47,04 Mg ha<sup>-1</sup>, y la mediana de 43,12 Mg ha<sup>-1</sup>. El coeficiente de asimetría (0,59) indica que hay asimetría positiva. El 50% de los datos se encuentra entre los valores de 32,09 y 60,85 Mg ha<sup>-1</sup>. La distribución de los valores es platocúrtica.

La zona Centro-norte tiene una media de 79,74 Mg ha<sup>-1</sup> y la mediana corresponde a 80,74 Mg ha<sup>-1</sup>. El valor de asimetría se encuentra dentro de los límites aceptados, por lo que se considera que la curva tiene una distribución normal, la media y la mediana tienen valores similares. El 50% de los datos se encuentra entre 55,83 y 95,73 Mg ha<sup>-1</sup>. La distribución de los valores es platocúrtica.

Por último, la zona Sudeste presenta la media más alta, corresponde a 112,42 Mg ha<sup>-1</sup>, y la mediana es de 113,83. El coeficiente de asimetría se encuentra dentro de los límites, la curva tiene una distribución normal, y se puede la media y la mediana presentan valores similares. El 50% de los datos se encuentra entre 88,87 y 136,31 Mg ha<sup>-1</sup>. La distribución de los valores es platokúrtica.

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
COS 0-30	212	0,58	0,57	43,26

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	196647,63	3	65549,21	93,82	<0,0001
Columnal	196647,63	3	65549,21	93,82	<0,0001
Error	145315,85	208	698,63		
Total	341963,48	211			

### Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=14,02164

Error: 698,6339 gl: 208

Columnal	Medias	n	E.E.	
Sudoeste	31,18	82	2,92	A
Noroeste	47,04	36	4,41	B
Centro norte	80,27	58	3,47	C
Sudeste	112,42	36	4,41	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Tabla 3: ANOVA de las medias de las cuatro zonas.

A partir del resultado del ANOVA se demuestra que hay diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las medias de las zonas. Es factible la subdivisión de estas 4 zonas según su contenido de COS para aplicar distintas técnicas apropiadas de manejo y conservación del COS.

### Medidas resumen

Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Mediana	Q1	Q3	Asimetría	Kurtosis
COS 30 cm	501	64,86	35,71	6,29	204,52	57,57	39,06	84,04	0,89	0,57

Tabla 4. Análisis estadístico sobre todas las muestras ( $n=501$ ).

El 50% de los datos de este estudio se encuentra entre los valores de 39,06 y 84,04 Mg ha<sup>-1</sup>. El valor mínimo de carbono de la base de datos es 6,29 Mg ha<sup>-1</sup>, y el máximo 204,52 Mg ha<sup>-1</sup>. La media es de 64,86 Mg ha<sup>-1</sup>, y la

mediana  $57,57 \text{ Mg ha}^{-1}$ , la diferencia entre ambas y el valor de asimetría (0,89) indica que la curva es asimétrica positiva. El valor de kurtosis mayor a 0 y menor a 3 indica que los datos presentan valores atípicos más extremos que lo normal, con una baja concentración de datos en torno a la media, dando una curva platokúrtica.

Los resultados de la matriz de correlación (tabla 1) indican que los datos de COS 30 relevados a campo demostraron tener una alta correlación con el mapa *Global Soil Organic Carbon Map* de FAO (GSOCmap 0-30) (Fig. 10), mostrando un excelente ajuste ( $r=0,75$ ,  $p<0,001$ ). Las variables con la que el COS tiene mayor correlación son: evapotranspiración potencial ( $r=-0,59$ ), precipitaciones medias anuales ( $r=0,48$ ) y closed dep ( $r=-0,24$ ).

El producto obtenido mediante *kriging* también tuvo una alta correlación con el GSOCmap ( $r=0,87$ ). Las variables que mayor correlacionan con el mapa son la evapotranspiración potencial ( $r=-0,88$ ) y las precipitaciones medias anuales ( $r=0,71$ ). Con la evapotranspiración la relación es inversa; a mayor evapotranspiración, menor COS acumulado. Dentro del área de estudio, la zona de mayor evapotranspiración es la Sudoeste, donde se encuentran los niveles más bajos de COS. En el caso de las precipitaciones, la relación es directa; el COS aumenta con las precipitaciones. La zona de mayor COS es la Sudeste, comprendida entre las isohietas de 900 mm y 1000 mm, y por encima de la isohieta de 1000 mm se registran valores de COS intermedios a altos (zona Centro-norte). Los índices derivados del DEM y el índice de clorofila terrestre no presentaron mayor explicación en el COS, aunque se esperaba lo contrario. En cambio, la latitud ( $r=0,45$ ) y la longitud ( $r=0,81$ ) resultaron ser significativas.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se logró obtener una base de datos edáfica para la región (objetivo nº 1). Debido a la importancia de las variables edáficas, especialmente del COS, en estudios de mitigación climática y predicciones relacionadas a la seguridad alimentaria, es importante en el futuro ampliar las bases de datos de suelos en el mundo.

El estudio regional que incluyó 501 pedones georreferenciados en un área de  $20 \cdot 10^6$  ha permitió observar una marcada variabilidad en la distribución espacial de COS. Para el total de la región los valores de COS 0-30 cm para los perfiles presentan una distribución asimetría positiva y platokúrtica, con un rango de 6,29 a 204,54  $\text{Mg ha}^{-1}$ . El 50 % de los datos se encuentran entre 39 y 84  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Los partidos de Villarino y Patagones (pampa semiárida) presentan un valor promedio de 32  $\text{Mg ha}^{-1}$  y la mayoría de los datos se ubican entre 21 y 39  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Por otro lado, los partidos de Balcarce, Lobería, Gral. Alvarado y Gral. Pueyrredón (pampa húmeda) alcanzan una media de 114  $\text{Mg ha}^{-1}$ , mientras la mitad de los valores de COS 0-30 se ubican en el rango que va de 93 a 141  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Estos resultados ponen de manifiesto la marcada variabilidad espacial del carbono almacenado en los suelos.

Se pudo generar un mapa de distribución espacial del COS en los primeros 30 cm del suelo (objetivo nº 2). Se puede afirmar que los valores de COS aumentan con la distribución de las precipitaciones y disminuyen con el aumento de la evapotranspiración. La evapotranspiración explica el 35% de la variabilidad espacial del COS, mientras que las precipitaciones explican el 25%. La latitud y longitud también explican en parte la variabilidad, esto se puede confirmar tanto en el producto estudiado como en el mapa del GSOC. Las otras variables analizadas no aportaron a la explicación de la variabilidad del COS. Para posteriores análisis podrían considerarse variables edáficas tales como materiales parentales (textura) y uso de la tierra. El uso de la tierra aparenta tener alta incidencia en el COS, disminuyendo los valores de COS en planteos agrícolas de labranza convencional. Planteos conservacionistas con mínima labranza y ganaderos tienen mayores retenciones de carbono.



Se puede dividir el área general en 4 zonas: Sudoeste, Sudeste, Noroeste y Centro-norte. El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas entre los 4 sectores analizados. Las características diferenciales deben ser consideradas al establecer planes de mitigación regional en cuanto al cambio climático, favoreciendo el secuestro de C en suelos pobres, como los del sur de la provincia, y previniendo su liberación en suelos ricos, como los de la zona centro-este.

La validación del producto se realizó comparándolo al GSOC, con el presenta un excelente ajuste ( $r=0,87$ ) (objetivo nº 3). Las ventajas de las técnicas de interpolación son numerosas, siendo que el muestreo y posterior análisis de laboratorio es costoso y laborioso, la estadística brinda la oportunidad de estimar variables como el COS fácilmente. La principal desventaja es la precisión de la interpolación, esta depende de la técnica utilizada, la cantidad de datos utilizados y la distancia entre los mismos, la variabilidad en el uso del suelo y no tener suficientes variables con alta correlación que no necesiten ser relevadas del área de estudio, tales como imágenes satelitales o datos climáticos.

Por lo realizado en el trabajo, se puede concluir que, aunque el COS presenta alta variabilidad espacial, se puede dividir el área de estudio en subregiones para su adecuado tratamiento. Considerando que; el COS es muy importante en la productividad agrícola y ganadera, impactando en las propiedades edáficas. Se estima que para el año 2050 la población mundial llegue a 9700 millones de personas (ONU), para lo que se necesitará suelos más productivos para obtener más cantidad de alimentos. El COS juega un papel importante en el cambio climático. Y teniendo en cuenta el aumento de las temperaturas medias en todo el mundo en los últimos 300 años (IPCC, 2013) debido al aumento de la emisión de GEI, siendo el suelo una importante reserva de estos, especialmente de C (el principal GEI), conocer la variabilidad del COS, y aumentar las bases de datos edáficas, para poder tomar políticas conservacionistas será de suma importancia, para asegurar en el futuro una adecuada provisión de alimentos y encaminarse hacia la prevención y mitigación del cambio climático.

## BIBLIOGRAFÍA

Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch. (2018). Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, Scientific Data 5:170191, doi:10.1038/sdata.2017.191

Aliaga, V S. (2018). Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Nacional del Sur (RID-UNS). 193 p

Batjes, N. (1996). Total Carbon and Nitrogen in the Soils of the World. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>

Bravo, O A. (2013). Factores y procesos pedogenéticos que regulan el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de la Pampa Austral [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Nacional del Sur (RID-UNS). 164 p

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

FAO. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. *World soil reports 96*. Rome, 58 p.

FAO. (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia

FAO and ITPS. (2020). Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO.

Henríquez, Carlos & Freddy, Sancho & Villatoro-Sanchez, Mario. (2008). Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32.

INTA. (1989). Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires 1:500.000. 525 p.

IPCC. (2013): "Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M.

Midgley (eds.). (2013). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Nachtergaele, F. O., van Velthuisen, H., Verelst, L., Batjes, N. H., Dijkshoorn, J. A., van Engelen, V. W. P., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., Wilberg, D., & Shi, X. (2008). Harmonized World Soil Database (version 1.0). Food and Agric Organization of the UN (FAO); International Inst. for Applied Systems Analysis (IIASA); ISRIC - World Soil Information; Inst of Soil Science-Chinese Acad of Sciences (ISS-CAS); EC-Joint Research Centre (JRC). <https://edepot.wur.nl/30776>

Lal, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 116(3), 353-362. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00211-1)

Martínez H, Eduardo, Fuentes E, Juan Pablo, & Acevedo H, Edmundo. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>

Nocelli Pac, S. (2018). *Evolución de Siembra Directa en Argentina. Campaña 2016-2017*. 8 p

Olson, K, Al-Kaisi, M, Lal, R, & Cihacek, L. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71, 61A-67A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.61A>



PEREYRA, F. X. (2018). Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas – Ordenamiento territorial N°9. 85 pp

QGIS.org. (2021). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>

R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Rawls, W J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*, 135: 123-125.

Sainz Rozas, Hernán René, Echeverria, Hernán Eduardo, & Angelini, Hernán Pablo. (2011). Niveles de carbono orgánico y ph en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del suelo*, 29(1), 29-37. Recuperado en 24 de octubre de 2021, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672011000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100004&lng=es&tlng=es).

Scoppa C O, Di Giacomo R M. (1998). Edafogénesis pampeana. *Anales de la ANAV*, LII, 7-38. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/30629>

Soil Survey Staff. (1999). Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436. 869 p