

Servicios ecosistémicos del suelo en microcuencas alto-andinas de Mérida, Venezuela, mediante SIG: indicadores para una agricultura sostenible

Serviços ecossistêmicos do solo em microbacias das terras altas andinas de Mérida, Venezuela, por
meio de SIG: indicadores para uma agricultura sustentável

Soil ecosystem services in high Andean micro-basins of Mérida, Venezuela,
using GIS: indicators for sustainable agriculture

**Antonela Baldeón¹, Wilmer Lozada¹, Jorge Manrique¹, Clifford Pena¹,
Zarack Chacon² y Fernando Mendez³**

¹ Universidad de Los Andes Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales

Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales, Laboratorio de Suelos

² Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Microbiología Molecular y Biotecnología

³ Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Lab. de Espectroscopia Molecular, Depto. de Química
Mérida, Venezuela

antonellabaldeon@gmail.com; lozadawa@gmail.com; jorgemanriqueviana@gmail.com;
clifford.suelos@gmail.com; zarack5272@gmail.com; mendezpfj@gmail.com

Baldeón: <https://orcid.org/0009-0004-1834-4677>

Lozada: <https://orcid.org/0009-0008-4053-2825>

Manrique: <https://orcid.org/0009-0009-2679-3954>

Peña: <https://orcid.org/0009-0007-0570-556X>

Méndez: <https://orcid.org/0009-0004-5427-6384>

Resumen

Este estudio propone una evaluación integrada de los servicios ecosistémicos del suelo (SES) en dos microcuencas del estado Mérida, Venezuela, empleando sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta clave. El objetivo fue analizar la capacidad de estos ecosistemas para proveer servicios esenciales (fertilidad, retención de agua y biodiversidad) y su relación con las prácticas agrícolas locales. Mediante técnicas geoespaciales, se caracterizaron factores físicos, químicos y biológicos del suelo, integrando datos ambientales y socioeconómicos para identificar áreas prioritarias de conservación y manejo sostenible. Los resultados buscan ofrecer bases científicas que promuevan una agricultura resiliente, equilibrando productividad y preservación de los recursos naturales. La investigación contribuirá a la planificación territorial, proponiendo estrategias adaptadas al contexto andino venezolano, donde la presión agrícola y el cambio climático amenazan la sostenibilidad de los suelos. Este enfoque multidisciplinario pretende ser un modelo replicable en regiones similares, integrando tecnología SIG con conocimientos ecológicos y agrónomos para la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVE: potencial de la tierra; planificación territorial; conservación de suelos.

Resumo

Este estudo propõe uma avaliação integrada dos serviços ecossistêmicos do solo (SES) em duas microbacias hidrográficas no estado de Mérida, Venezuela, por meio de sistemas de informação geográfica (SIG) como ferramenta fundamental. O objetivo foi analisar a capacidade desses ecossistemas de fornecer serviços essenciais (fertilidade, retenção de água e biodiversidade) e sua relação com as práticas agrícolas locais. Utilizando técnicas geoespaciais, foram caracterizados fatores físicos, químicos e biológicos do solo, integrando dados ambientais e socioeconômicos para identificar áreas prioritárias para conservação e manejo sustentável. Os resultados buscam fornecer bases científicas que promovam uma agricultura resiliente, equilibrando a produtividade e a preservação dos recursos naturais. A pesquisa contribuirá para o planejamento territorial, propondo estratégias adaptadas ao contexto andino venezuelano, onde a pressão agrícola e as mudanças climáticas ameaçam a sustentabilidade do solo. Essa abordagem multidisciplinar visa ser um modelo replicável em regiões semelhantes, integrando a tecnologia SIG com o conhecimento ecológico e agrônomo para a tomada de decisões.

PALAVRAS-CHAVE: potencial da terra; planejamento territorial; conservação do solo.

Abstract

This study proposes an integrated assessment of soil ecosystem services (SES) in two micro-watersheds in the state of Mérida, Venezuela, using geographic information systems (GIS) as a key tool. The objective was to analyze the capacity of these ecosystems to provide essential services (fertility, water retention, and biodiversity) and their relationship with local agricultural practices. Using geospatial techniques, physical, chemical, and biological soil factors will be characterized, integrating environmental and socioeconomic data to identify priority areas for conservation and sustainable management. The results seek to provide scientific foundations that promote resilient agriculture, balancing productivity and preservation of natural resources. The research will contribute to territorial planning, proposing strategies adapted to the Venezuelan Andean context, where agricultural pressure and climate change threaten soil sustainability. This multidisciplinary approach aims to be a replicable model in similar regions, integrating GIS technology with ecological and agronomic knowledge for decision-making.

KEYWORDS: land potential; territorial planning; soil conservation.

1. Introducción

El suelo desempeña un papel crucial como regulador natural de procesos que son esenciales para la vida en la Tierra. Su capacidad de albergar biota, contribuir con el ciclo de nutrientes, almacenar agua, controlar la erosión y garantizar la fertilidad agrícola, constituyen servicios ecosistémicos (SE) que promueven la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano.

Como parte de los ecosistemas terrestres, los suelos cumplen varios SE, siendo el más conocido el soporte y suministro de nutrimentos a las plantas, de ahí que su degradación se considere como el mayor problema ambiental que amenaza la producción alimentos en el mundo, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2000).

En sintonía con el señalamiento anterior, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), señaló que del suelo depende el 95% de la producción mundial de alimentos, con la enorme presión de suplir una demanda creciente de alimentos que, acorde con proyecciones realizadas a 2050, se incrementará en un 60% para suplir a una población de 9.000 millones de personas.

Sin embargo, a pesar de la importancia que reviste este recurso natural, los suelos están altamente sujetos a la degradación, afectando considerablemente no solo la eficiencia de la agricultura (Nachtergaele *et al.*, 2011), sino que también a los SE (Robinson *et al.*, 2013).

Entre los ecosistemas terrestres, los sistemas agrícolas son probablemente los más afectados por estas amenazas (Fossey *et al.*, 2020). Por ello, su gestión eficiente es clave para garantizar la seguridad agroalimentaria, y mitigar los impactos del cambio climático frente a su variabilidad.

En regiones montañosas como las del estado Mérida (Venezuela), donde predomina una actividad agrícola intensiva basada en el cultivo de hortalizas de altura (clave para sostener economías locales), resulta indispensable aplicar enfoques holísticos que garanticen la gestión

sostenible de los agroecosistemas presentes. Esta gestión debe abordarse desde la perspectiva de los SES, definidos por *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) y Dominati *et al.* (2010) como los beneficios que las personas obtienen de este recurso. Incorporar estos servicios en la planificación agrícola en microcuencas es fundamental para contrarrestar los impactos de la intensificación y preservar la funcionalidad del suelo a largo plazo.

El enfoque de SE resalta el valor integral de los ecosistemas gestionados, particularmente en contextos agrícolas. Al manejar agroecosistemas, es imperativo considerar dos objetivos fundamentales: (1) la producción de bienes socioeconómicos (alimentos, combustible y fibra), y (2) el mantenimiento de la infraestructura ecológica que garantiza la provisión continua de servicios ecosistémicos esenciales (Dominati, 2013). Esta dualidad subraya la necesidad de equilibrar las demandas productivas con la conservación de procesos ecológicos clave que sustentan la resiliencia del sistema.

Cabe destacar que el estudio de SE desde hace décadas se ha consolidado como un marco conceptual clave para la gestión territorial y la toma de decisiones debido a su capacidad integradora, que articula dimensiones ecológicas y socioeconómicas (Banwart, 2011).

En este contexto, esta investigación buscó evaluar los SES en microcuencas alto-andinas merideñas mediante un enfoque integrador que combina sistemas de información geográfica (SIG) y análisis multicriterio. El estudio no solo aportará información acerca de la distribución espacial de los SES, sino que también generará insumos para la planificación territorial sostenible en zonas de alta fragilidad ecológica. Los resultados permitirán identificar áreas prioritarias de manejo, optimizando así la resiliencia de los agroecosistemas frente a la presión antrópica y climática, en línea con los desafíos globales de seguridad alimentaria y sostenibilidad.

2. Materiales y métodos

2.1 Características del área de estudio

El área de estudio comprende tres microcuencas (FIGURA 1). Las dos primeras (quebrada La Barrotera y La Batallera), cuyas extensiones son 1.290 ha, localizadas en el municipio Rivas Dávila, y sus coordenadas son: 186.082 mE y 916.832 mN y 192,138 mE y 921.302 mN. Por su parte, la microcuenca quebrada del Barro, ubicada en el municipio Arzobispo Chacón, posee una

superficie de 235,11 ha, y sus coordenadas son: 220.927 mE y 902.513 mN y 222.358 mE y 921302 mN ambas en Huso 19 Datum REGVEN.

Las microcuencas se localizan en el suroeste del estado Mérida en zonas de estrechos valles longitudinales y transversales. A nivel de relieve predomina vertientes con fuerte gradiente y variaciones altitudinales que van desde los 1.200 a 2.900 msnm.

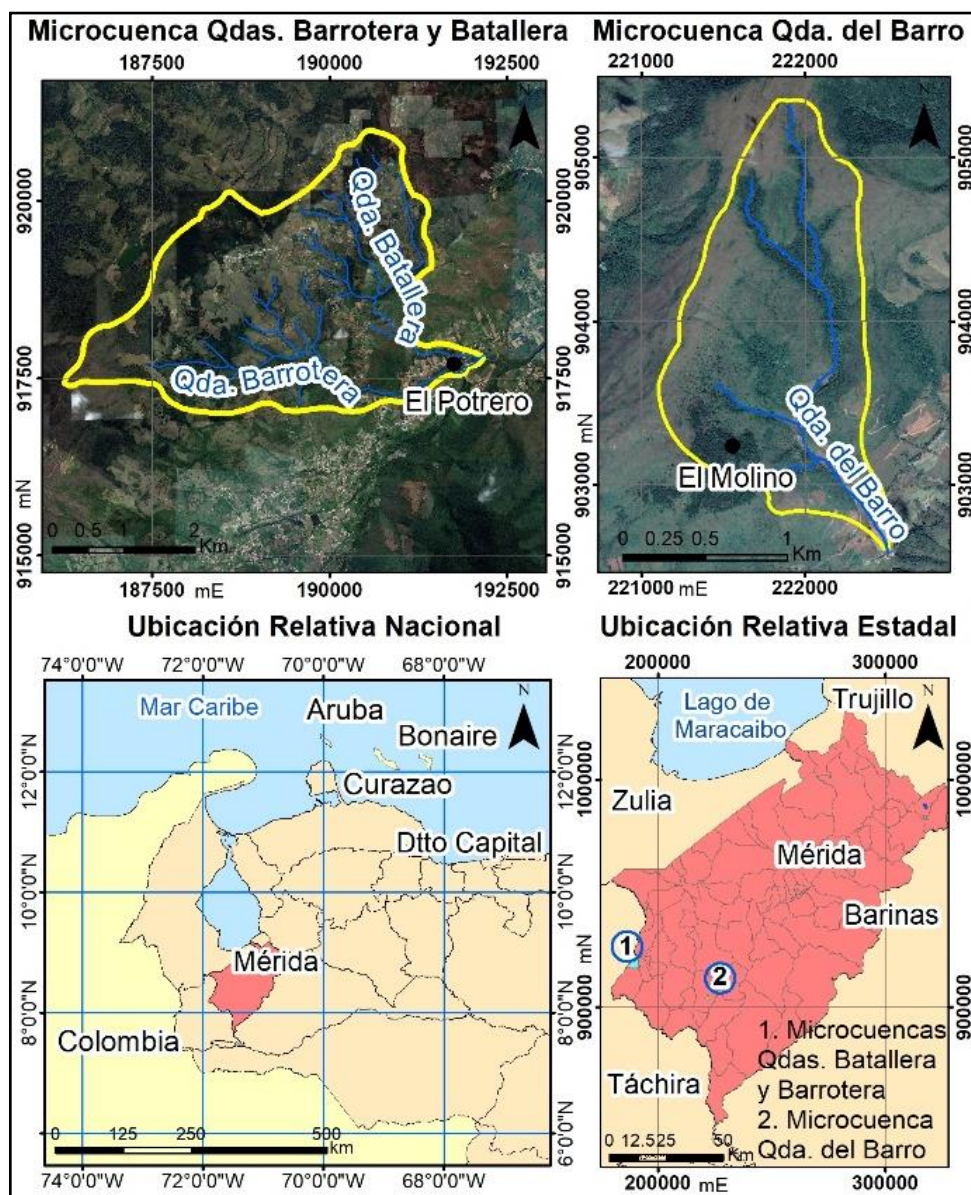


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: elaboración propia

La temperatura media anual estimada para la zona baja de las microcuencas La Barrotera y La Batallera es de 19,4°C mientras que para la microcuenca quebrada del Barro es de 15,1°C.

Las precipitaciones para las microcuencas de las quebradas La Barrotera y La Batallera, considerando las estaciones Tovar y Las Tapias, poseen un promedio anual superior a los 830 mm pero no supera los 1.000 mm con una estación lluviosa que concentra más del 60% de las precipitaciones totales anuales, pero divididas en dos periodos, la primera se distribuye entre los meses abril a junio y la segunda, entre agosto y noviembre. Igual posee dos periodos de sequía, los cuales se distribuyen en los meses de diciembre a marzo la primera y otra leve en el mes de julio.

En el caso de la microcuenca de la quebrada del Barro, considerando las estaciones Capurí y El Molino, presentan precipitaciones superiores a los 950 mm con una estación lluviosa que concentra más del 70% de las precipitaciones totales anuales y desde el mes de abril al mes de noviembre, mientras que la estación seca se extiende de diciembre a marzo y su menor valor ocurre en el mes de enero representado solamente 6% a 8% de la precipitación anual.

En cuanto a las unidades ecológicas basado en la clasificación de Ataroff y Sarmiento (2003), se lograron identificar cuatro unidades. En las microcuencas de las quebradas La Barrotera y La Batallera se localizan la Selva semicaducifolia montana en la sección baja, el Bosque siempreverde seco montano bajo y el Páramo andino a partir de los 2.700 msnm. La primera unidad se ubica a una altitud entre los 800 a 1.700 msnm en vertientes húmedas o en márgenes de ríos en vertientes secas, con temperaturas entre 17 a 22°C, precipitación: 1.200 a 1.900 mm, con 1 a 3 meses secos.

El Bosque siempreverde seco montano bajo, se localiza a una altitud entre los 1.600 a 2.000 msnm sólo en vertientes secas, con temperaturas entre 15 a 17°C, y precipitación entre 600 a 1.100 mm entre 3 y 4 meses secos. Los meses de abril y noviembre son meses de transición. El Páramo andino, se localiza a una altitud entre vertientes

secas 2.700 a 4.000 msnm y en vertientes húmedas entre 3.000 a 4.300 msnm con temperaturas entre 10 a 3°C, y precipitación: en vertientes secas entre 800 a 1.100 mm, mientras que en vertientes húmedas se localiza entre 1.100 a 1.800 mm entre 0 y 3 meses secos. Las heladas son restringidas a la época seca.

En la microcuenca de la quebrada del Barro se localizan las unidades: Bosque siempreverde seco montano bajo y la Selva nublada montana alta, esta última a una altitud entre los 2.200 a 3.000 msnm, sólo en vertientes húmedas o intermedias, con temperaturas entre 9 a 14°C y precipitación: entre 1.000 a 3.000 mm sin meses secos. Se presenta alta nubosidad, alta humedad relativa y baja insolación durante todo el año.

A nivel geológico, en las microcuencas de las quebradas La Barrotera y La Batallera, las litologías predominantes se relacionan con secuencias del Precámbrico (Asociación Sierra Nevada), la cual está profunda y extensamente intrusionada por cuerpos graníticos, y conjuntos del Paleozoico (Asociaciones Tostós y Mucuchachí).

Mientras que los materiales de edad cuaternaria están representadas por sistemas de abanicos terrazas, abanicos aluviales y de detritos, del Pleistoceno superior y reciente (Holoceno). En el área de estudio se han podido separar e identificar, por su posición relativa, dos niveles de depósitos, dos antiguos (?) y uno más joven, los cuales han sido identificados: El nivel más antiguo como Qaa2, y la secuencia más reciente, Qaa3. Se trata de edades relativas, y su importancia desde el punto de vista práctico consiste en ser el asiento de las principales actividades económicas. Para el caso de la microcuenca de la quebrada del Barro aflora sólo la Asociación Mucuchachí y dos niveles de materiales del Cuaternario: Holoceno y Pleistoceno reciente (Ferrer *et al.*, 2008).

Con relación a la clasificación de los suelos, según la taxonomía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2022), predominan los Inceptisoles, a nivel de subgrupo se clasifican como: Typic Humustepts francosa fina, isotérmico.

2.2 Metodología

2.2.1 Revisión de literatura y estado del arte en valoración de SES del suelo.

Para el desarrollo del marco metodológico de valoración de SES del suelo con énfasis en sistemas agrícolas, se realizó una revisión sistemática de literatura científica indexada en bases de datos especializadas (Scopus, Web of Science, SciELO) mediante estrategias de búsqueda basadas en términos clave ("*soil ecosystem services valuation*", "*agricultural land assessment*", "*multicriteria analysis ecosystem services*"). Los estudios evidenciaron que la valoración de los SE del suelo se estructuran en cuatro categorías principales (soporte, regulación, provisión y culturales).

La selección de variables y procedimientos para evaluar los SES en este estudio se fundamentó en un análisis crítico de la literatura científica revisada (TABLA 1), que permitió identificar los enfoques más utilizados y las principales brechas de investigación. La revisión de 12 trabajos reveló que a nivel de los servicios de soporte, los estudios de Orvar y Brynhildur (2016), Cai *et al.* (2020) y Gómez *et al.* (2021), destacaron la importancia de evaluar la fertilidad del suelo y su condición biológica como indicadores fundamentales de capacidad de soporte. En cuanto a los servicios de regulación, el secuestro de carbono fue el más estudiado (6 trabajos), seguido por la erosión (5 estudios). En referencia a los servicios de provisión, la producción agrícola apareció en 4 estudios, y los servicios culturales, solo 3 estudios abordan este variable.

Dicha revisión también permitió evidenciar que la mayoría de los estudios emplean enfoques integrados que combinan modelización biofísica, análisis espacial con SIG y técnicas de Análisis Multi Criterio (AMC), para ponderar cada variable. Estos hallazgos refuerzan la pertinencia de adoptar enfoques híbridos (cuantitativos-cualitativos) y herramientas de soporte decisional

para abordar la complejidad inherente a estos sistemas, facilitando la toma de decisiones en la gestión territorial sostenible.

2.2.2 Selección de variables y métodos para el análisis espacial de SES del suelo

A partir de los hallazgos de la revisión sistemática realizada que permitió identificar las variables de servicios ecosistémicos del suelo (SES) más estudiadas y los métodos predominantes en la literatura, se establecieron criterios para seleccionar los indicadores y herramientas metodológicas aplicables a escalas espaciales. Esta selección priorizó: (1) variables con mayor consenso científico, (2) métodos integrados (SIG, modelización biofísica) validados en estudios previos, y (3) vacíos de investigación detectados, adaptándolos a los objetivos de este estudio.

Con base a la información analizada para los servicios de soporte, se consideró la evaluación de fertilidad mediante los parámetros estandarizados del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1979), que permite análisis comparativos espaciotemporales de características clave como textura, materia orgánica y nutrientes. Complementariamente, se aplicó el protocolo de Sabaini y Ávila (2015) para evaluar la condición biológica *in situ* mediante indicadores observables de macrofauna y propiedades visuales del perfil edáfico.

En el ámbito de los servicios de regulación, se adoptó el índice de captación de agua modificado de Rivas *et al.* (2005) para cuantificar procesos hidrológicos críticos, junto con la medición de secuestro de carbono (en Mg ha^{-1}) como variable fundamental para la regulación climática. Adicionalmente, se incorporó la metodología de riesgo de erosión hídrica de FAO/PNUMA/UNESCO (1980), en $\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, estableciendo así líneas base para servicios ecosistémicos ampliamente reconocidos como esenciales en la literatura especializada.

TABLA 1. Variables de servicios ecosistémicos del suelo en investigación geográfica: aplicaciones en conservación, agricultura y planificación urbana. Fuente: elaboración propia

Funciones y servicios ecosistémicos del suelo Variables		Trabajos de investigación											
		Orvar y Brynhildur, 2016	Cai <i>et al.</i> , 2020	Dominati <i>et al.</i> , 2010	Zurqani <i>et al.</i> , 2019	Dube <i>et al.</i> , 2022	Hu <i>et al.</i> , 2020	Bravo <i>et al.</i> , 2024	Gómez y Fernández, 2021	Gómez <i>et al.</i> , 2021	Montico <i>et al.</i> , 2021	Burbano, 2016	Mutlu y Tezer, 2023
Soporte	Mitigación del abandono de tierras		x										
	Nutrientes del suelo	x	x		x	x	x	x	x	x			
	Reserva de biodiversidad	x			x		x		x	x	x		
	Formación de suelos	x			x			x					
Regulación	Plagas y enfermedades			x							x		
	Clima	x			x			x			x		
	Control hidrológico	x					x	x					
	Reciclaje de residuos	x		x	x			x					
	Filtrado de nutrientes	x		x				x					
	Regulación gases	x											
	Secuestro de carbono		x	x	x	x			x	x	x	x	x
	Oxígeno		x										
	Conservación de agua				x				x	x			
	Drenaje/inundación			x		x					x		
	Calidad superficial del agua										x		
	Erosión					x	x		x	x			x
	Control biológico							x					
Provisión	Producción de biomasa	x						x				x	
	Producción agrícola			x	x							x	x
	Provisión de agua limpia	x	x										
	Materias primas	x											
	Recursos genéticos										x		
	Madera y fibra				x						x	x	
	Combustible												
Culturales	Patrimonio cultural	x									x	x	
	Recreación	x	x		x						x		
	Valor estético										x		
	Información cultural y artística				x								
	Ciencia y educación				x						x		
	Cobertura y uso de la tierra												x

Para la valoración de servicios de provisión, se desarrolló un enfoque multidimensional que integra: la clasificación de suelos según el Reglamento Parcial de la Ley de Tierras (RPLTDA, 2005) para determinar su capacidad intrínseca; los criterios de aptitud física de la tierra de FAO

(1976, 2007) que evalúan el potencial productivo bajo condiciones específicas; y el índice de productividad de Riquier *et al.* (1970) que identifica factores limitantes para el uso sostenible. Esta combinación metodológica supera las aproximaciones convencionales que

suelen centrarse únicamente en el rendimiento agrícola.

Respecto a los servicios culturales frecuentemente subestimados, se propuso el análisis de cobertura de la tierra como variable cuantificable que establece puentes entre las propiedades biofísicas del suelo y sus valores intangibles. Esta estrategia metodológica innovadora permite superar la visión reduccionista predominante en la literatura, proporcionando una base objetiva para dimensiones tradicionalmente consideradas como cualitativas. Ciertamente esta selección metodológica busca equilibrar: (1) los enfoques más validados por la comunidad científica (ej. secuestro de carbono), (2) las variables clave identificadas en la revisión (nutrientes, erosión), y (3) la inclusión de aspectos menos estudiados pero relevantes (condición biológica, servicios culturales), generando así una evaluación integral de los servicios ecosistémicos del suelo.

2.2.3 Datos y herramientas utilizadas

Para el mapeo de los SES, se integraron insumos espaciales y edáficos mediante un enfoque jerárquico. Inicialmente, se adquirieron imágenes satelitales de 1m de resolución, para generar el mapa de cobertura y uso de la tierra así como el mapa geomorfológico (basado en cartografía topográfica y de un Modelo Digital del Terreno). Estos productos permitieron delimitar unidades homogéneas, las cuales orientaron un muestreo edáfico estratificado. Se recolectaron un total de 30 muestras de suelo, destinadas a: (1) clasificación taxonómica (descripción morfológica con fines de clasificación), y (2) análisis de propiedades fisicoquímicas (pH, Ce, materia orgánica, bases cambiables, % de saturación de bases, CIC, N, P, granulometría, densidad aparente, agua útil, infiltración). Los datos se interpolaron (Kriging/IDW) en SIG (ArcGIS 10.8) para elaborar mapas temáticos, los cuales, combinados con los insumos espaciales, sustentaron un modelo de evaluación de SES. Este enfoque permitió analizar la relación entre las propiedades del suelo, los factores ambientales y la provisión de servicios ecosistémicos en el área de estudio.

2.2.4 Análisis Multicriterio (AMC) para valorar los SES en las microcuencas en estudio

Para evaluar los SES en las microcuencas en estudio, se implementó una metodología integrada que combina el Análisis Multicriterio (AMC) con técnicas geoespaciales, cuyos parámetros se muestran en la tabla 2. El AMC, definido como un conjunto de métodos para evaluar alternativas bajo múltiples criterios en conflicto (Voogd, 1983), se aplicó mediante el Proceso de Jerarquías Analíticas (AHP) de Saaty (1980). Este método permitió establecer pesos relativos para cada variable mediante comparaciones pareadas, validados mediante el Índice de Coherencia ($IC < 0.10$) y la Relación de Consistencia ($RC < 0.10$), garantizando la confiabilidad de los juicios de valor. La implementación espacial se realizó mediante álgebra de mapas en un entorno SIG, donde se ejecutó una secuencia rigurosa de operaciones ráster: (1) estandarización de capas (resolución, sistema de referencia), (2) reclasificación según escalas de valoración (0-5), (3) aplicación de ponderaciones mediante multiplicación ráster, (4) sumatoria ponderada por componentes, y (5) normalización final de valores (0-1) cuya expresión es la siguiente:

$$V_{pn} = V_p - \frac{MIN_{pc}}{MAX_{pc}} - \frac{MIN_{vc}}{MAX_{vc}} \quad (1)$$

Dónde:

V_{pn} : Valor del pixel normalizado

V_p : Valor del pixel

MIN_{pc} : Valor mínimo del pixel de la capa

MAX_{pc} : Valor máximo del pixel de la capa

Este proceso, ejecutado en ArcGIS 10.8, incluyó controles de calidad espacial como alineación de *datasets* y validación de distribuciones, transformando criterios cualitativos en resultados cuantitativos espacialmente explícitos. El mapa final de SES refleja la capacidad integrada de provisión de servicios, demostrando la efectividad de combinar AMC-AHP con técnicas SIG avanzadas para la toma de decisiones ambientales. A continuación, se muestra los parámetros empleados para la obtención del mapa final SES (TABLA 2).

TABLA 2. Matriz de evaluación multicriterio para SES: escalas de valoración, descriptores cualitativos y pesos AHP por categoría funcional. Fuente: elaboración propia

		Procedimientos	Escala	Valor	Descripción	Pesos	
Servicios ecosistémicos	Soporte	Fertilidad del suelo Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1979)	10-9	5	Muy alta	0.6055	0.3968
			8-6	4	Alta		
			5-3	3	Moderada		
			2-0	2	Baja		
			0-(-5)	1	Muy baja		
		Condición biológica de suelo in situ e in visu, (Sabaini y Ávila, 2015).	5	5	Muy alta	0.3945	
			4	4	Alta		
			3	3	Moderada		
			2	2	Baja		
			1	1	Muy baja		
	Regulación	Índice de captación de agua, Modificado de (Rivas <i>et al.</i> , 2005).	22-27	5	Muy alta	0.3333	0.3015
			17-22	4	Alta		
			12-17	3	Moderada		
			7-12	2	Baja		
			<7	1	Muy baja		
		Secuestro de carbono. (Mg ha ⁻¹)	> 100	5	Muy alta	0.3334	
			50–100	4	Alta		
			20–50	3	Moderada		
			10–20	2	Baja		
			< 10	1	Muy baja		
		Riesgo de erosión hídrica. FAO/PNUMA/UNESCO, (1980). (Mg/ha /año)	<5	5	Muy bajo erosión	0.3333	
			50-100	4	Bajo erosión		
			100-500	3	Moderada erosión		
			500-2000	2	Alta erosión		
			>2000	1	Muy alta erosión		
	Provisión	Clases de suelo RPLTDA, 2005.	I	5	Sin limitaciones	0.3443	0.2032
			II	4	Reducidas		
			III	3	Moderadas		
			IV	2	Severas limitaciones		
			V-VIII	1	Restringidos para		
Aptitud física de la tierra (FAO, 1976; 2007).		A1	5	Sin limitaciones	0.3321		
		A2	4	Ligeras limitaciones			
		A3	3	Moderadas			
		N1	2	No apta, limitaciones			
		N2	1	No apta, inviable.			
Índice de productividad, (Riquier <i>et al.</i> , 1970).		65-100	5	Muy alta	0.3236		
		35-64	4	Alta			
		20-34	3	Moderada			
		19-8	2	Baja			
		7-0	1	Muy baja			
Culturales	Cobertura de la tierra	Páramo Bosque Cultivos Pastizal Urbano	5	Muy alta	1.0	0.0985	
			4	Alta			
			3-4	Moderada			
			3	Baja			
			1	Muy baja			

3. Resultados

La integración del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con técnicas geoespaciales permitió comprender la compleja distribución de los Sistemas Ecológico-Sociales (SES) en las microcuencas de las quebradas Barrotes y Batallera, ofreciendo un marco interpretativo que vincula escalas locales y procesos globales para abordar desafíos de conservación y planificación. Los resultados revelan una situación crítica en la provisión de servicios ecosistémicos: casi dos tercios del área (63,39%) presenta funcionalidad severamente comprometida (48,47% baja y 14,92% muy baja).

Estos suelos, principalmente en laderas intervenidas, muestran una marcada disminución en su capacidad de regulación hídrica y climática (índices 0,44-0,47), fragilidad exacerbada por el cambio climático. Eventos extremos como sequías o lluvias torrenciales pueden desencadenar erosión acelerada, reduciendo aún más su adaptación si son intervenidos.

Es alarmante la pérdida de biodiversidad edáfica y la disminución crítica de los stocks de carbono orgánico, lo que reduce la productividad agrícola y limita su rol como sumideros de carbono, creando un círculo vicioso de deterioro.

Solo el 20,07% del área conserva suelos resilientes (clases alta/muy alta), concentrados en las cabeceras de páramo -estratégicos reguladores hídricos y almacenes de carbono (>100 kg/ha/año) y algunas zonas bajas estables. No obstante, estos reductos enfrentan presiones por expansión agrícola intensiva y cambios climáticos, como el aumento de temperatura que altera ciclos biogeoquímicos y humedad. Los suelos de funcionalidad moderada (16,54%),

aunque mantienen cierta capacidad de provisión, son sensibles a variaciones climáticas y pueden degradarse rápidamente con prácticas agrícolas inadecuadas o deforestación.

Esta distribución espacial evidencia una vulnerabilidad diferencial: las áreas poco resilientes (63,39%) son altamente sensibles a fenómenos extremos, mientras que los suelos con mejores condiciones (20,07%) ven amenazada su adaptación natural.

En cuanto a los SES culturales, predominan pastizales vinculados a ganadería extensiva y agricultura intensiva con prácticas nocivas. Los sistemas socioeconómicos dominantes, basados en monocultivos y ganadería convencional, generan un bajo capital social y cultural debido a la pérdida de prácticas tradicionales, la homogenización del paisaje y una escasa conexión cultural. La FIGURA 2, muestra la distribución de los SES.

Esta situación demanda urgentemente estrategias de manejo adaptativo. Es crucial implementar protección estricta de las cabeceras de los páramos. Paralelamente, se requiere promover sistemas agroforestales diversificados que mejoren la retención de carbono y agua y realizar restauración activa de laderas con especies nativas resistentes a variaciones climáticas.

Estas acciones concertadas son fundamentales para contrarrestar la degradación acelerada y fortalecer la resiliencia socioecológica frente a los impactos del cambio climático, asegurando la sostenibilidad de estos ecosistemas críticos.

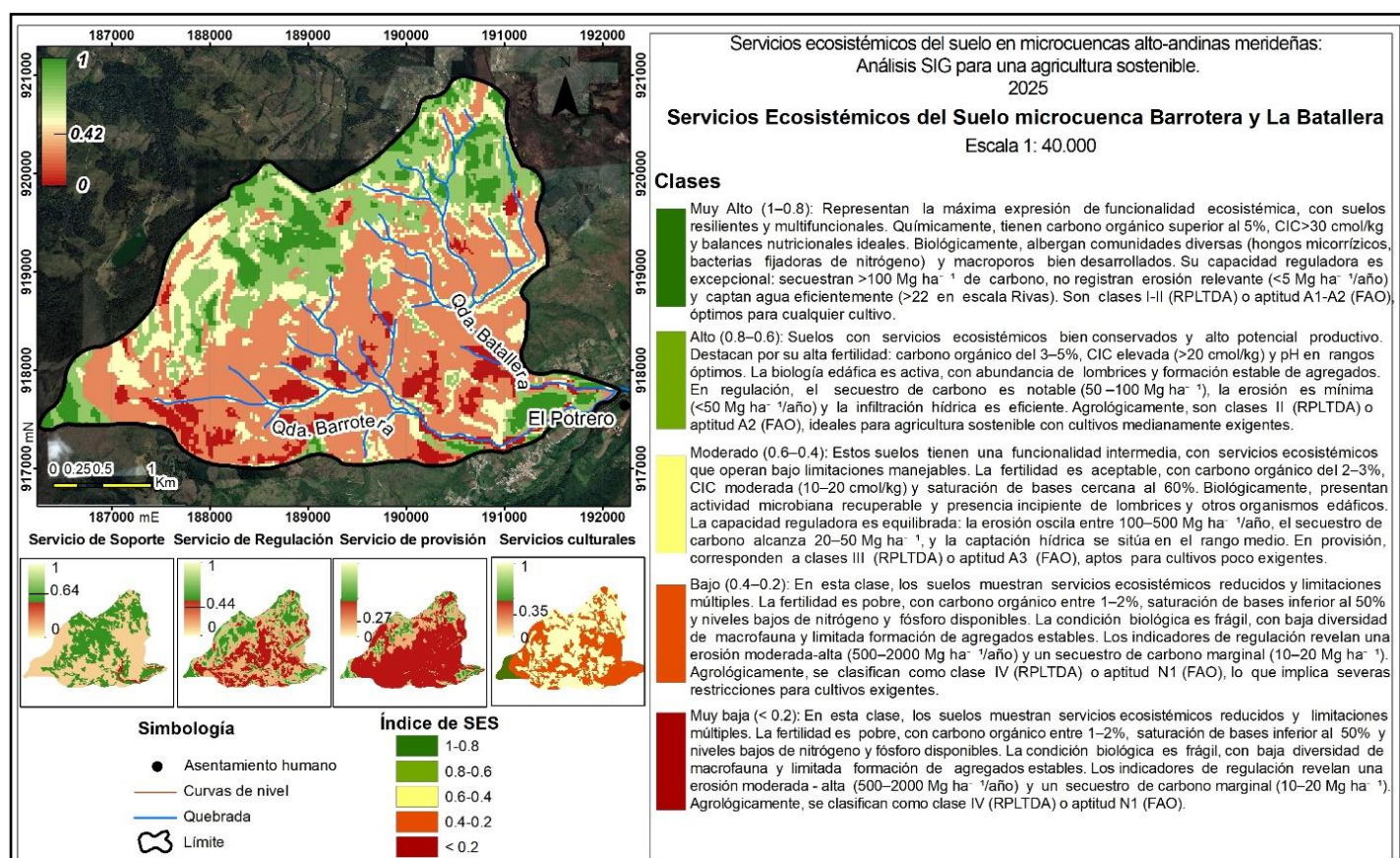


FIGURA 2. SES quebrada Barrotera y La Batallera: Fuente: elaboración propia

En el caso de la microcuenca de la quebrada del Barro esta revela una dinámica compleja influenciada por la cobertura vegetal, la topografía y el uso del suelo. La predominancia de suelos con baja funcionalidad ecosistémica (57,64%) indica un riesgo ante prácticas agrícolas inadecuadas, si bien a nivel de los servicios de soporte la microcuenca presenta un índice de 60%, en el caso de los servicios de regulación y provisión los valores son bajos.

Estos suelos, situados en zonas de pendiente fuerte, presentan una alta tasa de escorrentía, sobre todo en zonas de baja cobertura vegetal, lo que contribuye a que la erosión potencial y pérdida de nutrientes esenciales sea elevada. La categoría 'Moderada' (18,8%) representa áreas con un equilibrio relativo, donde la vegetación se mantiene parcialmente, y la capacidad de regulación hídrica aún ofrece oportunidades de

recuperación si se implementan estrategias adecuadas de manejo.

Por otro lado, los suelos con funcionalidad 'Muy alta' (0,05%) y 'Alta' (2,34%) son los que mejor desempeñan funciones clave como la captura de carbono, la regulación del agua y el mantenimiento de la biodiversidad. Estos suelos suelen ubicarse en zonas de pendiente menos pronunciada, lo que favorece la infiltración de agua, la estabilidad estructural del suelo y su aprovechamiento desde el punto de vista agrícola por cuanto la topografía no es una gran limitante. Sin embargo, su escasa proporción dentro del paisaje indica la necesidad de estrategias de conservación prioritarias para evitar la pérdida de suelos altamente funcionales. La categoría 'Muy baja' (21,16%) representa áreas severamente degradadas, o con delicado equilibrio ecológico debido a que posee bajos

índices de soporte regulación y provisión. En este contexto, el cambio climático puede agravar las limitantes existentes en los suelos presentes, intensificando la variabilidad de las precipitaciones y el aumento de temperaturas, lo que afecta directamente la capacidad del suelo para regenerarse y mantener su estructura funcional.

La combinación de la pérdida de cobertura vegetal y el incremento de eventos climáticos extremos podría generar una mayor vulnerabilidad en los suelos más susceptibles a la degradación, haciendo imprescindible la implementación de estrategias de manejo agroecológico, como la reforestación con

especies nativas, el control de la erosión mediante terrazas y la diversificación de cultivos. La integración de conocimiento científico y saberes locales permitirá fortalecer la resiliencia del sistema productivo y garantizar la sostenibilidad agrícola en la región.

A nivel de los SES culturales al igual que en el caso anterior, hay un predominio de pastizales asociado a ganadería extensiva y agricultura intensiva generando un SES bajo debido a la pérdida de prácticas tradicionales, la homogenización del paisaje y la escasa conexión cultural con el territorio que contribuyen con la degradación de los suelos. En la FIGURA 3 se observa la distribución de SES de la microcuenca.

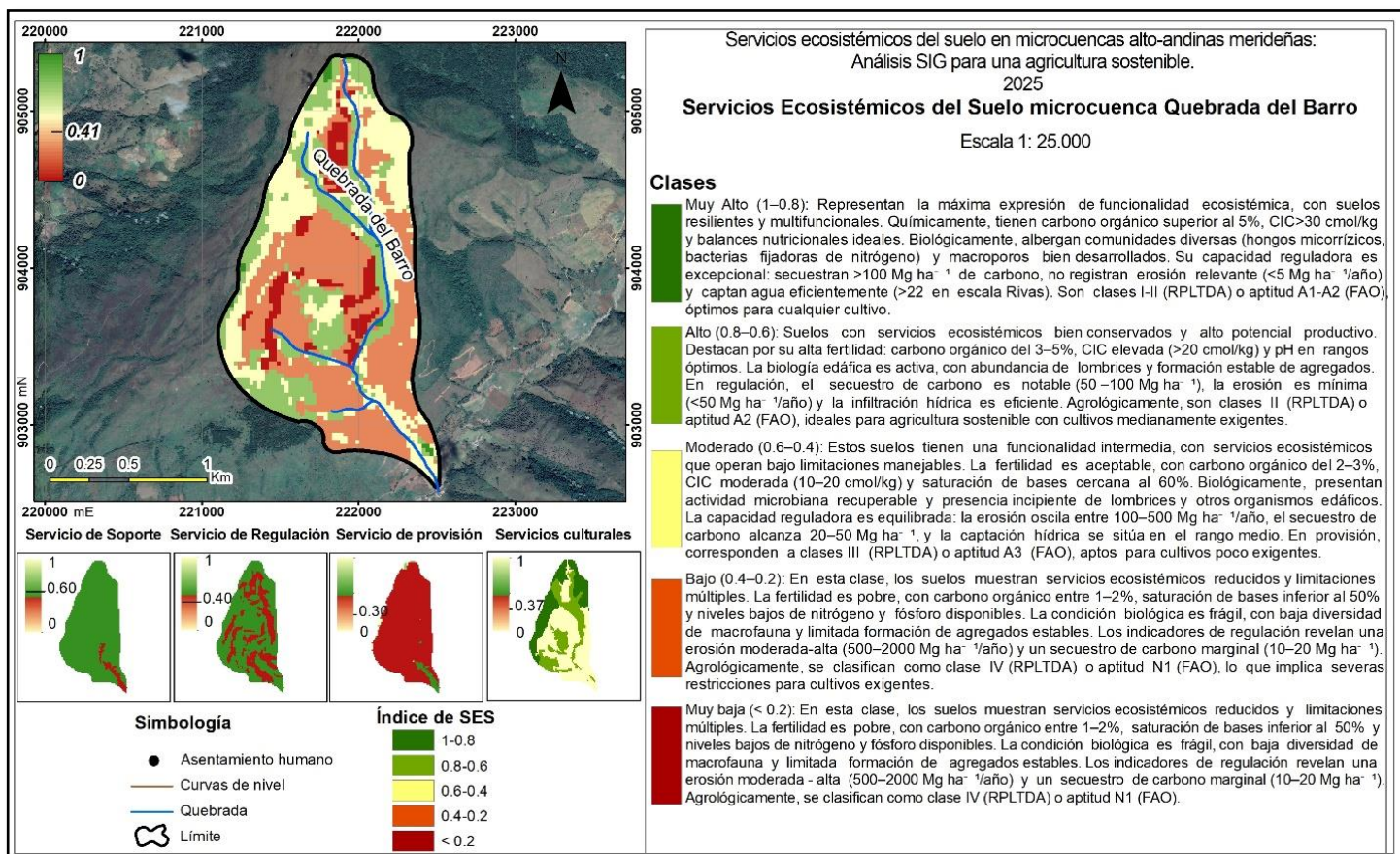


FIGURA 3. SES quebrada del Barro: Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones

La investigación revela procesos de degradación de los suelos en las microcuencas analizadas, con más del 60% del área mostrando funcionalidad

ecosistémica baja o muy baja. Las zonas más afectadas son laderas intervenidas, donde se observa disminución en la regulación hídrica y

climática, pérdida de biodiversidad y reducción de reservas de carbono. Esta situación limita la productividad agrícola y la capacidad de los suelos como sumideros de carbono, agravándose por el cambio climático con eventos extremos más frecuentes.

Solo el 20% del área mantiene suelos resilientes, principalmente en cabeceras de páramo y zonas bajas estables, que cumplen funciones críticas como regulación hídrica y almacenamiento de carbono. Sin embargo, estas áreas enfrentan presión por expansión agrícola y por variaciones de índole climático como incremento en la frecuencia de precipitaciones extremas. Las prácticas actuales (ganadería extensiva y monocultivos) han homogenizado el paisaje, reduciendo servicios culturales y acelerado la degradación, especialmente en pendientes con alta erosión.

El estudio propone acciones prioritarias: protección de cabeceras de páramo, implementación de agroforestería diversificada y restauración de laderas con especies nativas. La integración de conocimientos científicos y locales es clave para desarrollar estrategias adaptativas. Los SIG y el análisis multicriterio (AHP) han identificado áreas críticas para intervención, brindando bases sólidas para la planificación.

En conclusión, la recuperación de estos ecosistemas requiere un enfoque integrado que combine conservación, agricultura sostenible y adaptación climática, asegurando así los servicios ecosistémicos a futuro. Las medidas urgentes deben enfocarse en proteger las zonas aún funcionales y restaurar las degradadas mediante prácticas sostenibles y participación comunitaria.

5. Referencias citadas

- ATAROFF, M. y L. SARMIENTO. 2003. *Diversidad en los Andes de Venezuela. I Mapa de Unidades Ecológicas del Estado Mérida*. CD-ROM, Ediciones Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- BANWART, S. 2011. "Save our soils". *Nature*, 474: 151–152. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/474151a>.
- BRAVO, S.; CAMPS, P.; PÉREZ, V. & M. ARVIDE. 2024. "Soil ecosystem services valuation in a priority terrestrial region for biodiversity conservation in Mexico, from ecological economics and the local community perspective". *Discover Sustainability*, 5: 457. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00691-8>.
- BURBANO, H. 2016. "El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria". *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2): 106-116. Disponible en: [Doi: http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58](http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58).
- CAI, S.; ZHANG, X. & Y. CAO. 2020. "Values of the farmland ecosystem services of Qingdao City, China, and their Changes". *Journal of Resources and Ecology*, 11(5): 443–453. Disponible en: <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.05.002>.
- DUBE, B.; WHITE, A.; RICKETTS, T. & H. DARBY. 2022. *Valuation of Ecosystem Services from Improved Soil Health in Vermont*. Vermont Payment for Ecosystem Services Technical Research Report #5. The University of Vermont. Burlington, Estados Unidos.

- DOMINATI, E. 2013. "Natural capital and ecosystem services of soils". En: *Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends* (Dymond JR, ed.), pp. 132-142. Manaaki Whenua Press, Lincoln. Nueva Zelanda.
- DOMINATI, E.; PATTERSON, M. & A. MACKAY. 2010. "A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils". *Ecological Economics*, 69(1): 1.858-1.868.
- FAO. 2020. Los suelos son fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria y el equilibrio del ecosistema. FAO República Dominicana. 7 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/1364966/>. [Consulta: mayo, 2025] .
- FAO. 2007. *Land evaluation: Toward a revised framework*. FAO. Rome, Italy.
- FAO. 1976. *Esquema para la evaluación de tierras*. Boletín de Suelos 32. División de Recursos de Tierras y Aguas (FAO). Roma, Italia. Publicación Técnica.
- FAO/PNUMA/UNESCO. 1980. *Metodología provisional para la evaluación de degradación de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Roma, Italia.
- FERRER, C.; DUGARTE, M.; DELGADILLO, A.; PÁEZ, G.; LAFFAILLE, J.; LAFFAILLE, K.; ... y E. POZZOBON. 2008. *Caracterización de la cuenca del Valle de Mocotíes: Plan de Desarrollo Urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de Gestión de Riesgo*. Municipio Antonio Pinto Salinas, Venezuela. Informe Técnico.
- FOSSEY, M.; ANGERS, D.; BUSTANY, C.; CUDENNEC, C.; DURAND, P.; GASCUEL-ODOUX, C.; ... & C. WALTER. 2020. "A Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning". *Frontiers in Environmental Science*, 8(28): 1-12. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2020.00028/full>. [Consulta: mayo, 2025].
- GÓMEZ, B. y FERNÁNDEZ, M. 2021. "Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras de la Cuchilla de San Juan, municipio de Belén de Umbría, Colombia". *Ciencias Ambientales*, 55(1): 160. Disponible en: <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.8>.
- GÓMEZ, D.; DOSSMAN, M. y J. FERNÁNDEZ. 2021. "Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbría, Colombia". *Ciencias Ambientales*, 55(1): 160. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.8>.
- HU, X.; LI, Z.; NIE, X.; WANG, D.; HUANG, J.; DENG, C.; ... & K. NING. 2020. "Regionalization of soil and water conservation aimed at ecosystem services improvement". *Scientific Reports*, 10(1): 3.469. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60100-8>.

- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1979. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. (4ª edic). Bogotá. p. 664. Ley de tierras y Desarrollo agrario. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 5991 extraordinaria. Caracas 29 de julio de 2010.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. En: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf](https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf). [Consulta: mayo, 2025].
- MONTICO, S.; DI LEO, N.; BONEL, B. y J. BERARDI, 2021. "Servicios ecosistémicos provistos por los suelos en una cuenca de Santa Fe, Argentina". *Cuadernos del CURIHAM*, 27: 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.166>. [Consulta: mayo, 2025].
- MUTLU, M. & A. TEZER. 2023. "Daylighting the role of soil ecosystem services (SoESs) for climate change adaptation". *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 11: 367-385. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/gep.2023.119023>. [Consulta: mayo, 2025].
- NACHTERGAELE, F.; PETRI, M. & R. BIANCALANI. 2011. "Land Degradation". En: *World Soil Resources and Food Security Advances in Soil Sciences* (Lal, R. & Stewart, B.A., eds.). Taylor and Francis, CRC Press: 574. Disponible en: <http://www.taylorandfrancis.com/books/details/9781439844502/>. [Consulta: mayo 2025].
- ÖRVAR, J. & D. BRYNHILDUR. 2016. "Classification and valuation of soil ecosystem services". *Journal of Environmental Management*, 150: 123-135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>. [Consulta: mayo 2025].
- PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA). 2000. *Annual Review, Nairobi, Kenia*. Disponible en: https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/unep132_spn_0_0.pdf. [Consulta: mayo, 2025].
- REGLAMENTO PARCIAL DEL DECRETO CON FUERZA DE LEY DE TIERRAS Y DESARROLLO AGRARIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VOCACIÓN DE USO DE LA TIERRA RURAL. 2005. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 38.126 ordinario. Caracas 14 de febrero de 2005.
- RIQUIER, J.; BRAMAO, L. y S. P. A. CORNET. 1970. *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity*. Division FAO Soil Resources, Development and Conservation Service, Land and Water Development Division. Roma, Italia.
- RIVAS, S.; OCHOA, G.; OBALLOS, J. y J. SANTIAGO. 2005. "Ensayo metodológico de evaluación de tierras para la captación de agua en dos microcuencas del río Santo Domingo, Mérida, Venezuela". *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 30(6): 347-355. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000600008. [Consulta: mayo, 2025].

- ROBINSON, D.; HOCKLEY, N.; COOPER, D.; EMMETT, B.; KEITH, A.; LEBRON, I.; ... & H. BLACK. 2013. "Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation". *Soil Biology and Biochemistry*, 57: 1.023-1.033.
- SAATY, T. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York, Estados Unidos.
- USDA-NRCS. 2022. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. 12ª edición. Washington, Estados Unidos.
- SABAINI, C. y G. ÁVILA. 2016. *Manual de determinación de la condición biológica de suelo in situ e in visu en los sistemas agrícolas*. Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA). Santiago, Chile.
- VOOGD, H. 1983. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion. London, United Kingdom.
- ZURQANI, H.; MIKHAILOVA, E.; POST, C.; SCHLAUTMAN, M. & A. ELHAWAJ. 2019. "A Review of Libyan Soil Databases for Use within an Ecosystem Services Framework". *Land*, 8: 82. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land8050082>.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Mérida, Venezuela; mayo, 2025