

## SIGUIENDO LA PISTA

### Cartografía digital de las propiedades edáficas superficiales en el área de Riello, noroeste de León.

Carmen Vega Valdés<sup>1</sup>, Montserrat Ferrer Julià<sup>2</sup>, Sara Alcalde Aparicio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduada en Ciencias Ambientales (Curso 2017-2025)

<sup>2</sup> Tutora del Área de Geodinámica Externa, Departamento de Geografía y Geología

<sup>3</sup> Cotutora del Área de Edafología, Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias

#### Resumen

Ante la escasa disponibilidad de datos edáficos y su creciente demanda, ha surgido la Cartografía Digital de Suelos (*Digital Soil Mapping*, DSM), con la finalidad de generar mapas continuos de variables edafológicas. El presente trabajo tiene como objetivo elaborar una cartografía de las propiedades edáficas superficiales –arcilla, arena, limo y materia orgánica– en la zona de Riello (León), mediante la aplicación del método DSM basado en el modelo *scorpan*. Para su desarrollo, se utilizaron datos edáficos procedentes de muestreos y perfiles, así como covariables ambientales representativas de los factores formadores del suelo. Con estos datos se realizó un análisis estadístico mediante regresión lineal múltiple (MLR), siguiendo un proceso de calibración y validación, obteniéndose el mejor modelo predictivo para cada variable, junto con sus residuos y error asociado.

Los resultados muestran que la materia orgánica es la variable con mejor ajuste al modelo ( $R^2 > 0,50$ ), mientras que el limo presenta el valor más bajo ( $R^2 = 0,37$ ). En consonancia, el error cuadrático medio (RMSE) más bajo corresponde a la materia orgánica (2,06), y el más alto al limo (9,70). Finalmente, se ha concluido que, a pesar de sus limitaciones, la aplicación del modelo *scorpan* en la cartografía digital de suelos constituye una herramienta valiosa en áreas de estudio con pocos datos de suelos.

#### Palabras clave

Cartografía Digital de Suelos, covariables ambientales, factores formadores del suelo, geoestadística, modelo *scorpan*, regresión lineal múltiple.

#### Introducción y objetivos

Históricamente los estudios edafológicos se centraron en la identificación, clasificación e inventario de los suelos. No obstante, en las últimas décadas, han evolucionado hacia un enfoque centrado en el medioambiente, que entiende que el suelo es una parte integral del ecosistema, que interactúa con los factores

ambientales, derivando en patrones complejos y procesos de coevolución a lo largo del tiempo (Jenny, 1994; Hartemink *et al.*, 2001; Grunwald, 2009). Este cambio ha derivado en un aumento de la demanda de (i) datos del suelo e (ii) información que permita monitorizar y modelizar las variables edáficas y ambientales (Grunwald *et al.*, 2011; Belkadi y Drias, 2023).

Como respuesta a dicho aumento y dada la limitada disponibilidad de datos edáficos, ha surgido la Cartografía Digital de Suelos, “*Digital Soil Mapping*” (DSM).

Este tipo de cartografía genera mapas digitales de propiedades y clases de suelos, así como bases de datos del suelo geográficamente referenciadas con una resolución definida, mediante sistemas empíricos de inferencia que relacionan observaciones puntuales del suelo con variables ambientales espacialmente referenciadas, (McBratney *et al.*, 2003; Lagacherie y McBratney, 2006; Carré *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2019).

Entre las ventajas que presenta el método seguido en DSM frente a la cartografía tradicional de los suelos destacan el menor coste, la consistencia de los datos, la actualización sencilla y la estimación de las incertidumbres (Carré *et al.*, 2007; Alemán-Montes *et al.*, 2019).

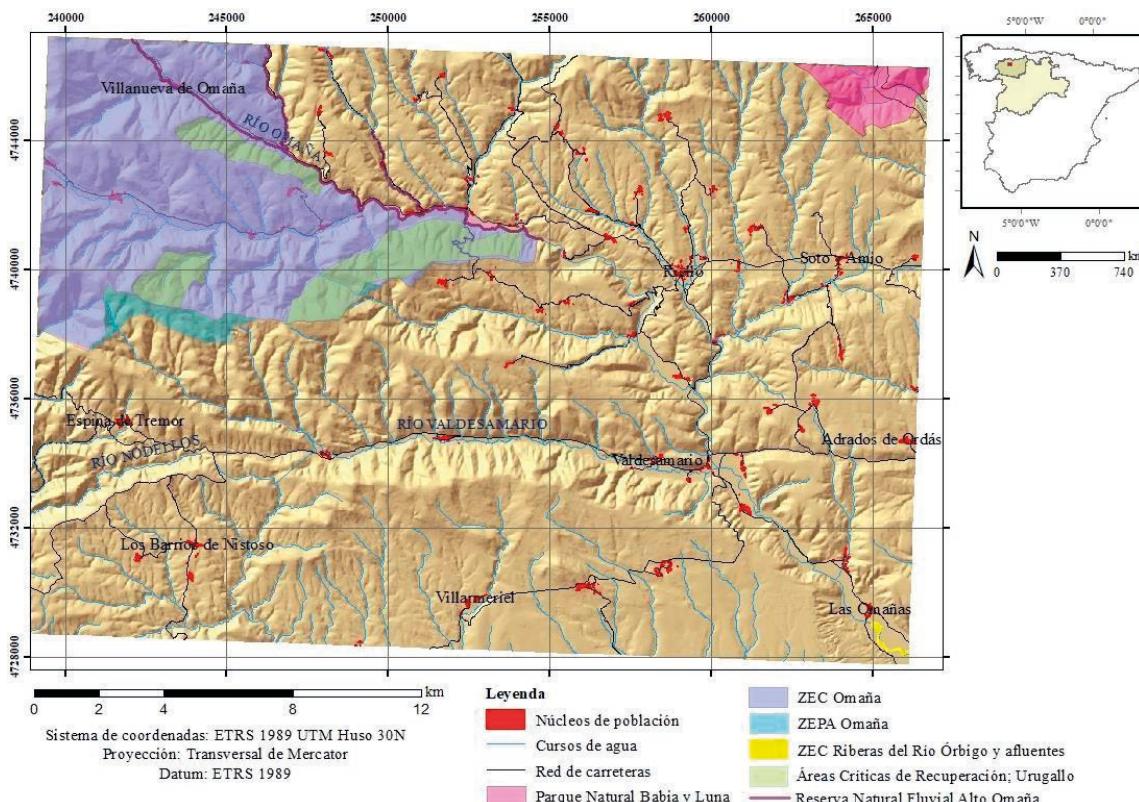
El objetivo principal de este trabajo es la realización de un mapa digital de las propiedades del suelo, concretamente de los porcentajes de arcilla, arena, limo y materia orgánica, en la zona de Riello, en la provincia de León, mediante la aplicación del método *Digital Soil Mapping*, basado en el modelo *scorpan*.

## Área de estudio

El área de estudio se corresponde con la hoja 128 (Riello) del Mapa Topográfico Nacional, en la provincia de León (**Fig. 1**). Esta área abarca principalmente las comarcas de Omaña y Cepeda, con altitudes entre los 900 y 1.834 m.s.n.m. La mayor parte del territorio pertenece a la cuenca hidrográfica del Duero, siendo el río principal el Omaña. Destaca su rica biodiversidad y su alta variedad florística, faunística y paisajística (Junta de Castilla y León, sin fecha; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024).

La temperatura media anual de la zona es de 9,2 °C, con una precipitación media anual de 874,5 mm y una evapotranspiración potencial (ETP) media anual de 610,9 mm, (León Llamazares *et al.*, 1991). Siguiendo la clasificación climática de Köppen se puede determinar que la zona de estudio se corresponde con un clima mediterráneo de veranos frescos, caracterizado por temperaturas bajas (Chazarra Bernabé *et al.*, 2018). Respecto a la litología, la zona de estudio está conformada principalmente por dos grupos de materiales correspondientes con el Precámbrico y el Paleozoico, repartidos respectivamente, en la zona norte y sur de la hoja, con afloramientos de materiales del Carbonífero y Cretácico (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).

A nivel geomorfológico, predominan las formas montañosas al corresponderse en su mayoría a la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica, presentando un relieve de tipo apalachiense (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).



**Figura 1.** Localización y figuras de protección.

Edafológicamente, los suelos que cubren la superficie de la hoja 128, siguiendo la clasificación de la FAO (1998), son en su mayoría asociaciones de Cambisol dístico / Regosol dístico, desarrollados sobre areniscas, pizarras y cuarcitas del Precámbrico y Paleozoico. En menor medida, predominan las asociaciones de Leptosol úmbrico / Regosol léptico, con inclusiones de Cambisol eútrico desarrolladas principalmente sobre pizarras y areniscas del Precámbrico y Paleozoico (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).

En cuanto a los usos del suelo y la vegetación, predomina el uso forestal, que ocupa el 94 % de la superficie del área de estudio. Dentro del uso forestal se incluye la superficie cubierta por matorrales, la cual ocupa en torno al 41 % de superficie total de estudio, seguida por las masas de frondosas, coníferas y mixtas (36 %) y los prados y pastizales (17 %) (Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), sin fecha; Alonso Herrero *et al.*, 2010)

## Material y métodos

### Modelo scorpan

La metodología aplicada en este trabajo para la realización de la cartografía digital del suelo se fundamenta en el modelo *scorpan*. Este modelo proporciona descripciones cuantitativas y empíricas de las relaciones entre el suelo y otros factores referenciados espacialmente, con la finalidad de establecer funciones de predicción de las propiedades edáficas. Se basa en la siguiente ecuación (Ec. 1), que posibilita la predicción de las clases del suelo ( $S_c$ ) o de sus atributos ( $S_a$ ) (McBratney *et al.*, 2003; Minasny y McBratney, 2016).

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon \quad o \quad S_a = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon \quad [\text{Ec. 1}]$$

Los siete factores formadores del suelo, también denominados variables ambientales, que definen esta función son: el suelo (s), el clima (c), los organismos (o), la topografía (r), el material parental (p), la edad (a) y la posición espacial (n). Se ha de destacar que este modelo incluye el suelo como un factor formador, debido a que puede predecirse a partir de sus clases y propiedades medidas en campo. Igualmente, esta ecuación incluye un término de error ( $\varepsilon$ ), que representa las desviaciones del modelo con respecto al valor observado (McBratney *et al.*, 2003; Belkadi y Drias, 2023). La elección de los factores utilizados en el modelo *scorpan* es una cuestión de conveniencia, determinada por la zona de estudio, y la disponibilidad y acceso a las fuentes de datos. Cada uno de estos factores se define mediante un conjunto de covariables ambientales continuas o categóricas, que deben acondicionarse individualmente para la aplicación del modelo en el área de estudio definida (McBratney *et al.*, 2003).

Para la aplicación del modelo se requieren dos tipos de datos de entrada georreferenciados: los datos correspondientes a las clases del suelo ( $S_c$ ) o a sus atributos ( $S_a$ ), que serán objeto de estudio, provenientes de métodos de observación de campo y de laboratorio; y los datos correspondientes a las covariables ambientales seleccionadas, con información para la totalidad del área de estudio (Lagacherie y McBratney, 2006; Minasny y McBratney, 2016).

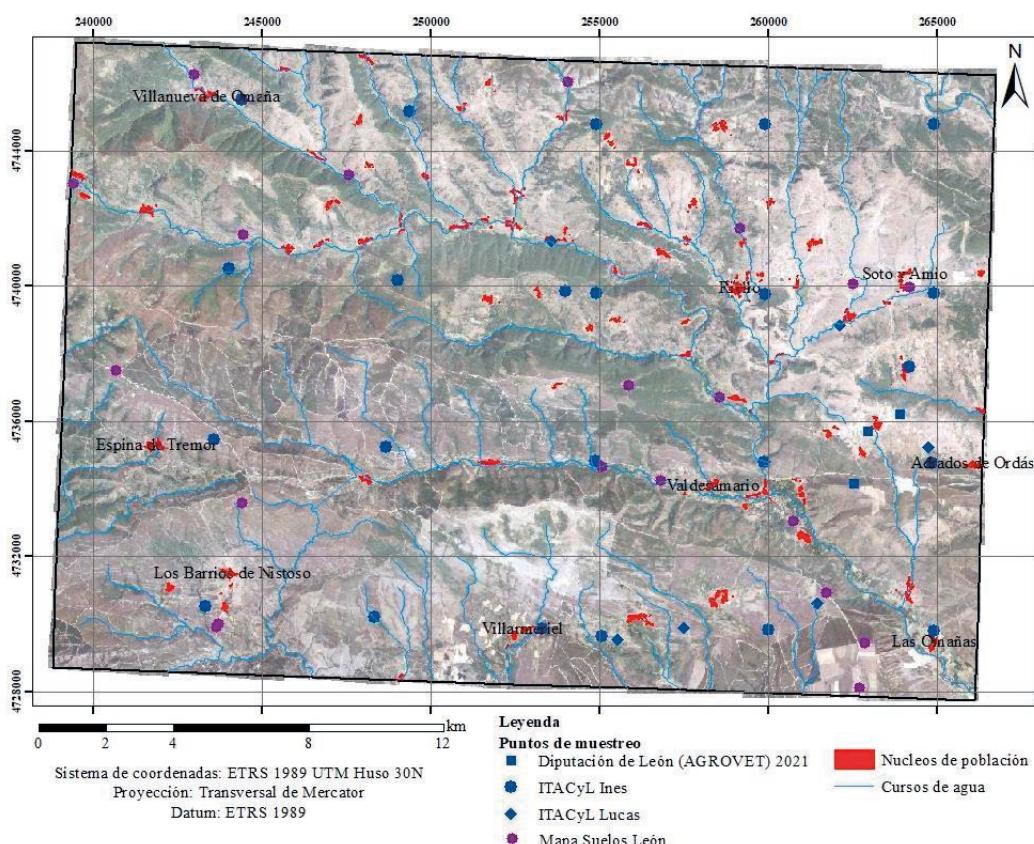
Una vez que se dispone de todos los datos se lleva a cabo una regresión lineal múltiple (RLM), que permite modelizar la relación entre la variable dependiente, el atributo del suelo analizado, y el conjunto de las variables independientes, las covariables ambientales seleccionadas. Para homogeneizar la información, se consideraron únicamente los horizontes A de los perfiles, aplicando una media ponderada cuando existían varios horizontes en un mismo perfil.

Respecto a los factores formadores del suelo, en este trabajo se han seleccionado: la topografía (r), el clima (c), la vegetación (o) y el material parental (p). Se ha omitido la posición espacial (n) al estar definida en los perfiles del suelo e

implícita en todas las covariables ambientales que constituyen los factores seleccionados. Asimismo, no se ha considerado el factor tiempo (a) debido a la falta de cartografía y su elevado error asociado. Recalcar que el suelo (s) se ha usado solo como variable dependiente, sin considerarse como un factor formador.

### Materiales

La información de las variables dependientes objeto de estudio proviene de un total de 52 puntos con datos del suelo localizados dentro del área de estudio (**Fig. 2**), los cuales proceden de dos fuentes de datos: 32 provienen de la Base de Datos de los Suelos de Castilla y León (Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León) —incluyendo datos del INES, proyecto LUCAS y la Diputación de León—, y 20 perfiles edáficos corresponden al Plan Piloto del Mapa de Suelos de la provincia de León , desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Biodiversidad de la Universidad de León (Alonso Herrero *et al.*, 2010; ITACyL, 2012).



**Figura 2.** Ubicación de los puntos de muestreo utilizados.

Las covariables ambientales se obtuvieron de distintas capas temáticas y recursos disponibles, los cuales fueron estimados y adaptados a la zona de estu-

dio mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG), concretamente el software ArcGIS Desktop 10.7.

Las covariables ambientales correspondientes al factor topografía se estimaron a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la hoja 128, complementado por los MDT de las hojas colindantes para cubrir la cuenca hidrográfica (Instituto Geográfico Nacional, 2020).

Respecto a los datos pertinentes al clima, estos se obtuvieron del modelo SIMPA (Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación). Para el desempeño de este trabajo, se utilizaron los datos de temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación media anual (mm) y evapotranspiración potencial media anual (mm) obtenidos a partir de los mapas promedio anuales para la serie larga de este modelo, la cual recopila todos los datos desde el año 1940 al 2017 (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, sin fecha).

En cuanto a los usos del suelo, estos se obtuvieron a partir de la cartografía del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) del año 2014 (escala 1:25000), en combinación con información de la cartografía del programa CORINE Land Cover del año 2012 a escala 1:100.000, ambas disponibles gratuitamente en el CNIG. De igual manera, con la finalidad de analizar las coberturas y usos del suelo, también se descargaron imágenes del satélite Sentinel-2 L2A correspondientes al año 2017 (resolución espacial de 10m), seleccionándose una para cada mes (Copernicus EU, 2025). Se seleccionó este año por ser el más reciente que presenta valores climatológicos medios similares a los valores medios registrados durante la serie climática del modelo SIMPA.

Finalmente, la información relativa a la litología del área de estudio se obtuvo a partir del mapa geológico continuo GEODE (escala 1:50000), correspondiente a la hoja 128 (González Menéndez *et al.*, 2008).

#### Análisis de los factores formadores del suelo y obtención de las covariables

Para poder implementar el método *scorpan* y analizar las variables edáficas (% arcilla, % arena, % limo y % materia orgánica) ha sido necesario seleccionar y calcular las covariables ambientales. Posteriormente, se extrajeron sus valores en cada uno de los puntos con información edáfica, mediante análisis espaciales de superposición con SIG, obteniéndose así la totalidad de los datos georreferenciados que serán utilizados en la aplicación del modelo.

#### Topografía

Las covariables ambientales que se han utilizado, referentes a la topografía, son la altitud, la pendiente, el índice topográfico de humedad (TWI) y la orientación.

La orientación se transformó en una variable lineal y aplicable al modelo *scorpan*, mediante el Índice de Carga Térmica (*Heat Load Index*), que permite

determinar la orientación en base al número de horas de sol que recibe la superficie (McCune y Keon, 2002).

### Clima

Las covariables temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación media anual (mm), y evapotranspiración potencial media anual (mm) se obtuvieron a partir del modelo SIMPA.

La radiación solar ( $\text{kW}/\text{m}^2 \text{ año}$ ) se calculó para el año 2017, mediante la aplicación del modelo de radiación difusa uniforme, a través de intervalos mensuales (Fu y Rich, 2002).

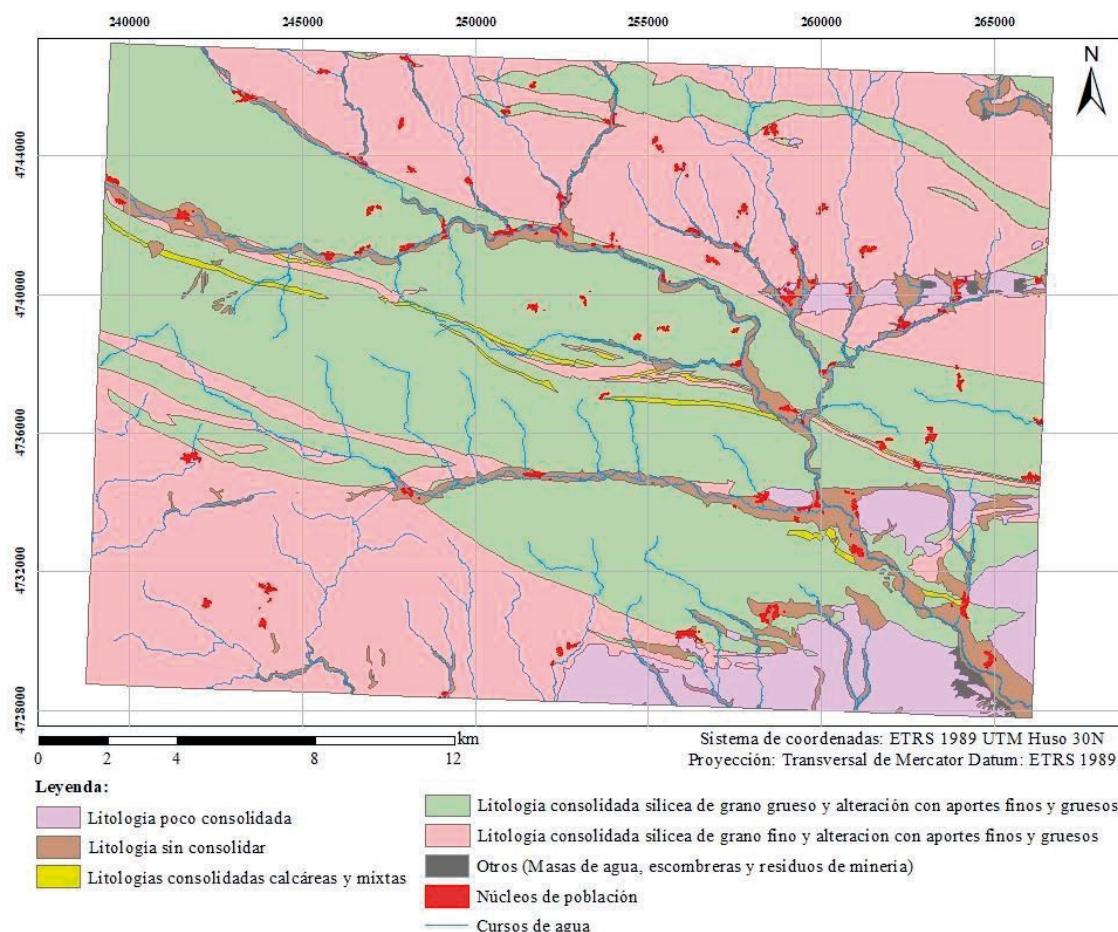
### Vegetación

Las covariables ambientales referentes a la vegetación que se han utilizado son los usos del suelo y los estadísticos derivados de los NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Los usos del suelo se reclasificaron en cinco categorías principales (arbolado; matorral; pastizal; agrícola; otros). Posteriormente, cada categoría se transformó en una capa ráster binaria (valor 1 = categoría presente; 0 = ausente).

El NDVI se calculó para cada uno de los meses, usando las imágenes de la banda 4, correspondiente a la longitud de onda del rojo y la banda 8, correspondiente a la longitud de onda del infrarrojo cercano (NIR). Se ha de resaltar que el cálculo del NDVI se ejecutó diferenciando dos épocas, una época lluviosa (enero a mayo) y otra seca (junio a septiembre), obteniéndose para cada una los valores estadísticos de media, mínimo y máximo.

### Material parental

La covariable ambiental de este factor es la litología (**Fig. 3**). Con la finalidad de reducir su número de clases, se llevó a cabo una reclasificación del mapa, siguiendo la clasificación propuesta por Alonso Herrero (1995), basada principalmente en el grado de consolidación, la naturaleza y la textura del material parental. Mediante la aplicación de estos criterios y su simplificación, se fijaron seis clases litológicas (litología poco consolidada; litología consolidada calcárea y mixta; litología consolidada silícea de grano fino y alteración con aportes finos y gruesos; litología consolidada silícea de grano grueso y alteración con aportes finos y gruesos; otros).



**Figura 3.** Reclasificación de las unidades litológicas.

### Análisis estadístico

Debido al elevado número de covariables, se aplicó un análisis de correlaciones, mediante el coeficiente de Pearson, sobre los NDVI obtenidos, seleccionando aquellos con menor redundancia ( $r > 0,65$  se consideró alta correlación).

El análisis estadístico se realizó mediante el *software SPSS Statistics* y consistió en un proceso de calibración mediante regresión lineal múltiple (MLR) con el método de “eliminación hacia atrás”, empleando todos los puntos, y una validación cruzada (*cross-validation*) con 10 grupos, constituidos por puntos seleccionados aleatoriamente. Al excluirse un número reducido de los datos en cada iteración, las ecuaciones de validación obtenidas no difieren significativamente respecto a las generadas durante el proceso de calibración, respaldándose así la consistencia del modelo y validando su aplicabilidad (Kohavi, 1995). Los modelos seleccionados fueron aquellos estadísticamente significativos ( $p \leq 0,05$ ) y con mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Finalmente, se estimaron los valores de calibración y validación para cada punto de muestreo y se evaluó la calidad de los modelos mediante el cálculo y análisis de sus residuos y su error cuadrático medio (RMSE).

### Análisis con Sistema de Información Geográfica (SIG)

Una vez determinadas las ecuaciones de calibración para cada uno de los atributos del suelo (porcentaje de arcilla, arena, limo y materia orgánica), se procedió a aplicarlas, obteniéndose así sus valores estimados para la totalidad del área de estudio. Para completar la aplicación del modelo *scorpan*, falta estimar el error ( $\varepsilon$ ). Para ello, se interpolaron los valores puntuales de los residuos siguiendo el método de la distancia inversa ponderada (IDW). De este modo se obtuvieron los valores de los residuos de cada una de las variables dependientes, para la totalidad del área de estudio.

Finalmente, se sumaron el ráster que contenía los valores estimados de cada variable dependiente y el ráster de sus residuos interpolados. Como resultado final, se obtuvieron los cuatro mapas finales con los valores porcentuales de arcilla, arena, limo y materia orgánica de los suelos de la hoja 128.

## Resultados

### Resultados del análisis estadístico

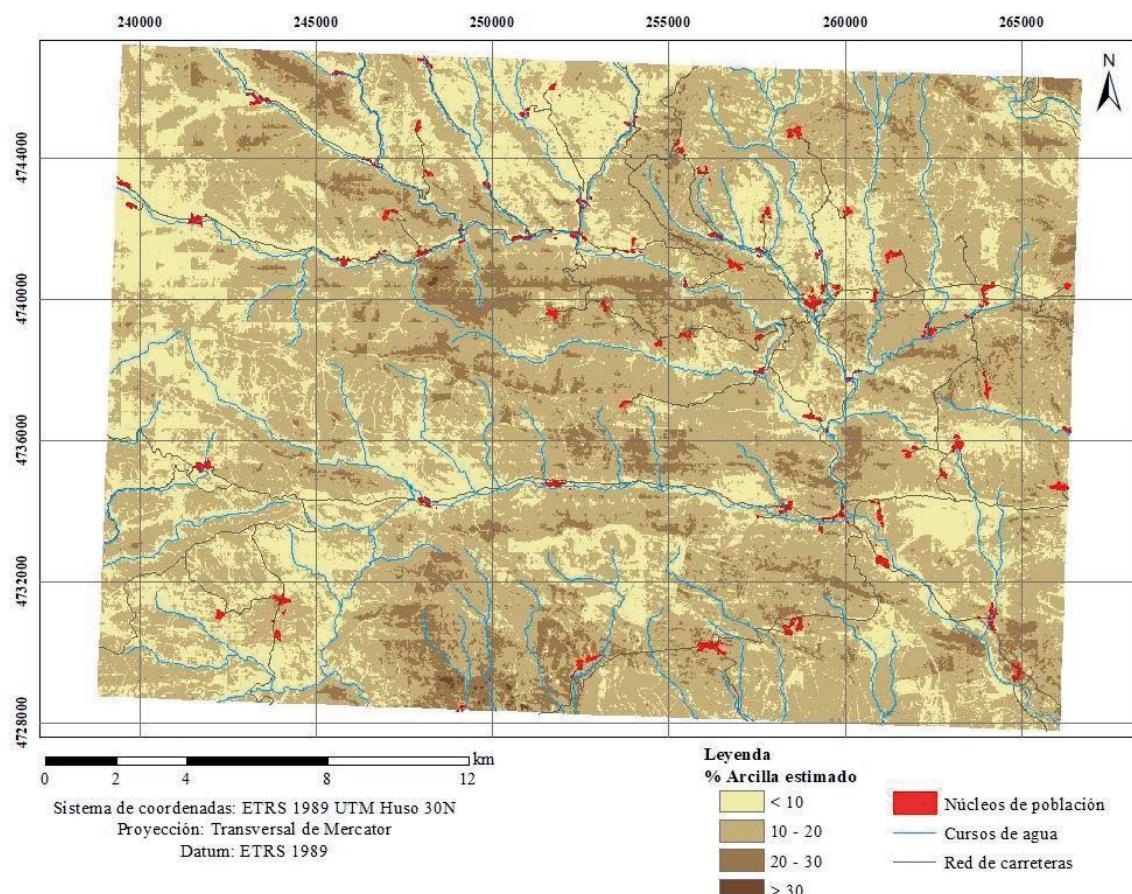
El análisis de correlación con coeficiente de Pearson realizado entre las covariables derivadas del NDVI, ha permitido determinar los NDVI óptimos para la aplicación del modelo *scorpan*. Las covariables elegidas fueron, el NDVI medio de la época seca y el NDVI medio y mínimo de la época húmeda.

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico correspondientes al proceso de calibración para cada una de las variables dependientes estimadas. En el caso de la **arcilla** el modelo seleccionado mostró un valor de diferencia significativa ( $p$ ) de 0,002, un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,489 y un error cuadrático medio (RMSE) de 4,75. Para la **arena**, el modelo presentó un  $p$  de 0,02, un  $R^2$  de 0,376 y un RMSE de 9,49, mientras que en el caso del **limo** el modelo mostró un  $p$  de 0,038, un  $R^2$  de 0,372 y un RMSE de 9,66. Finalmente, para la **materia orgánica** el modelo seleccionado presentó un valor de  $p$  de 0,00, un  $R^2$  de 0,630 y un RMSE de 2,055.

### Resultados del análisis geoestadístico

Como resultado final del análisis geoestadístico, se obtuvieron los cuatro mapas objetivo de este estudio, consigiéndose así las estimaciones porcentuales de los contenidos de arcilla, arena, limo y materia orgánica para la totalidad de la hoja 128. Estos mapas, que integran tanto los valores calibrados como los residuos interpolados, permiten observar la influencia que tienen las distintas covariables ambientales sobre sus valores, principalmente la litología y los usos

del suelo. En la **Figura 4** se muestra, a modo de ejemplo, el resultado obtenido para el contenido de arcilla.



**Figura 4.** Resultado obtenido para el contenido de arcilla (%).

## Discusión

Al evaluar los resultados obtenidos a través de los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y del error cuadrático medio (RMSE), se observa que estos muestran ciertas mejoras respecto a otros estudios (Hengl *et al.*, 2004; Mosleh *et al.*, 2016; Rodríguez Fernández, 2021; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2022).

A pesar de finalmente haber obtenido unos resultados adecuados, dentro del rango de valores esperados, es fundamental considerar que tanto la selección de las covariables empleadas como la elevada heterogeneidad espacial del suelo pueden introducir errores en la estimación de las propiedades edáficas superficiales (McBratney *et al.*, 2003). Asimismo, al corresponderse las covariables ambientales con mayor peso y, por tanto, más determinantes en la estimación de los modelos, con la litología, la cubierta vegetal, los usos del suelo y el relieve, se evidencia una dependencia con las características específicas del área modelizada, lo que podría limitar la aplicabilidad de los modelos a otras regiones.

En cuanto a la metodología, cabe destacar que la aplicación de la validación cruzada estratificada permitió un uso más eficiente de los datos, al emplear cada grupo tanto en la fase de entrenamiento como en la de evaluación. Esta técnica ha mostrado ser una alternativa adecuada para estudios con un número reducido de puntos de muestreo, coincidiendo con trabajos previos (Kohavi, 1995; Grunwald, 2009).

## Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La aplicación de la cartografía digital de propiedades edáficas superficiales basada en el modelo *scorpan*, a pesar de sus limitaciones, supone una herramienta útil para generar mapas de suelos en áreas carentes de cartografía, además de facilitar la creación de mapas dinámicos con posibilidad de actualización continua.
- La validación cruzada se presenta como la metodología más adecuada para llevar a cabo el análisis estadístico de validación, cuando se dispone de un número limitado de observaciones.
- La dependencia de los modelos respecto características específicas del área modelizada puede limitar su aplicabilidad a otras regiones.
- El éxito del DSM depende directamente de la disponibilidad, representatividad y calidad de los puntos de muestreo, por lo que el muestreo convencional de los suelos es aún un elemento clave en esta metodología. De igual manera, la disponibilidad, fiabilidad y resolución de las covariables ambientales empleadas determina la eficacia de los modelos predictivos.

## Bibliografía

- Alemán-Montes, B., Búcaro-González, A., Henríquez-Henríquez, C. y Largaespada-Zelaya, K. 2019. Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(2): 157-166.
- Alonso Herrero, E. 1995. Litología y Geomorfología. En Atlas del Medio Natural de la provincia de León (eds. Gallego Valcarce, A., Alonso Herrero, E. y Peñas Merino, A.), 11-18, Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), Madrid, España.
- Alonso Herrero, E., Vidal Bardán, M., Villa Bermejo, J. E., Fuertes Gutiérrez, I., Alcalde Aparicio, S., Robles Llamazares, J. Á., Rodríguez Blanco, J. y Juan González, L. A. 2010. Plan Piloto del Mapa de Suelos de la Provincia de León. Escala 1:50.000. Hoja 128 (Riello). Universidad de León, León, España.
- Belkadi, W. H. y Drias, Y. 2023. Advancements in Digital Soil Mapping: From Data Acquisition to Uncertainty Estimation - A Comprehensive Review. En Artificial In-

- telligence Doctoral Symposium. Communications in Computer and Information Science (eds. Drias, H., Yalaoui, F. y Hadjali, A.), 162 – 177, Springer, Singapur, Singapur.
- Carré, F., McBratney, A. B., Mayr, T. y Montanarella, L. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma*, 142(1-2): 69-79. doi:10.1016/j.geoderma.2007.08.015.
- Chazarra Bernabé, A., Flórez García, E., Peraza Sánchez, B., Tohá Rebull, T., Lorenzo Mariño, B., Criado Pinto, E., Moreno García, J. V., Romero Fresneda, R. y Botey Fullat, R. 2018. Mapas climáticos de España (1981-2010) y ET<sub>0</sub> (1996-2016). Informe del Ministerio para la Transición Ecológica y Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/014-18-004-2.
- Fu, P. y Rich, P.M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37: 25–35.
- Grunwald, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma*, 152(3-4): 195-207. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.003.
- Grunwald, S., Thompson, J. A. y Boettinger, J. L. 2011. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4): 1201-1213. doi:10.2136/sssaj2011.0025.
- Hartemink, A. E., Mcbratney, A. B. y Cattle, J. A. 2001. Developments and trends in soil science: 100 volumes of Geoderma (1967–2001). *Geoderma*, 100: 217-268.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M. y Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 20(1-2): 75-93. doi:10.1016/j.geoderma.2003.08.018.
- Jenny, H. 1994. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Kohavi, R. 1995. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. International joint conference on artificial intelligence.
- Lagacherie, P. y McBratney, A. B. 2006. Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*, 31: 3-22. doi:10.1016/S0166-2481(06)31001-X
- León Llamazares, A., Arriba Balenciaga, A. y Plaza, M. del C. 1991. Caracterización agroclimática de la provincia de León. Informe del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Ma, Y., Minasny, B., Malone, B. P. y Mcbratney, A. B. 2019. Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, 70(2):216-235. doi:10.1111/ejss.12790.
- Martín Parra, L. M., Enrile Albir, A., González Lastra, J., Maymo Asses, A. y Bardají, M. T. 1989. Mapa Geológico de España. Riello. Informe del Instituto Tecnológico Geominero de España.

- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L. y Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- Minasny, B. y McBratney, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264: 301-311. doi:10.1016/j.geoderma.2015.07.017.
- Mosleh, Z., Salehi, M. H., Jafari, A., Borujeni, I. E. y Mehnatkesh, A. 2016. The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3): 1 - 13. doi:10.1007/s10661-016-5204-8.
- Rodríguez Fernández, J. 2021. Cartografía digital de propiedades edáficas en el área de Benavides de Órbigo (León). Trabajo de fin de grado, Universidad de León, España.
- Rodríguez-Fernández, J., Ferrer-Juliá, M. y Alcalde-Aparicio, S. 2022. Cartografía digital de propiedades edáficas superficiales en las zonas agrícolas de El Órbigo y La Cepeda (León, NO España). *Revista de Ciencias Agrarias*, 2022(4): 225-229. doi:10.19084/rca.28410.

### Webgrafía

- <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home> (Accedido: 12 de septiembre de 2023).
- <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geode.aspx> (Accedido: 5 de agosto de 2023).
- <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/medio-natural/espacios-naturales.html> (Accedido: 8 de junio 2025).
- <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-products> (Accedido: 5 de junio de 2025).
- [https://suelos.itacyl.es/base\\_datos](https://suelos.itacyl.es/base_datos) (Accedido: 12 de junio de 2025).
- <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural.html> (Accedido: 19 de septiembre de 2023).
- <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/reservas-naturales-fluviales.html> (Accedido: 16 de diciembre de 2024).