

Uso de sensores remotos para el mapeo de servicios ecosistémicos: Una revisión de métodos usados

Use of remote sensing for mapping ecosystem services: a review of methods in use

Uso de sensores remotos para mapeamento de serviços ecossistêmicos: uma revisão dos métodos utilizados

Juan Martin Maya Echeverry¹
Universidad Tecnológica de Pereira

Juan Carlos Camargo García²
Universidad Tecnológica de Pereira



Resumen

Los Servicios Ecosistémicos (SE) se pueden definir como los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas. Actualmente hay un creciente interés en la evaluación y mapeo de los SE en el nivel global utilizando Sensoramiento Remoto (SR). Este artículo de revisión se centra en los métodos de mapeo empleados entre 2012 y 2023, basado en una búsqueda bibliográfica que identificó 2771 artículos relevantes. Se destaca el uso de datos de cobertura del suelo, el uso de índices de vegetación como el NDWI y el NDVI y los Modelos Digitales de Elevación (DEM). Las plataformas Sentinel y Landsat son reconocidas por su aplicación en la clasificación del uso del suelo y la evaluación de los SE. Se enfatiza la relevancia del mapeo participativo y su integración con información proveniente de SR. Este documento subraya la relevancia de la investigación interdisciplinaria y la utilización de tecnologías de teledetección en la gestión ambiental y en el proceso de toma de decisiones.

Palabras clave: cartografía, mapeo, servicios ecosistémicos, SIG

- 1 Especialista en Implementación de Sistemas de Información Geográfica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. jmmaya@utp.edu.co, Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0981-4233>
- 2 Doctor en Ciencias Forestales, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. jupipe@utp.edu.co, Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3325-0810>



Abstract

Ecosystem Services (ES) can be defined as the benefits that humans obtain from ecosystems. There is currently a growing interest in assessing and mapping ES globally using Remote Sensing (RS). This review article focuses on mapping methods employed between 2012 and 2023, based on a literature search that identified 2,771 relevant articles. The use of land cover data, the use of vegetation indices such as NDWI and NDVI and Digital Elevation Models (DEM) are highlighted. Sentinel and Landsat platforms are recognized for their application in land use classification and ES assessment. The relevance of participatory mapping and its integration with information from RS is emphasized. This document underlines the relevance of interdisciplinary research and the use of remote sensing technologies in environmental management and decision-making processes.

Keywords: cartography, ecosystem services, GIS, mapping



Resumo

Os Serviços Ecosistêmicos (SE) podem ser definidos como os benefícios que os humanos obtêm dos ecossistemas. Atualmente, há um interesse crescente em avaliar e mapear ES em nível global usando Sensoriamento Remoto (SR). Este artigo de revisão se concentra nos métodos de mapeamento empregados entre 2012 e 2023, com base em uma pesquisa bibliográfica que identificou 2.771 artigos relevantes. O uso de dados de cobertura do solo, índices de vegetação como NDWI e NDVI e Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são destacados. As plataformas Sentinel e Landsat são reconhecidas por sua aplicação na classificação do uso do solo e avaliação de SE. A relevância do mapeamento participativo e sua integração com informações da RS é enfatizada. Este documento destaca a importância da pesquisa interdisciplinar e do uso de tecnologias de sensoriamento remoto na gestão ambiental e na tomada de decisões.

Palavras-chave: cartografia, mapeamento, serviços ecosistêmicos, SIG

Introducción

La definición del concepto de Servicios Ecosistémicos (SE) evolucionó con el tiempo, pero la mayoría de los autores coinciden en que los SE contribuyen al bienestar humano (Nemani *et al.*, 2009; Verburg *et al.*, 2009; Marghany & Hashim, 2010; Zinnert *et al.*, 2011; Cabello *et al.*, 2012). Estos, generalmente se definen como los beneficios directos o indirectos, potenciales o reales, que los seres humanos obtienen de las funciones de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005; Martínez-Harms & Balvanera, 2012; Costanza *et al.*, 2017). Los SE pueden clasificarse en cuatro categorías: servicios de aprovisionamiento, regulación, culturales y de apoyo (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005). La vida en nuestro planeta depende enteramente de los

servicios que la tierra nos brinda a través de sus sistemas naturales (Pullanikkatil *et al.*, 2016); tales como, alimentos (Butler & Oluoch-Kosura, 2006), madera, materias primas, agua dulce, regulación del clima, ciclo de nutrientes, secuestro de carbono, purificación del agua, beneficios estéticos, y otros que son importantes para la supervivencia humana, la salud y el bienestar (Costanza *et al.*, 1997; Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005; Daily *et al.*, 2013)

Los estudios desarrollados sobre los SE han ampliado el conocimiento teórico sobre el tema (Müller *et al.*, 2010) y la creciente tendencia científica hacia el mapeo de los SE (Hauck *et al.*, 2013) se reconoce como un paso clave para incorporarlos en la toma de decisiones (Hauck *et al.*, 2013; Villamagna *et al.*, 2013). Es así como, los ejercicios de mapeo pueden ser herramientas poderosas para comprender las realidades socioculturales de las comunidades, regiones, paisajes y ecosistemas (Ryan, 2011). La evaluación de los ecosistemas y la provisión de sus SE representan un instrumento fundamental para maximizar su provisión y minimizar la degradación de los ecosistemas naturales (Lattera & Nahuelhual, 2015; Maes *et al.*, 2012). En respuesta a esto, la literatura científica ha crecido notablemente en los últimos años (Seppelt *et al.*, 2011); así como, la variedad de enfoques metodológicos para cuantificar y mapear SE destinados a establecer políticas de contabilidad verde, uso de la tierra, asignación de recursos y pagos por SE (Schägnler *et al.*, 2013).

El interés por evaluar los SE ha aumentado considerablemente (Fisher *et al.*, 2009), con un crecimiento exponencial en las últimas dos décadas de la aplicación de tecnologías para observar la superficie de la Tierra a través de Sensoramiento Remoto (SR) (Sishodia *et al.*, 2020). El SR para estudiar los SE aún no se ha explorado por completo, lo que representa un gran potencial para los procesos de monitoreo de estos (Cord *et al.*, 2017; Ramírez-Reyes *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2019) en función de las técnicas de SR y su evolución en cuanto a resolución espacial, espectral, radiométrica, temporal (Grove *et al.*, 2006; Pandey *et al.*, 2020) y, así mismo, los métodos con los que se evalúa, procesa y extrae gran cantidad de información (Bannari *et al.*, 1995) proveniente de los datos obtenidos de sensores satelitales o vehículos aéreos no tripulados – VANT.

El SR aporta al estudio de los SE los cuales permiten caracterizar variables biofísicas como el tipo de suelo (Feng *et al.*, 2010; Chinea-Horta

& Rodríguez-Izquierdo, 2021), biomasa (Montealegre *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2017; Wu, 2019), copas de árboles (O'Neil-Dunne *et al.*, 2014), índice de área foliar – LAI (Zheng & Moskal, 2009; Nafarrate-Hecht *et al.*, 2018), el monitoreo espacio-temporal de la vegetación (de Beurs & Henebry, 2004), entre otras, que, por medio de modelos, índices espectrales y fusión de procesos, permiten mapear la contribución de SE de elementos naturales en la superficie (Andrew *et al.*, 2014). A su vez, el SR se puede aplicar al estudio de la cobertura terrestre gracias a que los sensores pueden medir la radiación reflejada desde la superficie para evaluar sus propiedades (De Araujo Barbosa *et al.*, 2015).

La técnica de mapeo se ha utilizado para mostrar el estado de los SE espacial y temporalmente a los encargados de formular políticas (de Groot *et al.*, 2010; Egoh *et al.*, 2012; Hauck *et al.*, 2013) como estrategia útil en el monitoreo de los impactos de los cambios en el medio ambiente, respaldando la toma de decisiones sostenibles en cuanto a inversiones, políticas relacionadas con los recursos naturales (Daily *et al.*, 2013) y a la administración de ecosistemas a diferentes escalas, gracias a la valiosa información resultante (de Andrés *et al.*, 2023). Es así, como el SR ofrece una oportunidad única para evaluar los SE de forma sistemática y regular a diversas escalas espaciales y temporales (Avtar *et al.*, 2017; Cord *et al.*, 2017; Rieb *et al.*, 2017; Braun *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2019) siendo, probablemente, el medio más práctico y económicamente más factible para obtener información global con alta resolución temporal, espacial y espectral en grandes áreas geográficas (Ayanu *et al.*, 2012; Alcaraz-Segura *et al.*, 2013; Alonzo *et al.*, 2016).

Los enfoques, espacialmente explícitos, se han utilizado, de forma amplia, para mapear una multitud de SE, donde la teoría y la práctica se articulan para promover acciones de conservación y sostenibilidad más efectivas (Sutton & Costanza, 2002; Costanza *et al.*, 2008; Kienast *et al.*, 2009; S. Liu *et al.*, 2010; Murray *et al.*, 2012; Alcaraz-Segura *et al.*, 2013; Alamgir *et al.*, 2014; Xie & Ng, 2013). Con la aparición de productos nuevos y más sofisticados, los datos para el SR seguirán contribuyendo ampliamente a la investigación sobre modelado, mapeo y valoración de los SE (Nemani *et al.*, 2009; Verburg *et al.*, 2009; Marghany & Hashim, 2010; Zinnert *et al.*, 2011; Cabello *et al.*, 2012). En este sentido y con el objetivo de sintetizar el panorama actual en el avance y aplicación del SR

para monitorear y mapear los SE, se realizó una búsqueda especializada de literatura científica publicada durante los últimos 11 años revisando las técnicas y métodos más usados para el mapeo de SE en el nivel mundial.

Materiales y método

El procedimiento para la revisión de la literatura estuvo estructurado en tres fases: búsqueda, revisión y síntesis. La búsqueda de literatura científica consideró, en cuanto a temporalidad, los artículos científicos publicados entre el periodo de análisis de 11 años (2012 a 2023); tanto en inglés como en español. En cuanto a la estrategia de búsqueda, se seleccionaron Scopus y Web of Science – WoS - como las principales bases de datos bibliográficas, por su amplia cobertura en cuanto a áreas de investigación, incluidas las ciencias ambientales y las ciencias planetarias y de la tierra. La búsqueda de artículos en las bases de datos estuvo guiada por una sentencia específica que se refinó mediante filtros como Open Access, Document type, Source title y Relevance para limitar los resultados de búsqueda. El análisis de métricas bibliográficas se realizó usando Bibliometrix en R Studio.

Búsqueda estratégica

La búsqueda de literatura especializada se realizó a través de las bases de datos de revistas científicas indexadas Scopus y WoS. En el campo de búsqueda se utilizó la siguiente sintaxis orientada por palabras clave:

1. Ecosystem services AND remote sensing OR ecosystem services AND mapping

La búsqueda basada en las palabras anteriores se depuró utilizando el filtro de temporalidad, se seleccionaron las publicaciones realizadas entre el periodo de análisis de 11 años (2012 a 2023). De la misma manera, se filtró por tipo de publicación, con una búsqueda única de artículos de revisión y de investigación. Se incluyeron solamente las publicaciones disponibles en texto completo o de acceso libre para la fase de análisis. Se seleccionaron 19 revistas como filtro final, las cuales se desglosan en la siguiente lista:

“Remote Sensing”, “Remote Sensing Of Environment” “Land”, “Forests”, “International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation”

, “Science Of The Total Environment”, “Ecosystem Services”, “Giscience And Remote Sensing”, “International Journal Of Remote Sensing”, “Remote Sensing In Ecology And Conservation”, “European Journal Of Remote Sensing”, “International Journal Of Biodiversity Science Ecosystem Services And Management”, “Remote Sensing Applications Society And Environment”, “Journal Of Applied Remote Sensing”, “Environmental Monitoring And Assessment”, “Geo Spatial Information Science”, “Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Science”, “Journal Of Maps”, “Revista Brasileira De Cartografia”.

La búsqueda en Scopus arrojó un total de 1892 artículos y en WoS un total de 1250. Los archivos resultados de la descarga fueron organizados en Bilbiometrix y se exportaron en formato Microsoft Excel para, de manera posterior, ser combinados en RStudio y remover 371 artículos duplicados mediante la ecuación 1 y obtener un total de 2771 artículos:

$$\beta_j^0 = 10 \times \log_{10} [(DN_j^2 + A_3) A_{2j}]$$

Ecuación 1. Eliminación de artículos duplicados

Los datos que configuraron la búsqueda se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: *Parámetros de búsqueda usados en ambas bases de datos*

Parámetro	Scopus	Web of Science
Rango temporal	2012 – 2023	
Tipo de acceso	Open access	
Tipo de documento	Artículo, artículo de revisión	
Sentencia	Ecosystem services AND remote sensing OR ecosystem services AND mapping	
Resultados	1892	1250
Documentos repetidos	371	
Total (WoS + Scopus)	2771	

Fuente: Elaboración propia

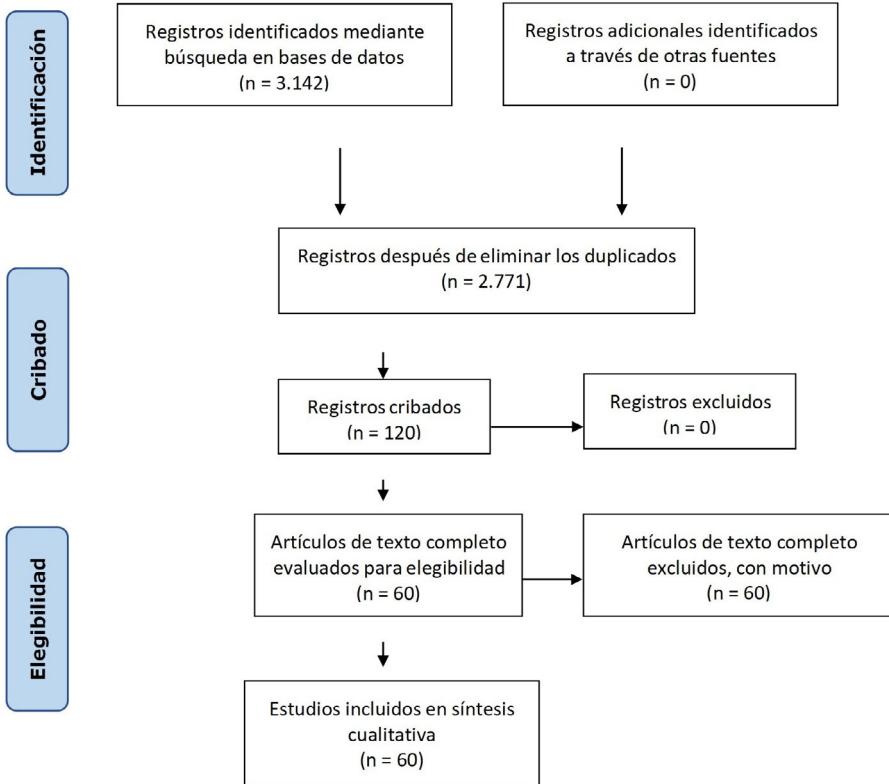
El proceso de revisión y síntesis

Los documentos resultantes de la búsqueda en Scopus y WoS se abordaron con herramientas que brinda Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), previa fusión de los registros principales y las referencias citadas.

El uso de ambos conjuntos de datos ofrece una visión amplia del estado actual de la investigación en el uso de SR para el mapeo de los SE.

Se realizó una revisión de texto completo de 40 artículos científicos, en los cuales se identificó la presencia del uso de herramientas derivadas de SR en el mapeo de SE. La información relevante se compiló en una base de datos Excel estructurada con las siguientes columnas: Autor – año – título del artículo – cita bibliográfica – ubicación – base de datos – tipo de artículo – tema – citas textuales – métodos y/o metodología – sensores remotos usados – herramientas y datos geoespaciales usados – otras técnicas usadas – resultados relevantes – comentarios. La organización de la información relevante de cada artículo a través de esta estructura permitió facilitar el proceso de síntesis y análisis de los resultados. El proceso para realizar la presente revisión bibliográfica se ilustra en la Figura 1.

Figura 1: Flujo de revisión sistemática de literatura



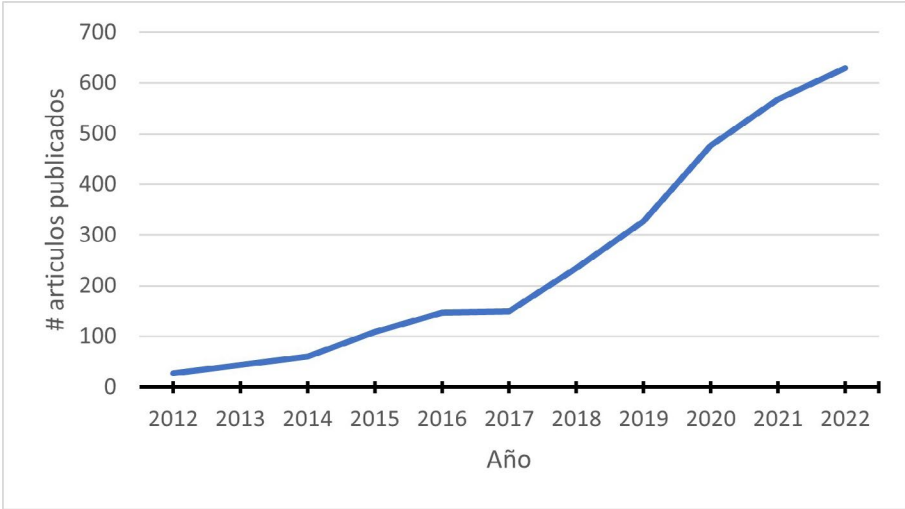
Fuente: Elaboración propia

Resultados

Análisis bibliométrico

Durante el periodo de análisis se publicaron 2771 artículos en Scopus y WoS relacionados al SR, el mapeo y los SE, los cuales presentan una tendencia de crecimiento anual promedio del 39 %. En la Figura 2 se puede observar un incremento anual en la cantidad de artículos publicados sobre mapeo de los SE y SR para tal fin.

Figura 2: Artículos científicos publicados anualmente sobre SE y SR

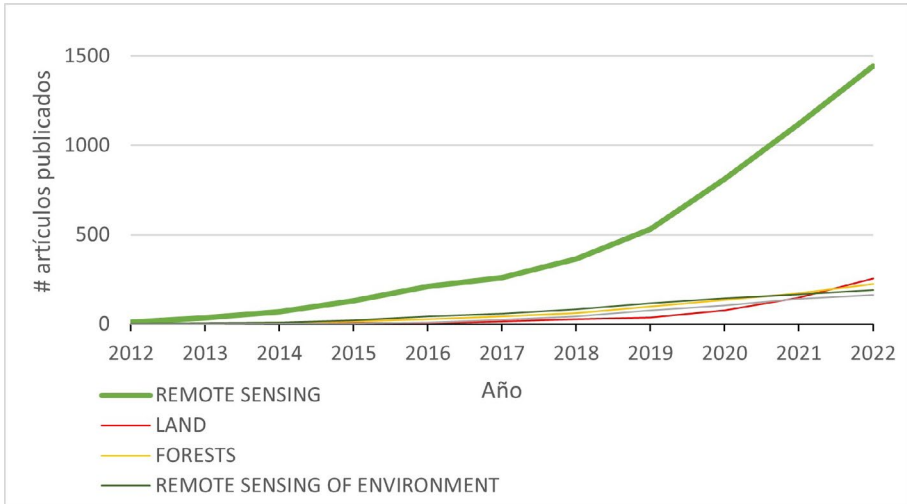


Fuente: Elaboración propia

La producción científica en esta temática es aportada principalmente por las revistas Remote Sensing (52 %), Land (9 %) y Forest (8 %) las cuales producen el 69 % de las publicaciones totales como se muestra en la Figura 3. Sin embargo, las revistas con mayor índice de impacto H son Remote Sensing (H=80), Remote Sensing of Environment (H=61) y Science of the Total Environment (H=44).

El promedio de autores es de 5,6 por cada artículo publicado con un porcentaje de colaboración internacional de coautoría del 13,5 % en esta temática. Solamente 26 documentos (1 %) del total fueron escritos por un único autor.

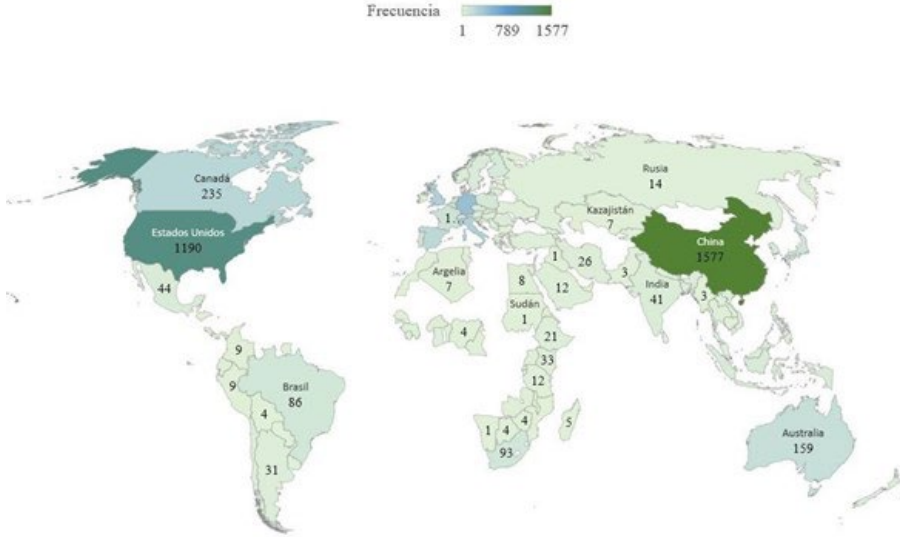
Figura 3: *Número de artículos publicados sobre SE y RS anualmente por revista científica*



Fuente: Elaboración propia

En este contexto, es importante destacar que se ha observado una tendencia creciente en la investigación centrada en el mapeo de SE en el nivel mundial, durante la última década. Los principales países en donde se han realizado estudios sobre SE y RS son China, Estados Unidos, Canadá y Australia, como se visualiza en la figura 4.

Figura 4: Distribución de estudios sobre SE y SR en el nivel global



Fuente: Elaboración propia

Imágenes satelitales para determinar el uso y cobertura de la tierra – LULC - como variable para el mapeo de SE

Los estudios que han aplicado SR, basado en el uso de imágenes satelitales, muestran enfoques similares debido a la información que se puede obtener de estas. Las principales fuentes de imágenes satelitales usadas son las de las plataformas Sentinel y Landsat (Portalanza *et al.*, 2019; del Río-Mena *et al.*, 2020; L. Wang *et al.*, 2020, 2021; Jullian *et al.*, 2021; Rayner *et al.*, 2021; Belaire *et al.*, 2022; Bera *et al.*, 2022; González-García *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2022; Ruíz Ordoñez *et al.*, 2023; van der Voort *et al.*, 2023). El uso de imágenes para el mapeo y monitoreo de SE, se enfocan principalmente en la identificación y clasificación del uso y cobertura del suelo (Volante *et al.*, 2012; Klepeis *et al.*, 2013; Rayner *et al.*, 2021; Belaire *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2022; Ruíz Ordoñez *et al.*, 2023) abordado a través de métodos y herramientas tales como clasificación de máxima verosimilitud (L. Wang *et al.*, 2020), clasificación basada en objetos – OBIA (Locke *et al.*, 2017; Y. Zhang, Li, *et al.*, 2017; Y. Zhang, Murray, *et al.*, 2017; Leroux *et al.*, 2022), enfoques basados en píxeles (McGee III *et al.*, 2012) y el uso de Google Earth Engine – GEE (Rayner *et al.*, 2021). Este

enfoque basado en mapas de uso y cobertura de la tierra es útil para mapear múltiples atributos de suministro de SE para cada cobertura de la tierra con base en estudios de campo (Clec'h *et al.*, 2016; Sinare *et al.*, 2016; Leroux *et al.*, 2022).

Investigadores como Klepeis *et al.*, (2013) y Volante *et al.*, (2012) han empleado series temporales de imágenes Landsat para medir las tasas de deforestación basadas en la clasificación de cambios en LULC y así estimar los efectos en el aprovisionamiento de materias primas y materiales genéticos en China, Argentina y Estados Unidos. Además, en el estudio realizado por Bera *et al.*, (2022), se utilizaron imágenes de Google Earth y Landsat para determinar la extensión de la cobertura forestal entre 2005 y 2020 en Bengala Occidental, y mediante muestreo estadístico probabilístico, se evaluó el impacto de estos cambios en los SE. Las imágenes de Google Earth fueron procesadas con la herramienta Collect Earth Online – CEO – permitiendo identificar el porcentaje de terreno forestal y la cubierta de copa de los píxeles muestreados. CEO es un sistema gratuito de código abierto para ver e interpretar imágenes satelitales de alta resolución que permite a los usuarios recopilar, de manera eficiente, información actualizada sobre su entorno y observar los cambios a lo largo del tiempo. Por otra parte, L. Wang *et al.*, (2021) utilizó la información de LULC derivada de imágenes y combinada con variables socioeconómicas para la estimación monetaria de SE, utilizando el método de factor equivalente, el cual se basa en identificar funciones de servicio de diferentes ecosistemas, construir equivalentes de valor cuantificables de dichas funciones y luego combinarlo con el área de distribución del ecosistema.

En la actualidad, se cuenta con una variedad de productos que brindan información detallada sobre LULC los cuales representan fuentes prometedoras para el mapeo de SE a escalas regionales y globales. Entre estos productos se encuentran conjuntos de datos como Globeland30, FROM-GLC, GLC-FCS30, que proporcionan información completa sobre la cobertura terrestre. Así mismo, existen conjuntos de datos específicos para el monitoreo de cambios forestales en el nivel global, como GFC, y un conjunto de datos globales que ofrecen información sobre cuerpos de agua, conocido como JRC GSW. Estos productos se presentan como valiosas herramientas para la identificación y seguimiento de los cambios en los sistemas ecológicos a gran escala (Hansen *et al.*, 2013; Chen *et al.*,

2015; Pekel *et al.*, 2016; C. Chen *et al.*, 2020; X. Liu *et al.*, 2020; C. Chen, Wang, Chen, *et al.*, 2021; C. Chen, Wang, Zhang, *et al.*, 2021; H. Chen *et al.*, 2021; X. Zhang *et al.*, 2021).

El uso de la información espectral que brindan las imágenes satelitales permite generar diversos índices que en asociación a la información de LULC, a menudo, se usan para cuantificar y evaluar SE tales como, regulación climática, biomasa para producción de aceite esencial (del Río-Mena *et al.*, 2020), provisión de pasto para forraje (del Río-Mena *et al.*, 2020; González-García *et al.*, 2022), carbono orgánico del suelo - COS (van der Voort *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023), prevención de la erosión (Portalanza *et al.*, 2019; del Río-Mena *et al.*, 2020), regulación del flujo de agua (del Río-Mena *et al.*, 2020; Jullian *et al.*, 2021). Por su parte, Leroux *et al.*, (2022) utilizó índices derivados de SR, tales como el índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI, el índice de vegetación de diferencia normalizada verde – GNDVI y el índice de humedad de diferencia normalizada – NDMI para evaluar las relaciones espaciales entre varios SE.

Investigadores como del Río-Mena *et al.*, (2020) estimaron el suministro de SE basados en información tomada en campo y su relación estadística con 13 índices espectrales derivados de imágenes satelitales Sentinel, identificando que, la mejor variable predictora para provisión de forraje, regulación de flujos de agua y biomasa para aceites esenciales de lavandín fue el índice de agua de diferencia normalizada – NDWI. Otros estudios (Palacios-Orueta *et al.*, 2012; Ivits *et al.*, 2012; Leroux *et al.*, 2022) han usado la información de índices de vegetación combinados con estimaciones de precipitación y coberturas del suelo para predecir el rendimiento de cultivos y pronosticar la producción de alimentos como un SE.

La cobertura de la tierra ha sido la variable proxy dominante en las evaluaciones de los SE usando SR, seguido por la utilización del índice NDVI (De Araujo Barbosa *et al.*, 2015), tal como lo afirma del Río-Mena *et al.*, (2020) los SE que dependen de la cobertura verde son evaluados con mayor precisión usando técnicas de SR.

Técnicas de geoestadística para mapear SE

En las últimas décadas, el mapeo digital de suelos ha proporcionado un marco rápido y económico para mapear el carbono orgánico en el suelo – COS (Minasny *et al.*, 2013; Lamichhane *et al.*, 2019) el cual influye

directa o indirectamente en diversas funciones y servicios relacionados con el suelo, como la producción de alimentos y la mitigación del cambio climático (Yang *et al.*, 2023). Esta variable directamente relacionada con el SE de regulación climática también ha sido mapeada por varios autores (Allocca *et al.*, 2023; van der Voort *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023) que han utilizado información de LULC, índices de vegetación, modelos digitales de elevación – DEM y técnicas geoestadísticas como el cokriging para mapear dicho SE.

Así mismo, Moushani *et al.*, (2021) mapearon los SE de apoyo, regulación, provisión y culturales en 48 campos de soja en agroecosistemas bajo la modalidad de agricultura convencional y de la conservación utilizando información de las propiedades del suelo y las herramientas de análisis geoestadístico de ArcGis como kriging, ponderación de distancia inversa e interpolación polinomial local. Uno de los algoritmos más comunes para mapear el SOC es el modelo cubista (Lamichhane *et al.*, 2019) siendo un enfoque efectivo para predecir el SOC y aplicado con éxito al mapeo a escala de país, como en Australia (Viscarra Rossel *et al.*, 2014), China (Ling *et al.*, 2017) y Francia (Mulder *et al.*, 2016). Utilizando escenarios de LULC y clima, Yigini & Panagos, (2016) aplicaron un modelo geoestadístico para predecir las existencias de SOC actuales y futuras en Europa.

Para el mapeo de la oferta, demanda y desbalance de nueve SE en Myanmar, Feurer *et al.*, (2021) utilizaron la técnica de redes bayesianas a través de la herramienta gBay Tool en el software Netica, incorporando datos de SR, de población y cualitativos. Por su parte, Inácio *et al.*, (2022) mapearon el suministro actual y futuro de 3 SE (protección contra inundaciones costeras, regulación de nutrientes y mantenimiento de condiciones de vivero) en zona costera de Lituania, utilizando datos geomorfológicos, de LULC y DEM procesados en ArcGis mediante herramientas de estadísticas zonal, calculadora ráster y análisis de puntos calientes Getis-Ord.

Así mismo, en el escenario costero europeo continental, Liquete *et al.*, (2013) evaluaron y mapearon la capacidad, el flujo y el beneficio de SE mediante el enfoque de modelo de cascada, agregando información de 14 variables biofísicas para construir los indicadores que permitieron mapear los SE, utilizando diversas herramientas de geoprocésamiento de ArcGis tales como estadística focal, ráster a polígono, intersectar, densidad, reclasificar, unión espacial, conteo entre otras.

Mapeo participativo de SE

El mapeo participativo es, quizás, el medio más destacado para obtener datos espaciales cualitativos (Davies & Dwyer, 2008) que, a menudo, incluye metodologías tanto cualitativas como cuantitativas (Brown *et al.*, 2017, 2020; García *et al.*, 2018). El estudio de García *et al.*, (2018) utilizó esta técnica aplicando entrevistas semiestructuradas basadas en mapas, en las que las personas pudieron identificar, dibujar y describir áreas o lugares específicos con valores negativos y positivos ubicando espacialmente las variables que se deseaban mapear, digitalizando y vectorizando la información, codificándola y utilizando técnicas como la Combinación Lineal Ponderada – WLC (Weighted Linear Combination) para crear mapas de conflictos paisajísticos.

En el estudio llevado a cabo por Delgado-Aguilar *et al.*, (2019) se mapearon cinco categorías de SE en un bosque tropical situado en Ecuador. Para este propósito, se empleó un enfoque mixto que combinó el mapeo participativo con el uso de datos provenientes de SR. El mapeo participativo fue utilizado para identificar tanto la demanda como la ubicación de los SE, mientras que los datos de SR se obtuvieron a través de la clasificación de la cobertura terrestre, utilizando imágenes satelitales SPOT. Esta combinación de enfoques permitió a los investigadores comprender la relación existente entre la demanda de los SE y los procesos de degradación forestal.

Discusión de resultados

El SR brinda una oportunidad excepcional para llevar a cabo evaluaciones sistemáticas y regulares de los SE en diversas escalas espaciales y temporales (Avtar *et al.*, 2017; Cord *et al.*, 2017; Rieb *et al.*, 2017; Braun *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2019) siendo, probablemente, el enfoque más económico para obtener, de manera sistemática, información global con alta resolución temporal, espacial y espectral en amplias áreas geográficas (Alcaraz-Segura *et al.*, s. f.; Ayanu *et al.*, 2012). Como señala (García-Pardo *et al.*, 2022) es crucial considerar tres factores clave al utilizar el SR para evaluar y mapear los SE: la definición del alcance del estudio, la escala de evaluación y la resolución espacial de las imágenes disponibles. Este último factor desempeña un papel fundamental en la precisión de los resultados, dado que el uso de imágenes satelitales con resoluciones bajas

dificulta la identificación de elementos cruciales para el desarrollo de los estudios. Por lo tanto, es fundamental comprender, antes de seleccionar las imágenes, la relación entre el tamaño de los objetos a analizar y el área mínima que puede ser cartografiada utilizando dicho recurso.

Al utilizar datos espectrales de SR para predecir los SE, es imprescindible primero, identificar la naturaleza de la relación entre la información espectral y los SE (De Araujo Barbosa *et al.*, 2015). Sin embargo, esto plantea varios desafíos, ya que los SE, en sí mismos, no son observables o son difíciles de medir. En este contexto, el trabajo realizado por Tiemann & Ring (2022) ofrece posibles métodos, unidades de medida y fuentes de datos necesarias para generar indicadores que permiten mapear los SE forestales. Así mismo Santos-Martin *et al.*, (2018) han compilado en su publicación los métodos utilizados para el mapeo de SE en la Unión Europea, lo cual proporciona una perspectiva valiosa y oportuna para el abordaje de esta temática.

Aunque el enfoque del mapeo participativo resulta efectivo para la identificación, localización y mapeo de SE, es esencial complementar estos datos con información proveniente de SR. Esto se evidencia en el estudio llevado a cabo por Delgado-Aguilar *et al.*, (2019), en el cual se establece una conexión entre la percepción de SE de las comunidades locales y el estado de la cobertura forestal proveniente de SR. Así mismo, el mapeo participativo basado en polígonos permite tamaños de muestra más pequeños que los estudios basados en puntos y es más adecuado para emparejar con datos cualitativos (G. G. Brown & Pullar, 2012). Esta técnica es útil, pues, para representar SE que por su naturaleza sea complicado valorarles cuantitativamente y, por consiguiente, su valoración se haga más sencilla mediante valores cualitativos.

Conclusiones

Este artículo de revisión se centró en identificar los principales métodos, insumos y técnicas relacionados de manera directa o indirecta con el SR para el mapeo de SE utilizados en el periodo de 2012 al 2023. A partir de la revisión y clasificación de los métodos usados para espacializar los SE podemos destacar el enfoque basado en el mapeo de SE usando información de LULC derivada de análisis de imágenes satelitales en asocio

con herramientas SIG como la clasificación de máxima verosimilitud, clasificación basada en objetos, en píxeles y el uso de GEE.

Este artículo representa una nueva contribución en el campo del SR enfocado al mapeo de SE, agrupando las principales estrategias metodológicas utilizadas para este propósito. De esta manera, se ha observado que la principal técnica empleada para el mapeo de SE se sustenta en análisis de imágenes satelitales para extraer información de LULC provenientes de plataformas como Sentinel, Landsat, y también imágenes de alta resolución con una resolución menor a 50 cm por píxel. Además, se ha encontrado que las herramientas de mapeo participativo que incorporan técnicas de SIG son eficaces en la ubicación, identificación y representación gráfica de SE que, por su naturaleza, dependen de valoraciones subjetivas hechas por las personas.

El mapeo de los SE mediante el uso de SR es un tema que exhibe una amplia variabilidad y distintos niveles de complejidad, debido a la diversidad de las metodologías utilizadas en la actualidad. Esta práctica requiere de la participación de equipos interdisciplinarios y equipos de cómputo de alto rendimiento para lograr resultados adecuados.

La obtención de mapas precisos de los SE a partir de las coberturas terrestres sigue siendo un desafío técnico por las incertidumbres generadas durante los procesos de clasificación de LULC, lo cual afecta los resultados finales. Además, las similitudes en la respuesta espectral de diferentes objetos en la superficie terrestre y la limitación en la resolución espacial de las imágenes contribuyen a representaciones vagas o imprecisas de los SE.

La amplia disponibilidad de datos de acceso libre provenientes de SR ofrece a la comunidad técnico-científica la oportunidad de realizar estudios enfocados en el mapeo de SE, de manera económicamente accesible. Esto, a su vez, permite que tanto los gobiernos locales como los nacionales cuenten con información valiosa sobre el estado de los SE en su territorio.

El mapeo de SE desempeña un papel fundamental en la toma de decisiones y la planificación de la gestión ambiental al proporcionar información precisa y basada en evidencia sobre la distribución espacial y el estado de los servicios que los ecosistemas brindan. Esta información ayuda, a los responsables de la toma de decisiones y a los planificadores ambientales, comprender mejor los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad y evaluar los posibles impactos de las acciones

humanas sobre dichos servicios. En resumen, el mapeo de SE proporciona una base científica sólida para la toma de decisiones y la planificación de la gestión ambiental. Al integrar esta información en los procesos de toma de decisiones, se pueden promover enfoques más sostenibles y basados en la conservación de los ecosistemas, lo que resulta en una mejor protección y gestión de los SE esenciales para el bienestar humano y la salud del planeta.

Contribución de la autoría

Primer autor: escritura, análisis de datos, metodología, conceptualización, borrador original. **Segundo autor:** revisión, edición, administrador del proyecto, supervisión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), a la Facultad de Ciencias Ambientales y al proyecto “Desarrollo e implementación de acciones estratégicas de mitigación, adaptación y resiliencia en el marco del plan integral de gestión del cambio climático territorial (PIGCCT) de Risaralda” con código BPIN 20213201010029.

Referencias bibliográficas

- Alamgir, M., Pert, P. L., & Turton, S. M. (2014). A review of ecosystem services research in Australia reveals a gap in integrating climate change and impacts on ecosystem services. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 10(2), 112-127. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.919961>.
- Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., & Garbulsky, M. F. (s. f.). *Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión*. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/82>.
- Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M., Epstein, H. E., & Cabello, J. (2013). Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing*, 5(1), 127-154. <https://doi.org/10.3390/rs5010127>.

- Allocca, C., Castrignanò, A., Nasta, P., & Romano, N. (2023). Regional-scale assessment of soil functions and resilience indicators: Accounting for change of support to estimate primary soil properties and their uncertainty. *Geoderma*, 431, 116339. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116339>.
- Alonzo, M., McFadden, J. P., Nowak, D. J., & Roberts, D. A. (2016). Mapping urban forest structure and function using hyperspectral imagery and lidar data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 17, 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.003>.
- Andrew, M. E., Wulder, M. A., & Nelson, T. A. (2014). Potential contributions of remote sensing to ecosystem service assessments. *Progress in Physical Geography*, 38(3), 328-353. <https://doi.org/10.1177/0309133314528942>.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2017.08.007>.
- Avtar, R., Kumar, P., Oono, A., Saraswat, C., Dorji, S., & Hlaing, Z. (2017). Potential application of remote sensing in monitoring ecosystem services of forests, mangroves and urban areas. *Geocarto International*, 32(8), 874-885. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1206974>.
- Ayanu, Y. Z., Conrad, C., Nauss, T., Wegmann, M., & Koellner, T. (2012). Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: A review of remote sensing applications. *Environmental Science and Technology*, 46(16), 8529-8541. <https://doi.org/10.1021/es300157u>.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices - Remote Sensing Reviews. *Remote Sensing Reviews*, 13(1).
- Belaire, J. A., Higgins, C., Zoll, D., Lieberknecht, K., Bixler, R. P., Neff, J. L., Keitt, T. H., & Jha, S. (2022). Fine-scale monitoring and mapping of biodiversity and ecosystem services reveals multiple synergies and few tradeoffs in urban green space management. *Science of The Total Environment*, 849, 157801. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157801>.

- Bera, D., Chatterjee, N. das, Ghosh, S., Dinda, S., Bera, S., & Mandal, M. (2022). Assessment of forest cover loss and impacts on ecosystem services: Coupling of remote sensing data and people's perception in the dry deciduous forest of West Bengal, India. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131763. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131763>.
- Braun, D., de Jong, R., Schaepman, M. E., Furrer, R., Hein, L., Kienast, F., & Damm, A. (2019). Ecosystem service change caused by climatological and non-climatological drivers: a Swiss case study. *Ecological Applications*, 29(4). <https://doi.org/10.1002/eap.1901>.
- Brown, G. G., & Pullar, D. V. (2012). An evaluation of the use of points versus polygons in public participation geographic information systems using quasi-experimental design and Monte Carlo simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(2), 231-246. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.585139>.
- Brown, G., Reed, P., & Raymond, C. M. (2020). Mapping place values: 10 lessons from two decades of public participation GIS empirical research. *Applied Geography*, 116, 102156. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2020.102156>.
- Brown, G., Strickland-Munro, J., Kobryn, H., & Moore, S. A. (2017). Mixed methods participatory GIS: An evaluation of the validity of qualitative and quantitative mapping methods. *Applied Geography*, 79, 153-166. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2016.12.015>.
- Butler, C. D., & Oluoch-Kosura, W. (2006). Linking future ecosystem services and future human well-being. *Ecology and Society*, 11(1). <https://doi.org/10.5751/ES-01602-110130>.
- Cabello, J., Fernández, N., Alcaraz-Segura, D., Oyonarte, C., Piñeiro, G., Altesor, A., Delibes, M., & Paruelo, J. M. (2012). The ecosystem functioning dimension in conservation: Insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, 21(13), 3287-3305. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0370-7>.
- Chen, C., He, X., Guo, B., Zhao, X., & Chu, Y. (2020). A pixel-level fusion method for multi-source optical remote sensing image combining the principal component analysis and curvelet transform. *Earth Science Informatics*, 13(4), 1005-1013. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00472-7>.

- Chen, C., Wang, L., Chen, J., Liu, Z., Liu, Y., & Chu, Y. (2021). A seamless economical feature extraction method using Landsat time series data. *Earth Science Informatics*, 14(1), 321-332. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00564-4>.
- Chen, C., Wang, L., Zhang, Z., Lu, C., Chen, H., & Chen, J. (2021). Construction and application of quality evaluation index system for remote-sensing image fusion. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16(1), 12006. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.012006>.
- Chen, H., Chen, C., Zhang, Z., Lu, C., Wang, L., He, X., Chu, Y., & Chen, J. (2021). Changes of the spatial and temporal characteristics of land-use landscape patterns using multi-temporal Landsat satellite data: A case study of Zhoushan Island, China. *Ocean & Coastal Management*, 213, 105842. <https://doi.org/10.1016/j.OCECOAMAN.2021.105842>.
- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., Lu, M., Zhang, W., Tong, X., & Mills, J. (2015). Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7-27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>.
- Chinea-Horta, A., & Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1).
- Clec'h, S. le, Oszwald, J., Decaens, T., Desjardins, T., Dufour, S., Grimaldi, M., Jegou, N., & Lavelle, P. (2016). Mapping multiple ecosystem services indicators: Toward an objective-oriented approach. *Ecological Indicators*, 69, 508-521. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.021>.
- Cord, A. F., Brauman, K. A., Chaplin-Kramer, R., Huth, A., Ziv, G., & Seppelt, R. (2017). Priorities to Advance Monitoring of Ecosystem Services Using Earth Observation. *Trends in Ecology and Evolution*, 32(6), 416-428. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.003>.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. v, Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>.

- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2017.09.008>.
- Costanza, R., Pérez-Maqueo, O., Martínez, M. L., Sutton, P., Anderson, S. J., & Mulder, K. (2008). The value of coastal wetlands for hurricane protection. *Ambio*, 37(4), 241-248. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2008\)37\[241:TVOCWF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2008)37[241:TVOCWF]2.0.CO;2).
- Daily, G. C., Kareiva, P. M., Polasky, S., Ricketts, T. H., & Tallis, H. (2013). Mainstreaming natural capital into decisions. *Natural Capital*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199588992.003.0001>
- Davies, G., & Dwyer, C. (2008). Qualitative methods II: Minding the gap. *Progress in Human Geography*, 32(3), 399-406. <https://doi.org/10.1177/0309132507084403>.
- de Andrés, M., Barragán Muñoz, J. M., García Onetti, J., & Chavarria Zuniga, L. D. (2023). Mapping services for an ecosystem based management along the Andalusian coastal zone (Spain). *Ocean & Coastal Management*, 231, 106402. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2022.106402>.
- de Araujo Barbosa, C. C., Atkinson, P. M., & Dearing, J. A. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430-443. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2015.01.007>.
- de Beurs, K. M., & Henebry, G. M. (2004). Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 89(4). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.006>.
- de Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemsen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7(3), 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>.

- del Río-Mena, T., Willemen, L., Tesfamariam, G. T., Beukes, O., & Nelson, A. (2020). Remote sensing for mapping ecosystem services to support evaluation of ecological restoration interventions in an arid landscape. *Ecological Indicators*, 113, 106182. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106182>.
- Delgado-Aguilar, M. J., Hinojosa, L., & Schmitt, C. B. (2019). Combining remote sensing techniques and participatory mapping to understand the relations between forest degradation and ecosystems services in a tropical rainforest. *Applied Geography*, 104, 65-74. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2019.02.003>.
- Egoh, B., Drakou, E. G., Dunbar, M. B., Maes, J., & Willemen, L. (2012). Indicators for mapping ecosystem services: a review. *JRC Scientific and Policy Reports* (Número November). <https://doi.org/10.2788/41823>.
- Feng, X., Fu, B., Yang, X., & Lü, Y. (2010). Remote sensing of ecosystem services: An opportunity for spatially explicit assessment. *Chinese Geographical Science*, 20(6), 522-535. <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0428-y>.
- Feurer, M., Rueff, H., Celio, E., Heinimann, A., Blaser, J., Htun, A. M., & Zaehring, J. G. (2021). Regional scale mapping of ecosystem services supply, demand, flow and mismatches in Southern Myanmar. *Ecosystem Services*, 52, 101363. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2021.101363>.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>.
- García, X., Benages-Albert, M., & Vall-Casas, P. (2018). Landscape conflict assessment based on a mixed methods analysis of qualitative PPGIS data. *Ecosystem Services*, 32, 112-124. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2018.07.003>.
- García-Pardo, K. A., Moreno-Rangel, D., Domínguez-Amarillo, S., & García-Chávez, J. R. (2022). Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127636. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127636>.

- González-García, A., Palomo, I., González, J. A., García-Diez, V., García-Llorente, M., & Montes, C. (2022). Biodiversity and ecosystem services mapping: Can it reconcile urban and protected area planning? *Science of The Total Environment*, 803, 150048.
- Grove, J. M., Cadenasso, M. L., Burch Jr., W. R., Pickett, S. T. A., Schwarz, K., O'Neil-Dunne, J., Wilson, M., Troy, A., & Boone, C. (2006). Data and methods comparing social structure and vegetation structure of urban neighborhoods in Baltimore, Maryland. *Society and Natural Resources*, 19(2), 117-136. <https://doi.org/10.1080/08941920500394501>.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Hauck, J., Görg, C., Varjopuro, R., Ratamáki, O., & Jax, K. (2013). Benefits and limitations of the ecosystem services concept in environmental policy and decision making: Some stakeholder perspectives. *Environmental Science & Policy*, 25, 13-21. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2012.08.001>.
- Inácio, M., Karnauskaitė, D., Gomes, E., Barceló, D., & Pereira, P. (2022). Mapping and assessment of future changes in the coastal and marine ecosystem services supply in Lithuania. *Science of The Total Environment*, 812, 152586. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152586>.
- Ivits, E., Cherlet, M., Tóth, G., Sommer, S., Mehl, W., Vogt, J., & Micale, F. (2012). Combining satellite derived phenology with climate data for climate change impact assessment. *Global and Planetary Change*, 88-89, 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.03.010>.
- Jullian, C., Nahuelhual, L., & Laterra, P. (2021). The Ecosystem Service Provision Index as a generic indicator of ecosystem service supply for monitoring conservation targets. *Ecological Indicators*, 129, 107855. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107855>.

- Kienast, F., Bolliger, J., Potschin, M., de Groot, R. S., Verburg, P. H., Heller, I., Wascher, D., & Haines-Young, R. (2009). Assessing landscape functions with broad-scale environmental data: Insights gained from a prototype development for Europe. *Environmental Management*, 44(6), 1099-1120. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9384-7>.
- Klepeis, P., Scull, P., Lalonde, T., Svajlenka, N., & Gill, N. (2013). Changing forest recovery dynamics in the northeastern United States. *Area*, 45(2), 239-248. <https://doi.org/10.1111/area.12016>.
- Lamichhane, S., Kumar, L., & Wilson, B. (2019). Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma*, 352, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.031>.
- Lattera, P., & Nahuelhual, L. (2015). Internalización de los servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial rural: bases conceptuales y metodológicas. Capítulo 5, pp. 86-106. En: Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Lattera, P., Dieguez, H., García, M. A., Panizza, A. (2014). *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. FAI-MINAGRI-FAUBA. FAO, p. 500. Isbn 978-1-873671-00-9. <http://www.fao.org/3/a-i4195s.pdf>.
- Leroux, L., Clermont-Dauphin, C., Ndienor, M., Jourdan, C., Rounsard, O., & Seghier, J. (2022). A spatialized assessment of ecosystem service relationships in a multifunctional agroforestry landscape of Senegal. *Science of The Total Environment*, 853, 158707. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.158707>.
- Ling, J., Hutchinson, M., Antono, E., Paradiso, S., & Meredig, B. (2017). High-Dimensional Materials and Process Optimization Using Data-Driven Experimental Design with Well-Calibrated Uncertainty Estimates. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 6(3), 207-217. <https://doi.org/10.1007/s40192-017-0098-z>.
- Liquete, C., Zulian, G., Delgado, I., Stips, A., & Maes, J. (2013). Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecological Indicators*, 30, 205-217. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2013.02.013>.

- Liu, S., Costanza, R., Troy, A., D'Aagostino, J., & Mates, W. (2010). Valuing New Jersey's ecosystem services and natural capital: A spatially explicit benefit transfer approach. *Environmental Management*, 45(6), 1271-1285. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9483-5>.
- Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciais, P., Lin, P., Gong, K., Ziegler, A. D., Chen, A., Gong, P., Chen, J., Hu, G., Chen, Y., Wang, S., Wu, Q., Huang, K., Estes, L., & Zeng, Z. (2020). High-spatio-temporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, 3(7), 564-570. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0521-x>.
- Locke, D. H., Romolini, M., Galvin, M. F., & Strauss, E. G. (2017). Tree Canopy Change in Coastal Los Angeles, 2009-2014. *Cities and the Environment*, 10(2).
- Maes, J., Egoh, B., Willemen, L., Liqueste, C., Vihervaara, P., Schägner, J. P., Grizzetti, B., Drakou, E. G., Notte, A. la, Zulian, G., Bouraoui, F., Luisa Paracchini, M., Braat, L., & Bidoglio, G. (2012). Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 1(1), 31-39. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2012.06.004>.
- Marghany, M., & Hashim, M. (2010). MODIS satellite data for modeling chlorophyll-a concentrations in Malaysian coastal waters. *International Journal of Physical Sciences*, 5(10), 1489-1495.
- Martínez-Harms, M. J., & Balvanera, P. (2012). Methods for mapping ecosystem service supply: A review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 8(1-2), 17-25. <https://doi.org/10.1080/21513732.2012.663792>.
- McGee III, J. A., Day, S. D., Wynne, R. H., & White, M. B. (2012). Using geospatial tools to assess the urban tree canopy: Decision support for local governments. *Journal of Forestry*, 110(5), 275-286. <https://doi.org/10.5849/jof.11-052>.
- Millennium Ecosystem Assessment (Program). (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment*. World Resources Institute.
- Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., & Wheeler, I. (2013). Digital Mapping of Soil Carbon. *Advances in Agronomy*, 118, 1-47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00001-3>.

- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2015). *Estimación de variables dasométricas en masas de Pinus halepensis Mill. Mediante datos LiDAR-PNOA y trabajo de campo*. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Moushani, S., Kazemi, H., Klug, H., Esmail Asadi, M., & Soltani, A. (2021). Ecosystem service mapping in soybean agroecosystems. *Ecological Indicators*, 121, 107061. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.107061>.
- Mulder, V. L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A. C., Martin, M. P., & Arrouays, D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma*, 263, 16-34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.035>.
- Müller, F., Burkhard, B., & Kroll, F. (2010). *Resilience, Integrity and Ecosystem Dynamics: Bridging Ecosystem Theory and Management*. En J.-C. Otto & R. Dikau (Eds.), *Landform-Structure, Evolution, Process Control* (pp. 221-242). Springer Berlin Heidelberg.
- Murray, N. J., Phinn, S. R., Clemens, R. S., Roelfsema, C. M., & Fuller, R. A. (2012). Continental scale mapping of tidal flats across east Asia using the landsat archive. *Remote Sensing*, 4(11), 3417-3426. <https://doi.org/10.3390/rs4113417>.
- Nafarrate-Hecht, A. C., Dupuy-Rada, J. M., George-Chacon, S. P., & Hernández-Stefanoni, J. L. (2018). Modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución. *Madera y Bosques*, 24(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431666>.
- Nemani, R., Hashimoto, H., Votava, P., Melton, F., Wang, W., Michaelis, A., Mutch, L., Milesi, C., Hiatt, S., & White, M. (2009). Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS). *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1497-1509. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.017>.
- O'Neil-Dunne, J., MacFaden, S., & Royar, A. (2014). A versatile, production-oriented approach to high-resolution tree-canopy mapping in urban and suburban landscapes using GEOBIA and data fusion. *Remote Sensing*, 6(12), 12837-12865. <https://doi.org/10.3390/rs61212837>.

- Palacios-Orueta, A., Huesca, M., Whiting, M. L., Litago, J., Khanna, S., García, M., & Ustin, S. L. (2012). Derivation of phenological metrics by function fitting to time-series of Spectral Shape Indexes ASI and AS2: Mapping cotton phenological stages using MODIS time series. *Remote Sensing of Environment*, 126, 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.002>.
- Pandey, P. C., Balzter, H., Srivastava, P. K., Petropoulos, G. P., & Bhattacharya, B. (2020). Future perspectives and challenges in hyperspectral remote sensing. *Hyperspectral Remote Sensing: Theory and Applications*, 429-439. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102894-0.00021-8>.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
- Portalanza, D., Barral, M. P., Villa-Cox, G., Ferreira-Estafanous, S., Herrera, P., Durigon, A., & Ferraz, S. (2019). Mapping ecosystem services in a rural landscape dominated by cacao crop: A case study for Los Rios province, Ecuador. *Ecological Indicators*, 107, 105593. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.105593>.
- Pullanikkatil, D., Palamuleni, L. G., & Ruhiiga, T. M. (2016). Land use/land cover change and implications for ecosystems services in the Likangala River Catchment, Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.002>.
- Ramírez-Reyes, C., Brauman, K. A., Chaplin-Kramer, R., Galford, G. L., Adamo, S. B., Anderson, C. B., Anderson, C., Allington, G. R. H., Bagstad, K. J., Coe, M. T., Cord, A. F., Dee, L. E., Gould, R. K., Jain, M., Kowal, V. A., Muller-Karger, F. E., Norriss, J., Potapov, P., Qiu, J., ... Wright, T. M. (2019). Reimagining the potential of Earth observations for ecosystem service assessments. *Science of the Total Environment* (Vol. 665). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.150>.
- Rayner, M., Balzter, H., Jones, L., Whelan, M., & Stoate, C. (2021). Effects of improved land-cover mapping on predicted ecosystem service outcomes in a lowland river catchment. *Ecological Indicators*, 133, 108463. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.108463>.

- Rieb, J. T., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Armsworth, P. R., Böhning-Gaese, K., Bonn, A., Cumming, G. S., Eigenbrod, F., Grimm, V., Jackson, B. M., Turner, M. G., & Bennett, E. M. (2017). When, Where, and How Nature Matters for Ecosystem Services: Challenges for the Next Generation of Ecosystem Service Models. *BioScience*, 67(9), 820-833. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix075>.
- Ruiz Ordoñez, D. M., Camacho De Angulo, Y. V., Pencué Fierro, E. L., & Figueroa Casas, A. (2023). Mapping Ecosystem Services in an Andean Water Supply Basin. *Sustainability*, 15(3), 1793. <https://doi.org/10.3390/su15031793>.
- Ryan, R. L. (2011). The social landscape of planning: Integrating social and perceptual research with spatial planning information. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 361-363. <https://doi.org/10.1016/j.LANDURBPLAN.2011.01.015>.
- Santos-Martin, F., Viinikka, A., Mononen, L., Brander, L. M., Vihervaara, P., Liekens, I., & Potschin-Young, M. (2018). Creating an operational database for ecosystems services mapping and assessment methods. *One Ecosystem*, 3. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e26719>.
- Schägnler, J. P., Brander, L., Maes, J., & Hartje, V. (2013). Mapping ecosystem services' values: Current practice and future prospects. *Ecosystem Services*, 4, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.003>.
- Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F. V., Lautenbach, S., & Schmidt, S. (2011). A quantitative review of ecosystem service studies: Approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 630-636.
- Silva, C.A., Hudak, A. T., Vierling, L.A., Klauberg, C., García, M., Ferraz, A., Keller, M., Eitel, J. and Saatchi, S. (2017). Impacts of Airborne Lidar Pulse Density on Estimating Biomass Stocks and Changes in a Selectively Logged Tropical Forest. *Remote Sensing*, 9, 1068.
- Sinare, H., Gordon, L. J., & Enfors Kautsky, E. (2016). Assessment of ecosystem services and benefits in village landscapes – A case study from Burkina Faso. *Ecosystem Services*, 21, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.08.004>.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.

- Sutton, P. C., & Costanza, R. (2002). Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 41(3). [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00097-6).
- Tao, Y., Tao, Q., Sun, X., Qiu, J., Pueppke, S. G., Ou, W., Guo, J., & Qi, J. (2022). Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: A case study in the Yangtze River Delta of China. *Ecosystem Services*, 56, 101448. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2022.101448>.
- Tiemann, A., & Ring, I. (2022). Towards ecosystem service assessment: Developing biophysical indicators for forest ecosystem services. *Ecological Indicators*, 137, 108704. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108704>.
- van der Voort, T. S., Verweij, S., Fujita, Y., & Ros, G. H. (2023). Enabling soil carbon farming: presentation of a robust, affordable, and scalable method for soil carbon stock assessment. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00856-7>.
- Vargas, L., Willems, L., & Hein, L. (2019). Assessing the Capacity of Ecosystems to Supply Ecosystem Services Using Remote Sensing and An Ecosystem Accounting Approach. *Environmental Management*, 63(1). <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1110-x>.
- Verburg, P. H., van de Steeg, J., Veldkamp, A., & Willems, L. (2009). From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1327-1335. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.08.005>.
- Villamagna, A. M., Angermeier, P. L., & Bennett, E. M. (2013). Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 15, 114-121. <https://doi.org/10.1016/J.ECOCOM.2013.07.004>.
- Viscarra Rossel, R. A., Webster, R., Bui, E. N., & Baldock, J. A. (2014). Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change. *Global Change Biology*, 20(9), 2953-2970. <https://doi.org/10.1111/gcb.12569>.

- Volante, J. N., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M. J., Viglizzo, E. F., & Paruelo, J. M. (2012). Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.012>.
- Wang, L., Chen, C., & Wang, K. (2020). Estimation of ecosystem services value based on land use and cover change information derived from remote sensing data. *E3S Web of Conferences*, 198. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019804026>.
- Wang, L., Chen, C., Xie, F., Hu, Z., Zhang, Z., Chen, H., He, X., & Chu, Y. (2021). Estimation of the value of regional ecosystem services of an archipelago using satellite remote sensing technology: A case study of Zhoushan Archipelago, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105, 102616. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2021.102616>.
- Wu, J. (2019). Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164347>.
- Xie, Y. J., & Ng, C. N. (2013). Exploring spatio-temporal variations of habitat loss and its causal factors in the Shenzhen River cross-border watershed. *Applied Geography*, 39, 140-150. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.01.001>.
- Yang, R. M., Huang, L. M., Zhang, X., Zhu, C. M., & Xu, L. (2023). Mapping the distribution, trends, and drivers of soil organic carbon in China from 1982 to 2019. *Geoderma*, 429, 116232. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.116232>.
- Yigini, Y., & Panagos, P. (2016). Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of the Total Environment*, 557-558, 838-850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>.
- Zhang, X., Liu, L., Chen, X., Gao, Y., Xie, S., & Mi, J. (2021). GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 13(6), 2753-2776. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2753-2021>.

- Zhang, Y., Li, Q., Huang, H., Wu, W., Du, X., & Wang, H. (2017). The combined use of remote sensing and social sensing data in fine-grained urban land use mapping: A case study in Beijing, China. *Remote Sensing*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/rs9090865>.
- Zhang, Y., Murray, A. T., & Turner, B. L. (2017). Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landscape and Urban Planning*, 165, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.04.009>.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/s90402719>.
- Zinnert, J. C., Shiflett, S. A., Vick, J. K., & Young, D. R. (2011). Woody vegetative cover dynamics in response to recent climate change on an Atlantic coast barrier Island: A remote sensing approach. *Geocarto International*, 26(8), 595-612. <https://doi.org/10.1080/10106049.2011.621031>.