

# INDICADORES DE DEGRADACIÓN DEL SUELO EN EL PARQUE FORESTAL “MONTE GIBRALFARO” (MÁLAGA, ESPAÑA)

JOSÉ ANTONIO SILLERO-MEDINA<sup>1,2</sup>

MARIO MENJÍBAR-ROMERO<sup>1,2</sup>

JAVIER GONZÁLEZ-PÉREZ<sup>1,2</sup>

JOSÉ DAMIÁN RUIZ-SINOGA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga. [jasillero@uma.es](mailto:jasillero@uma.es) ORCID 0000-0002-7856-3239; [mariomenjibar@uma.es](mailto:mariomenjibar@uma.es) ORCID 0000-0001-9261-4445; [jgperez@uma.es](mailto:jgperez@uma.es) ORCID 0000-0001-8536-5129; [sinoga@uma.es](mailto:sinoga@uma.es) ORCID 0000-0002-2303-0881.

<sup>2</sup>Instituto Universitario de Hábitat, Territorio y Digitalización, Universidad de Málaga, Avda. Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. Edificio de Investigación Ada Byron.

**Abstract:** Soil conservation in natural areas within urban environments is essential for promoting environmental sustainability. These zones act as vital green lungs, providing key ecosystem services. Effective soil management in urban areas enhances air quality, human well-being, and resilience to extreme climatic events, fostering a sustainable balance between urban growth and environmental conservation. In the context of climate change, particularly in Mediterranean regions, soil degradation poses a significant threat. Therefore, implementing sustainable strategies for assessing, conserving, restoring, and rewilding these spaces is crucial to promoting more resilient land management. This study focuses on an urban forest area in the city of Málaga (Spain)—Monte Gibralfaro—characterized by low biodiversity and a lack of territorial connectivity with the natural matrix, which increases its susceptibility to climate change effects. The research aims to conduct a detailed assessment of soil degradation in this site. Specifically, the study seeks to: (i) Determine soil erosion rates using the RUSLE model; (ii) Estimate organic carbon sequestration (SOC stock); and (iii) Evaluate soil quality through the relationship between organic carbon and clay content (SOC:Clay Ratio). To achieve these objectives, a total of 23 soil samples were collected, evenly distributed across the forest park, and analyzed in the laboratory to assess their main physical, chemical, and hydrological properties. Subsequently, the established indicators were calculated and mapped using innovative machine learning techniques, such as the Random Forest algorithm.

**Keywords:** soil conservation; climate change; ecosystem services; random forest.

**Línea Temática:** Cambio ambiental

## 1. Introducción

Las áreas verdes urbanas son fundamentales para garantizar servicios ecosistémicos que mejoran la calidad de vida en las ciudades, al contribuir a la regulación ambiental y al bienestar de la población (Semeraro et al., 2021). Estos espacios están reconocidos por mitigar los efectos negativos de la urbanización en el uso del suelo (Mahmoudi & Maller, 2018). Así, las áreas verdes no solo representan refugios de biodiversidad, sino que también funcionan como una herramienta eficaz para contrarrestar los retos ambientales y sociales asociados con el crecimiento y la propia actividad de las ciudades.

Una de las principales amenazas para estas áreas verdes urbanas es la falta de conectividad ecológica. Este patrón fragmentado no solo acelera la degradación de los ecosistemas, sino que también fomenta una alarmante pérdida de biodiversidad (Jamil et al., 2024). Esta desconexión

ecológica representa un desafío crítico que exige una planificación estratégica y colaborativa, indispensable para garantizar la sostenibilidad de estas áreas y preservar su función ecológica en el equilibrio ambiental de las ciudades.

En este contexto, el presente trabajo se enmarca dentro del proyecto ECONECTA GIBRALFARO, cuyo propósito principal es la renaturalización del Monte Gibralfaro en Málaga, mediante intervenciones integrales que aborden los diversos elementos constitutivos del ecosistema. En particular, se pone en valor el papel del suelo como proveedor de servicios ecosistémicos fundamentales y como regulador del correcto funcionamiento del sistema. Entre sus múltiples funciones, destaca el almacenamiento de carbono, vital para mitigar el cambio climático, así como la gestión del agua, que mejora la infiltración y reduce el escurrimiento superficial, clave en la prevención de riesgos de inundaciones. Además, los suelos en áreas verdes urbanas albergan una rica biodiversidad de microorganismos y fauna del suelo, elementos cruciales para mantener la salud y estabilidad de los ecosistemas urbanos (Burbano-Orjuela, 2016).

Bajo estas consideraciones, la investigación tiene como objetivo realizar una evaluación detallada del estado de degradación del suelo en este espacio. Específicamente, el estudio se propone realizar un diagnóstico inicial para la identificación de las áreas prioritarias de actuación e intervención a causa de un estado más desfavorable en su calidad y salud del suelo. Concretamente, (i) calcular las tasas de erosión del suelo a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE); (ii) estimar el secuestro de carbono orgánico (SOC stock); (iii) analizar la calidad del suelo mediante la relación SOC:Clay. A partir de esta información se establecerán medidas de actuación concretas para la mejora de los suelos más susceptibles y degradados.

## 2. Materiales, datos y métodos

### 2.1. Área de estudio

El parque forestal "Monte Gibralfaro" se localiza en pleno centro de la ciudad de Málaga (España), identificándose como uno de los principales pulmones verdes de la capital y contando con una superficie de 278.094 m<sup>2</sup> (Figura 2). Como características generales, este espacio presenta una vegetación dominada por pinares de repoblación, principalmente de *Pinus halepensis*, y eucaliptos, además de otras áreas de pastizales, claramente degradados. Desde una perspectiva geológica, la zona del Monte Gibralfaro se emplaza en la zona interna de las Cordilleras Béticas, concretamente en el Complejo Maláguide. Sus materiales están vinculados al afloramiento calizo (localmente alabeadas) del periodo Silúrico y, principalmente, Devónico, durante la era Paleozoica (350-400 millones años). No obstante, raramente se tratan de calizas en sentido estricto, ya que, según su contenido detrítico, identificamos calizas areniscosas y pizarrosas. Su potencial erosivo se asocia directamente a la propia antigüedad y tipología de los materiales, de escasa resistencia y estabilidad estructural, dando lugar a procesos erosivos diferenciales. Estas características constituyen un elemento clave en la edafogénesis y en las propiedades de los suelos en cuestión. Así, en el caso de estas calizas alabeadas, la fuerte resistencia a la meteorización, unido a las características fisiográficas de gran complejidad que presenta este territorio, los procesos de desarrollo del suelo están ampliamente condicionados. A nivel general, los suelos de este territorio están deteriorados y con claros signos de erosión, donde el desarrollo en profundidad y la aparición de horizontes es muy limitada a zonas con características bióticas y fisiográficas muy concretas.

El área de estudio ha sido seleccionada por presentar claros síntomas de degradación ambiental, principalmente motivado por su falta de conectividad. Así, en la Figura 1 se muestra el área de diagnosis y actuación definida para este trabajo.

### 2.2. Recopilación de datos, cálculo de indicadores, identificación de áreas de actuación y cartografía de los resultados

Se recogieron un total de 23 muestras de suelo de la zona más superficial (0-10 cm de profundidad), distribuidas de forma homogénea por el territorio. En cada punto de muestreo se tomaron dos muestras: en primer lugar, una muestra de suelo alterada y, por último, una muestra

inalterada en un cilindro de 100 cm<sup>3</sup>. Estas han sido analizadas en el laboratorio, obteniendo resultados de materia orgánica, carbono orgánico, permeabilidad, densidad aparente, estabilidad estructural, gravas y textura. Los métodos utilizados para su medición son descritos por Sillero-Medina (2022).

A partir de estos datos se calcularon tres indicadores representativos del estado de degradación del suelo en el Monte Gibralfaro.

- RUSLE, a partir de la metodología descrita por Renard et al (1997).

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde, A es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por unidad de superficie (t ha<sup>-1</sup>), R el factor de erosividad de la lluvia (Mj ha<sup>-1</sup> mm-1 año<sup>-1</sup>), K el factor de erodibilidad del suelo (Mg J<sup>-1</sup>), LS el factor relativo a la longitud y pendiente de las laderas, C el factor de cubierta vegetal y, por último, el factor P relativo a las medidas de conservación y control de la erosión.

- SOC Stocks (Muñoz-Rojas et al., 2012)

$$\text{SOC Stocks} = \text{SOC} * \text{BD} * \text{D} * (1 - \text{G})$$

Donde, SOC Stocks (Mg ha<sup>-1</sup>); SOC es el porcentaje de carbono orgánico del suelo (g 100<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>); BD es la densidad aparente; D es la profundidad del suelo (cm); G son las gravas (%).

- SOC:Clay Ratio

$$\text{SOC: Clay Ratio} = \text{SOC}/\text{Clay}$$

Donde SOC es el porcentaje de carbono orgánico del suelo (g 100<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>); Clay es el porcentaje de arcillas.

Para la representación espacial de los indicadores seleccionados, se emplearon tecnologías avanzadas basadas en machine learning, específicamente Random Forest. Se consideraron trece variables explicativas (topográficas, cubierta vegetal y cobertura fraccional) para predecir la variable principal (indicador). El procedimiento incluyó un análisis exploratorio de datos y una fase de entrenamiento preliminar para ajustar el número total de árboles y el tamaño promedio de las hojas, con el objetivo de obtener el menor error cuadrático medio (RME). Finalmente, se utilizaron 200 árboles y un tamaño de hoja de 5. La validación de los resultados se realizó utilizando el 90% de los puntos de muestreo. Todo el proceso se llevó a cabo en ArcGIS Pro 10.8. A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los indicadores se han delimitado zonas de actuación prioritarias que han sido delimitadas a partir una evaluación multicriterio a través de una suma ponderada.

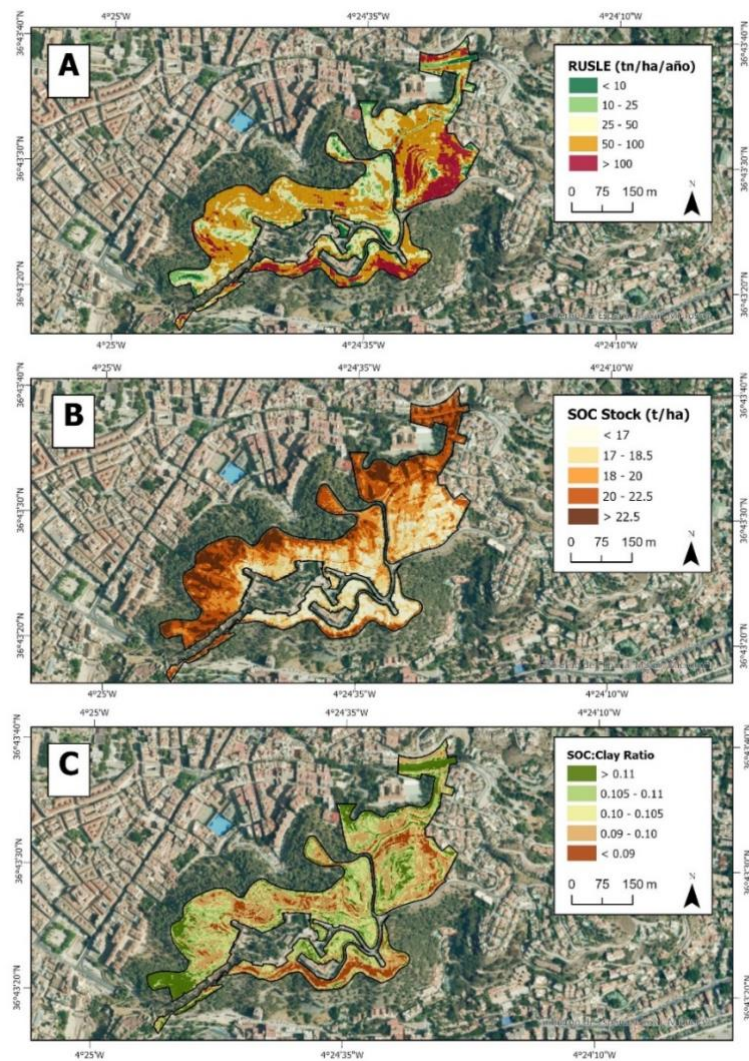
### 3. Resultados y discusión

El resultado de aplicar los diferentes indicadores de degradación del suelo está recogido en la Figura 1. En primer lugar, las tasas de erosión del suelo resultantes de la aplicación del modelo RUSLE registran una media de 62,5±35,8 t ha<sup>-1</sup>, identificando importantes extensiones (60,4% de la superficie total) donde la carga de erosión supera las 50 t ha<sup>-1</sup> y, por tanto, existe un estado de erosión potencial grave o muy grave. Concretamente, los valores más elevados se recogen en los sectores con exposición Sur, coincidentes con las mayores pendientes en laderas y con los puntos de mayor presión antrópica y turística. De igual modo, el almacenamiento de carbono orgánico muestra una distribución espacial muy similar, con valores medios 19,6±2,4 t ha<sup>-1</sup>. Aquellos sectores más empobrecidos, con los valores mínimos de SOC Stocks (< 17 t ha<sup>-1</sup>), se encuadran también en la mitad Sur del parque forestal, ocupando un total del 18,4% de la superficie.

El último de los indicadores seleccionados, el SOC:Clay Ratio, se desarrolló para evaluar la condición estructural del suelo y clasificarlo según su estado de salud. Concretamente, es uno de los indicadores de salud del suelo seleccionados por la Comisión Europea en la Ley de Monitoreo del Suelo Europeo. La arcilla juega un papel protector del carbono orgánico en el suelo, de este modo, la relación puede proporcionar información valiosa sobre el grado de estabilización del carbono orgánico en las partículas de arcilla presentes (Chahal et al., 2024). Los resultados para el área de estudio identifican una distribución a la recogida en los indicadores anteriores. Sin embargo, existen pequeños sectores, especialmente en la mitad nororiental, donde, a pesar de los bajos valores de carbono orgánico, se observa una buena fijación a las arcillas, con una ratio de en torno a 1:8 y 1:10 (Johannes et al., 2017).

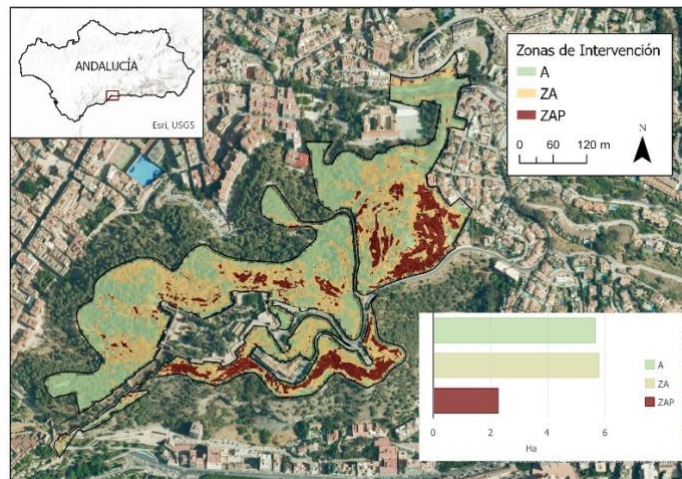
A partir de estos tres indicadores se han determinado aquellas zonas más susceptibles y degradadas el parque forestal en las que se requiere de una intervención prioritaria (Figura 2). De modo específico, se han diferenciado Zonas de Actuación Prioritarias (ZAP), Zonas de Actuación (ZA) y áreas con estado Aceptable (A). Las ZAP ocupan el 15,5% de la superficie total y están concentradas en la franja más meridional.

Figura 1. Cartografía de los indicadores de degradación del suelo seleccionados para el ámbito de actuación del proyecto. Leyenda: A: RUSLE (t ha-1); B: SOC Stocks (Mg ha-1); C: SOC:Clay Ratio



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Zonas de intervención en el ámbito del proyecto.



Fuente: Elaboración propia

#### 4. Conclusiones

Los tres indicadores seleccionados para diagnosticar el estado de degradación de los suelos en el Monte Gibralfaro ofrecieron resultados bastante similares, con sectores claramente determinados de gran susceptibilidad frente a la erosión hídrica y donde la calidad y salud del suelo es muy deficiente. Estos sectores han sido delimitados como ZAP, siendo puntos clave de cara a llevar a cabo una intervención en el parque forestal e iniciar un proceso de renaturalización.

Bajo estas consideraciones, el equipo de trabajo ha propuesto una serie de medidas estratégicas para la recuperación de suelos degradados que pasan por:

(i) Mejora de propiedades físicas, químicas e hidrológicas del suelo a través de tratamientos de mulching en las áreas más degradadas.

(ii) Aumento de retención y absorción de agua en taludes. En las zonas donde el perfil de suelo aparece muy desmantelado, se ha sugerido incorporar mallas de geotextil o paneles orgánicos compuestos por sales minerales, almidones, y fibras de celulosa, que permitirán crear un primer horizonte orgánico.

(iii) Intervenciones para la reducción de escorrentías, control de erosión y aumento de infiltración mediante muros (muretes de piedra seca), retenedores de sólidos e hidrotecnias. Se primarán en cualquier caso la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (NbS).

Una vez ejecutadas, la investigación continuará con un análisis periódico y comparativo con el realizado de forma preliminar.

#### 5. Agradecimientos

Este estudio forma parte del trabajo realizado en el proyecto "ECONECTA GIBRALFARO C029", financiado por la FUNDACIÓN BIODIVERSIDAD F.S.P.

#### 6. Referencias bibliográficas

- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 106–116. <http://orcid.org/0000-0003-0408-5454>
- Chahal, I., Amsili, J. P., Saurette, D. D., Bower, J. A., Gillespie, A. W., van Es, H. M., & Van Eerd, L. L. (2024). Soil organic carbon to clay ratio in different pedoclimatic and agronomic conditions in northeastern North America. *Geoderma Regional*, 39, e00893. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00893>
- Jamil, R., Julian, J. P., Jensen, J. L. R., & Meitzen, K. M. (2024). Urban Green Infrastructure Connectivity: The Role of Private Semi-Natural Areas. *Land*, 13(8), 1213. <https://doi.org/10.3390/land13081213>

- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils: Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Mahmoudi Farahani, L., & Maller, C. J. (2018). Perceptions and Preferences of Urban Greenspaces: A Literature Review and Framework for Policy and Practice. *Landscape Online*, 61. <https://doi.org/10.3097/LO.201861>
- Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Zavala, L. M., De la Rosa, D., Abd-Elmabod, S. K., Anaya-Romero, M. (2012) Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain), *Solid Earth*, 3, 375–386, <https://doi.org/10.5194/se-3-375-2012>.
- Rabot, E., Saby, N. P. A., Martin, M. P., Barré, P., Chenu, C., Cousin, I., Arrouays, D., Angers, D., & Bispo, A. (2024). Relevance of the organic carbon to clay ratio as a national soil health indicator. *Geoderma*, 443, 116829. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116829>.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K y Yoder, D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH\\_703.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf)
- Semeraro, T., Scarano, A., Buccolieri, R., Santino, A., & Aarrevaara, E. (2021). Planning of Urban Green Spaces: An Ecological Perspective on Human Benefits. *Land*. <https://doi.org/10.3390/LAND10020105>.
- Sillero-Medina, J.A. (2022). Repercusiones eco-geomorfológicas de la dinámica paisajística reciente, en ambientes mediterráneos contrastados. Universidad de Málaga. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/24375>