



Evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica a partir de SIG y técnicas estadísticas: una revisión sistémica

Leonardo Machado Arteaga

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Juan José García Duque, Especialista (Esp) en Medio Ambiente y Geoinformática

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita

(Machado Arteaga, 2022)

Referencia

Machado Arteaga, L. (2022). Evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica a partir de SIG y técnicas estadísticas: una revisión sistémica [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XVII.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
1 Planteamiento del problema	8
2 Objetivos	10
3 Marco teórico	11
4 Metodología	17
5 Resultados	20
6 Conclusiones	24
Referencias	26

Lista de figuras

Figura 1 Proceso para la evaluación de los SE de regulación hídrica a partir de los SIG y técnica estadísticas.....	12
Figura 2 Etapas de la metodología ProKnow - C.....	17

Resumen

El conocimiento del territorio a partir de la identificación de los lugares de importancia ambiental especialmente aquellos con funciones en la prestación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica, se convierte en un insumo vital para los tomadores de decisiones y a su vez para la focalización de estrategias de conservación y restauración. Por lo tanto, se deben considerar las diferentes metodologías que emplean los SIG y las técnicas estadísticas para su evaluación y cartografía.

Para ello se realizará un rastreo de la bibliografía que analiza y desarrolla los diferentes métodos empleados para la evaluación de los servicios ecosistémicos; adoptando así la metodología Proknow – C, que permite mediante la realización de un análisis bibliométrico y sistémico, la construcción del portafolio bibliográfico, objetivo final de la monografía.

Se espera identificar las principales herramientas utilizadas, como el caso de SWAT e InVEST, así como la tendencia de evaluar los servicios hidrológicos relacionados con la provisión del agua. Asimismo, el uso tanto de técnicas estadísticas como el método multivariado especialmente Análisis de Componentes Principales (PCA), en conjunto con técnicas cartográficas mediante el uso de SIG, orientados a la identificación y delimitación de áreas protegidas, la integración del territorio y sus componentes ecológicos, así como la identificación de zonas aptas para la ubicación de infraestructura de alto impacto y la localización de las áreas con prestación de servicios ecosistémicos, los cuales se pretenden evaluar con mayor detalle tanto su aplicación como resultados en el desarrollo de la monografía.

Palabras clave: servicios ecosistémicos, regulación hídrica, SIG, técnicas estadísticas, análisis multivariado

Abstract

Knowledge of the territory from the identification of environmentally important sites, especially those with functions in the provision of ecosystem services of water regulation, becomes a vital input for decision makers and in turn for the targeting of conservation and restoration strategies. Therefore, the different methodologies used by GIS and statistical techniques for their evaluation and mapping should be considered.

For this purpose, the bibliography that analyzes and develops the different methods used for the evaluation of ecosystem services will be traced; thus, adopting the Proknow - C methodology, which allows, through a bibliometric and systemic analysis, the construction of the bibliographic portfolio, the final objective of the monograph.

It is expected to identify the main tools used, such as SWAT and InVEST, as well as the tendency to evaluate hydrological services related to water provision. Also, the use of statistical techniques such as the multivariate method, especially Principal Component Analysis (PCA), together with cartographic techniques through the use of GIS, oriented to the identification and delimitation of protected areas, the integration of the territory and its ecological components, as well as the identification of areas suitable for the location of high impact infrastructure and the location of areas with provision of ecosystem services, which are intended to be evaluated in greater detail both its application and results in the development of the monograph.

Keywords: ecosystem services, water regulation, GIS, statistical techniques, multivariate analysis

Introducción

Identificar los lugares de importancia ambiental los cuales tiene funciones en la prestación de los servicios ecosistémicos, más específicamente de regulación hídrica, se convierte en una necesidad por parte de las entidades territoriales y ambientales, y cuyo desconocimiento limita la gestión integral del territorio y la implementación de programas y estrategias de conservación y restauración de los ecosistemas (Paredes-Leguizamón, 2018). A lo cual se suma el desconocimiento de las herramientas metodológicas para llevar a cabo la identificación, evaluación y localización de los lugares de importancia estratégica.

A partir de lo anterior, surge la necesidad primero de, localizar y cartografiar dichos lugares, acompañado de una caracterización detallada en la que se integren diferentes elementos que componen los ecosistemas, desde los aspectos físicos y bióticos, y que brinden las particularidades requeridas. Y segundo, de conocer las diferentes herramientas disponibles para llevar a cabo el proceso, en este caso aquellas que permitan ubicar elementos geográficos como los SIG, acompañado de un desarrollo con sustento científico y estadístico que valide los resultados obtenidos.

Pero dada la cantidad de procesos y métodos que se pueden emplear, se debe reducir el campo de acción y considerar aquellas que le apunten directamente al problema, y por lo tanto dar respuesta a la pregunta, ¿cómo se han implementado los SIG y las técnicas estadísticas en la evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica?, y así conocer los diferentes artículos en torno al tema de investigación.

Pero para llegar a ello se considera un procedimiento metodológico de revisión bibliográfica, que brinda herramientas para la construcción del portafolio bibliográfico, y que, mediante un análisis bibliométrico y sistémico, permite conocer los autores y revistas que tratan la temática, además de los objetivos, disertaciones y resultados allí obtenidos (Ossa-Carrasquilla et al., 2020), para lo cual se selecciona la metodología Proknow – C.

Finalmente, se lleva a cabo el proceso metodológico identificando los autores que han abordado la temática, al igual que la revisión de los principales resultados obtenidos en las diferentes investigaciones, en cuanto a métodos empleados, procesos realizados, muestras utilizadas, datos obtenidos y principales aportes generados, que dejan una base importante en la construcción de la monografía.

1 Planteamiento del problema

El desconocimiento de los lugares de importancia estratégica por parte de los tomadores de decisiones ha dificultado la implementación de programas y estrategias para su conservación, y lo cual constituye una de las principales problemáticas para la correcta gestión del territorio. Partiendo de reconocer las funciones que desempeñan dichos lugares en el bienestar humano, y así mismo incorporar sus valores materiales y tangibles en la toma de decisiones desde los diferentes niveles e instituciones, tanto locales como regionales y nacionales.

Es así, como desde las últimas décadas, se han venido generando esfuerzos y desarrollando programas para abordar dicha temática, muestra de ello es el Natural Capital Project, programa llevado a cabo entre la Universidad de Stanford, The Nature Conservancy y la World Wildlife Fund con la finalidad de integrar el conocimiento de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones a lo largo del mundo, para lo cual se requiere una valoración de los servicios ecosistémicos, políticas efectivas y mecanismos financieros, valores que están siendo infravalorados por parte de los gobiernos, empresas y público en general (Daily et al., 2009).

Los retos entonces están relacionados en primera medida con los avances de la ciencia de los servicios ecosistémicos realizadas por la comunidad científica, que brindan un conocimiento y las herramientas necesarias para pronosticar o cuantificar los rendimientos. Por otro lado, estos conocimientos deben integrarse explícita y sistemáticamente en la toma de decisiones, por parte de individuos, corporaciones y gobierno, ya que sin estos avances los esfuerzos para la conservación y el bienestar humano se hacen insuficientes, y con repercusiones en los programas de inversión necesarios para llevar a cabo el objetivo, por lo cual se deben desarrollar bases científicas, políticas y mecanismos de financiamientos para aumentar el capital y por consiguiente mejores decisiones sobre los recursos y uso de la tierra.

Proceso que se está enmarcado dentro de un ciclo, que comienza con la caracterización de los ecosistemas mediante modelos biofísicos, que permiten determinar a su vez los servicios prestados, para posteriormente cuantificar los valores en términos de modelos económicos y culturales, y que debe ser información suministrada a las instituciones para finalmente generar los incentivos y contribuir en la toma de decisiones, y así generar acciones y plantear escenarios respecto a los ecosistemas; proceso que se replica en cada uno de los casos generando un ciclo en el cual se logra un beneficio de todas las partes involucradas (Daily et al., 2009).

Sin embargo, en la presente monografía y partiendo de un problema localizado en la parte final del ciclo y relacionado con la toma de decisiones hacia la gestión del territorio, solo se aborda la parte inicial respecto a la caracterización de los ecosistemas y los servicios asociados, mediante herramientas generadas desde las instituciones académicas o científicas, a través de una revisión sistémica que ayude a generar un concepto respecto a las mismas y su réplica futura.

En ese sentido, se pretende de manera específica, llegar a conocer las bases metodológicas para la implementación de herramientas SIG y técnicas estadísticas para el conocimiento y caracterización de estos lugares de importancia ambiental, hacia la construcción de un insumo de gran importancia y valor en la gestión del territorio.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la aplicación de los SIG y técnicas estadísticas en la evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar la producción científica sobre el uso de SIG y las técnicas implementadas en el proceso de evaluación de los servicios ecosistémicos.
- Describir las metodologías que abordan la evaluación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica.
- Analizar las herramientas que permiten la espacialización de los servicios ecosistémicos para la implementación de estrategias de conservación.

3 Marco teórico

La construcción de una monografía implica llevar a cabo una revisión bibliográfica sobre los diferentes autores que han tratado el tema de investigación seleccionado. Para lo cual se debe iniciar con la identificación de los artículos científicos, artículos de revisión, capítulos de libros, entre otros, que aborden las herramientas descritas (SIG y técnicas estadísticas) con un enfoque que permita la evaluación y espacialización de las zonas de importancia ambiental, con funciones en la prestación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica.

En el caso particular, y dada la amplitud tanto de los métodos empleados, como de los elementos considerados motivo de investigación, más específicamente el tipo de servicios ecosistémicos abordados, y entendidos como los múltiples beneficios que brindan los ecosistemas a la sociedad, resultado de la interacción de los componentes, estructuras y funciones propias de la biodiversidad (Lee & Lautenbach, 2016) (MADS, 2012), se debe realizar un acotamiento en el tipo de interés y en el objetivo final.

Muestra de ello corresponde a los diferentes artículos de revisión que realizan un barrido y análisis de la evaluación e interacción entre los servicios ecosistémicos, donde se logra tener un panorama general y se identifica las diferentes metodologías y herramientas empleadas para su evaluación, entre las que se destaca un mayor uso de los modelos lógicos y empíricos, seguidos por extrapolaciones, por proceso de simulación y por métodos de mapeo directo (Ruiz Agudelo et al., 2020). Asimismo, se identifica que es común el uso de herramientas y programas especializados para su modelación entre los que se encuentran SWAT, y con un aumento en los últimos años del uso del programa InVEST (Ochoa & Urbina-Cardona, 2017).

Otro aspecto importante que evalúan los diferentes autores corresponde al tipo de servicio ecosistémico abordado en las investigaciones, entre los que se destaca los servicios hidrológicos relacionados con la provisión de agua y tratamiento de la calidad, llevados a cabo a lo largo de cuencas hidrológicas (Ochoa & Urbina-Cardona, 2017), consideración importante para el presente estudio.

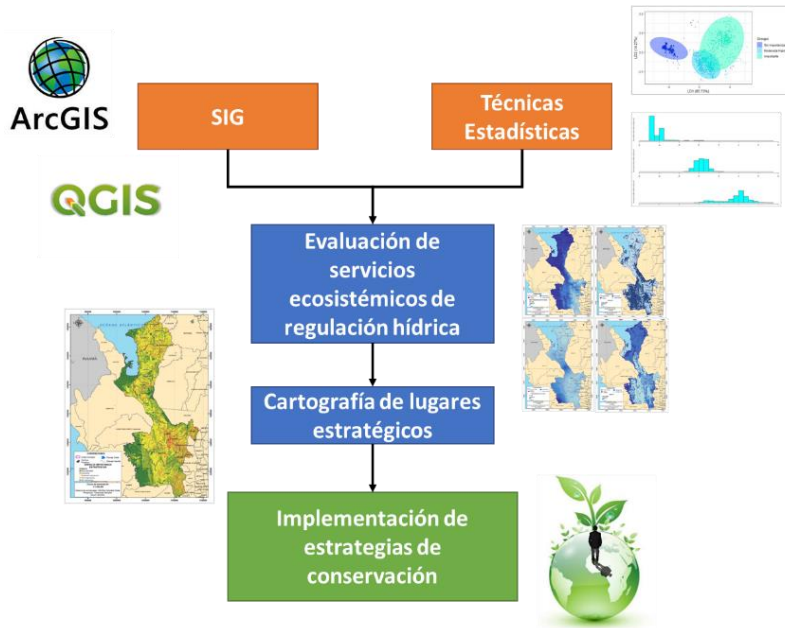
En este proceso cabe resaltar la combinación de técnicas empleadas para la construcción y análisis de la información, y que de acuerdo a los autores (Ruiz Agudelo et al., 2020), una de ellas corresponde al uso de técnicas estadísticas que incluye métodos de regresión y/o correlación, prueba de chi-cuadrado, además de análisis multivariado como el Análisis de Componentes

Principales (PCA) y el Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA); los cuales se complementan con las técnica de cartografía, que permiten identificar y discriminar los lugares a partir de los diferentes niveles de provisión, mediante el mapeo de puntos críticos (Ruiz Agudelo et al., 2020).

En términos generales se debe integrar herramientas que permitan la gestión de la información geográfica como los SIG, una espacialización inicial de las variables que describan y presenten una relación directa con la provisión de los servicios ecosistémicos, para luego mediante la inclusión de un muestreo de aquellas zonas estratégicas y no estratégicas, y a partir de técnicas estadísticas obtener una ponderación de las variables explicativas que al operarse arrojan como resultado la localización y cartografía de aquellas lugares de importancia ambiental con funciones en la prestación de servicios ecosistémicos, proceso que se sintetiza a continuación (**Figura 1**).

Figura 1

Proceso para la evaluación de los SE de regulación hídrica a partir de los SIG y técnica estadísticas.



Nota. Adaptado de (CORPOURABA, 2020).

Así, la implementación de las técnicas estadísticas a las diferentes temáticas ambientales, se han venido desarrollando en los últimos años, abordando temas desde la evaluación de sistemas para el tratamiento de agua potable, pasando por la calidad del aire, hasta la evaluación de la calidad

de agua, (Vargas Franco, 2007), realizando un análisis detallado de cada uno de los elementos, a partir de las pruebas estadísticas para evaluar aspectos como: la contaminación atmosférica y contaminación de las fuentes hídricas, así como el tratamiento de estas aguas; y de los cuales se tiene bases técnicas para la realización de los análisis ambientales y sociales, y hacia un abordaje de la problemática.

Sin embargo, no se tiene directamente un componente espacial en las aplicaciones anteriormente mencionadas, y sobre las cuales se centra el presente artículo de monografía. En ese sentido se dirige la atención a aquellos estudios que incluyen el componente cartográfico, y que tiene registros desde 1985, en donde Lopez De Pablo & Pineda, a partir de un ejercicio práctico en la provincia de Madrid evalúan la integración del territorio y sus componentes ecológicos mediante un análisis multivariante y explicada a partir de variables discriminantes de indicadores ecológicos-geográficos con tendencia estadística. Allí mismo se menciona un ejercicio desarrollado por Bunce et al., en el año de 1981, en Gran Bretaña, donde, a partir de un proceso similar permitieron la evaluación y clasificación del territorio mediante el análisis de una variable discriminante y los valores obtenidos que representan la zona de estudio.

Otro de los enfoques desarrollados, corresponde a la definición de áreas protegidas, en el cual se tiene un ejemplo llevado a cabo por Ruiz-Labourdette et al., en el año 2010, en el cual se propone la declaración de una zona de la Sierra de Guadarrama como Parque Nacional, en la comunidad española de Madrid, generando una zonificación mediante un análisis ambiental multivariante que permita la ubicación óptima de las actividades potenciales. Y que a partir de una “Valoración temática del área de estudio” de elementos como: vegetación, fauna, dinámica hídrica, fisiografía, suelos y paisaje, en función de criterios como rareza y endemidad, fragilidad, distancia a las fuentes hídricas, retención hídrica, riesgo de erosión, entre otras. Asimismo, se realiza una “Hipótesis de usos del suelo”, y su posterior estimación de su “Grado de severidad”, con la finalidad de, a partir incluso, del estado actual del territorio y de los usos previstos “Estimar el impacto parcial” futuro que pueden tener en las áreas definidas. Para luego realizar un “Mapeo de los impactos ambientales”, determinando el cambio de valor provocados por cada una de las actividades en todos los atributos evaluados, a los cuales se les determinó el coeficiente de ponderación a través de los métodos de regresión lineal múltiple y Análisis de Componentes Principales (PCA), para finalmente mediante el uso de SIG obtener la zonificación del territorio

según categorías de conservación, en compatibilidad con el paisaje y las distintas actividades, y destinado a la gestión de los futuros espacios protegidos.

Proceso metodológico anterior, que partió, de la aplicación desarrollada por Montalvo et al., en 1993, en su trabajo “Minimización del impacto a través de la selección del sitio basada en el medio ambiente: un enfoque multivariante”, el cual considera las correlaciones entre los valores de impacto parcial estimados para numerosos componentes de la calidad ambiental de la zona de estudio, minimizar así los costos ambientales ante la ubicación de una infraestructura, tal es el caso de un vertedero en Cantabria en la Comunidad Autónoma del norte de España; y definiendo así un sitio óptimo, además, de los elementos que deben sacrificarse para salvaguardar la calidad de las aguas subterráneas, en función de variables biológicas (vegetación, fauna), geológica (riesgo de inundación, hidrogeología, acuíferos), logístico (densidad urbana), entre otros. Que fueron evaluadas por los expertos definiendo un impacto parcial, y que mediante el uso de Análisis de Componentes Principales (PCA) y diferentes técnicas de mapeo, se logra definir los componentes con mayor importancia como el caso de los acuíferos, y se define las áreas que debe ser excluidas de la actividad considerada, y el costo- beneficio de la misma.

Otro aspecto importante abordado desde estos estudios (Ruiz-Labourdette et al., 2010. y Montalvo et al., en 1993) corresponde a la importancia de la definición y zonificación de dichas áreas con un enfoque de gestión del territorio y uso de los tomadores de decisiones, en el cual en muchos de los casos no se considera una base científica y técnica, o no corresponden a los definidos por las entidades administrativas, tal es el cuestionamiento en la definición del área protegida en mención, o que a partir de la información suministrada se considere la ubicación de infraestructura esencial, en función de su impacto ambiental (caso vertedero), y que por lo tanto, se convierte en un insumo vital para la toma de ediciones y la planificación integral del territorio.

Asimismo, se cuenta con diferentes aplicaciones de las técnicas estadísticas empleadas por los expertos en temas ambientales, para comprender la relación entre grupos de variables que den respuesta a un fenómeno o pregunta ambiental particular, y a partir de las herramientas SIG espacializar los objetivos de investigación, y que no comprenda únicamente de una superposición simple o suma ponderada de capas, con dificultades en la identificación de las relaciones de las capas de entrada, situación que se ve resuelta mediante la implementación de técnicas estadísticas, y que se demuestra en el ejercicio planteado por Salata & Grillenzoni, en 2021, donde a partir del Análisis de Componentes Principales (PCA) y SIG, determinan en el área metropolitana de Turín

al noroeste de Italia, un mapa que reúne los componentes ecosistémicos, a partir de los servicios de: Calidad del Hábitat, Secuestro de Carbono, Rendimiento Hídrico, Retención de Nutrientes, Retención de Sedimentos, Producción de Cultivos y Polinización de Cultivos. Con el ingreso de variables como: uso de la tierra, cobertura, suelo, vegetación, biomasa, evapotranspiración, pendientes, entre otros; en cuyo análisis muchos de estos presentan alta correlación que se pudo evidenciar y depurar, y en cuyo comparativo entre los resultados o capa obtenida de un proceso tradicional y un proceso a partir del PCA, donde este último arroja una mayor variación en los valores obtenidos (variación estándar mayor), a diferencia del proceso tradicional explicado en la redundancia de variables, y que no permite una correcta diferenciación y agrupación del resultado en categorías, con la finalidad de explicar correctamente la calidad ambiental del área de estudio, como apoyo en la planificación del territorio, y diseño de áreas de conservación, valorización o compensación para la implementación de programas estratégicos.

Panorama histórico que evidencia el usos de las diferentes técnicas estadísticas y los SIG aplicado en la identificación y caracterización de zonas de importancia ambiental, con diferentes enfoques y casos de aplicación que datan desde los años 80s pasando por finales de los 90s hasta incorporar mejoras y avances en el proceso y desarrollarlos en la primera década de los 2000s y finalizar en los años más recientes, lo que demuestra la vigencia y gran uso que se le puede dar a estos dos componentes con un enfoque hacia la identificación de zonas de importancia ambiental y que presten funciones o servicios ecosistémicos.

En cuanto a los servicios de provisión y regulación hídrica, si bien no se evalúan directa y específicamente mediante las técnicas estadísticas anteriormente desarrolladas en los estudios descritos, en los cuales se abordan de manera conjunta con otros servicios ecosistémicos, sin embargo, se puede localizar en la literatura su evaluación de manera independiente, pero en su mayoría, a través del uso de softwares especializados, como el caso de InVEST (Gaspari et al., 2015), las cuales permiten mediante las herramientas incorporadas cuantificar los valores de los servicios ecosistémicos de paisajes marino y terrestres, y brinda a los administradores y formuladores de políticas sobre los impactos de las alternativas de la gestión de los recursos de la economía, bienestar humano y medio ambiente, en los escenarios de gestión, clima y población: integrando modelos de biodiversidad (especies, hábitat), aprovisionamiento (alimento, madera, agua potable), regulación (estabilidad climática, control de inundaciones), cultural (recreación, tradición, comunidad) y de soporte (polinización), para obtener finalmente salidas en términos

biofísicos, económicos y culturales, acompañados de una cartografía, curvas de compensación y balances (Daily et al., 2009).

Asimismo, se pueden revisar en la bibliografía la evaluación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica a partir de programas como: SWAT (Pajarito Grajales, 2017), (Solano Guzmán, 2018), así como ARIES, MIMES (Jackson et al., 2013), TESSA (Peh, et al., 2013) y ESTIMAP (Zulian et al., 2014).

A partir de lo anterior, se evidencia un amplio uso de los softwares especializados en la evaluación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, no obstante, se tiene muy poca bibliografía respecto al empleo específico de las herramientas SIG y las técnicas estadísticas en la espacialización de las zonas de importancia estratégica, lo que lo convierte en una oportunidad para ahondar en el proceso, evaluar dichas técnicas, realizar un análisis detallado, y su posterior implementación, a manera de ejercicio y sobre una zona conocida para llevar a cabo un proceso de validación de los resultados y por lo tanto evaluar la idoneidad del modelo y por consiguiente del objetivo planteado en la presente monografía.

4 Metodología

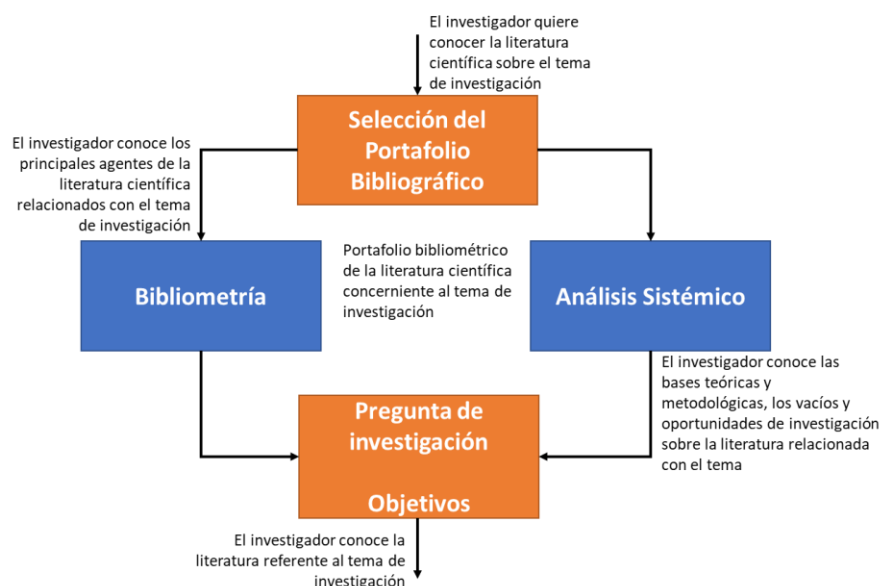
Para la ejecución del proceso, mediante el cual se pretende recopilar y analizar la información relacionada con la evaluación de los servicios ecosistémicos a partir de la implementación de los SIG y técnicas estadísticas. Se acude a una metodología que permita mediante una serie de indicaciones y herramientas construir un portafolio bibliográfico.

Optando así por la metodología Proknow – C (Knowledge Development Process-Constructivist), desarrollada en 1994 por el Laboratorio de Metodologías Constructivistas para la Ayuda a la Toma de Decisiones (LabMCDA-C por sus siglas en inglés), de la Universidad Federal de Santa Catarina (Staedele et al., 2019), como apoyo a la investigación científica y evaluación de temas específicos (teóricos o empíricos), y como ayuda a investigadores sin conocimientos en ciertos tema que deben abordar (dos Santos Matos et al., 2019).

La cual comprende la ejecución de una serie de fases, que va desde la selección del portafolio bibliográfico, continuando con la bibliometría y paralelamente con un análisis sistémico para finalizar con el desarrollo de la pregunta de investigación y los objetivos planteados, tal como se observa a continuación (**Figura 2**), cabe aclarar que los elementos concernientes a la última etapa no se desarrollarán en la presente investigación.

Figura 2

Etapas de la metodología ProKnow - C.



Comenzando con la selección del portafolio bibliográfico, en el cual se identifica un segmento relevante de la literatura en el tema de interés, igualmente se identifican las peculiaridades del área de estudio, y se realiza un análisis crítico del portafolio bibliográfico a partir de diferentes perspectivas teóricas (Somensi, et al., 2017).

Procesos que se desarrollan en el presente estudio, en el cual se acude inicialmente al planteamiento de palabras claves relacionadas con el tema de investigación, en este caso las palabras empleadas corresponden a: “Servicios ecosistémicos”, “regulación hídrica”, “SIG”, “técnicas estadísticas”, y su respectiva traducción en idioma inglés, considerando ampliar la búsqueda a nivel de literatura internacional. Para posteriormente seleccionar las bases de datos que serán consultadas, y en cuyo caso se opta por las que en su portafolio desarrollan temáticas de “Ingeniería y Tecnología” tal es el caso de: Scopus, Cambridge, Redalyc, Springer Link, Scielo y Scimedirect.

Adicionalmente, se acude a operadores booleanos como: “AND”, “OR” y “NOT” con la finalidad de construir en conjunto con las palabras claves los comandos de búsqueda, desarrollando alternativas como: “Servicios ecosistémicos” AND “SIG” AND “técnicas estadísticas” y “Ecosystem services” AND “GIS” AND “statistical techniques”.

Como paso siguiente, y una vez se genera la búsqueda en las diferentes bases de datos, y considerando la cantidad de resultados obtenidos, muchos de ellos fuera de contexto o muy antiguos, y con la finalidad de depurar la información, se acude a los filtros disponibles, en los cuales se seleccionan el “tipo de publicación”, centrándose en artículos científicos y artículos de revisión, además del año de publicación, en los cuales se logra identificar la información más reciente (superior a 2015); en algunas ocasiones se aprovechan las opciones que señalan tanto las revistas de publicación como las temáticas, en las cuales se resalta “Environmental Modelling and Software”, “Ecosystem Services” y “Ecological Indicators”.

Una vez se cuenta con los registros de artículos obtenidos en la búsqueda, se acude a una herramienta para la gestión y sistematización de la información, como la aplicación Mendeley, que con sus múltiples funcionalidades permite la gestión de referencias bibliográfica, además el almacenamiento, organización y visualización de los documentos (Biblioteca Universidad Zaragoza, 2022). Y en la cual se alojan los resultados obtenidos en la búsqueda, en donde comienza un proceso de revisión detallada de los mismos, eliminando artículos repetidos o sin relación

alguna, además de seleccionar los artículos más representativos, para luego una vez se revisen los resúmenes dejar únicamente los que presentan relación directa con la temática de investigación, y así generar el portafolio bibliográfico para realizar un análisis bibliométrico y sistémico con los artículos seleccionados.

5 Resultados

A partir de la revisión bibliográfica desarrollada en la presente monografía, en la cual se abordan los métodos estadísticos y el uso de los SIG para la identificación y espacialización de las zonas con funciones ecosistémicas de regulación hídrica, en donde, en primera medida, y una vez realizado la búsqueda de los artículos científicos, artículos de revisión, capítulos de libros, entre otros, en las diferentes bases de datos, se encuentra que, si bien se tiene un uso generalizado de ambas técnicas (SIG y técnicas estadísticas) para la identificación y cartografía de zonas de importancia ecológica, estas no se enfocan específicamente en la regulación hídrica, sino en los servicios ecosistémicos de manera general, entre los que se encuentran de: aprovisionamiento, soporte, regulación, y cultural.

En ese sentido se observa una carencia importante de información relacionada específicamente con el estudio, caracterización y espacialización de las zonas con funciones en la regulación hídrica, con poca bibliografía al respecto, pero con una base considerable de herramientas tanto estadísticas como de SIG, y a la cual se le suma los diferentes softwares especializados y comúnmente utilizados a la hora de abordar este tipo de objetivos, tal es el caso de softwares como: InVEST, SWAT, ARIES, MIMES Y ESTIMAP.

En los hallazgos se tiene una gran cantidad de aplicaciones de las técnicas estadísticas, en temas ambientales, relacionada con la contaminación atmosférica y contaminación de las fuentes hídricas, así como el tratamiento de estas aguas; Por otro lado, cuando se ingresa un componente espacial o cartográfico, relacionado con usos de las técnicas SIG, encontramos su implementación en temas de identificación y delimitación de áreas protegidas, así, como su empleo en la integración del territorio y sus componentes ecológicos, además de la identificación de lugares aptos para la localización de infraestructura de alto impacto, como el caso de vertederos, asimismo la localización de las zonas con prestación de servicios ecosistémicos, y sus diferentes funcionalidades, que permitan lograr una cuantificación de los mismos en términos biofísicos, económicos y culturales.

Una vez analizadas las técnicas y herramientas llevadas a cabo en los diferentes estudios, se concibe un proceso que recopila algunos pasos tomados de las metodologías revisadas, mediante las cuales se puede contribuir de manera importante en la identificación y espacialización de las zonas con funciones en la regulación hídrica, de la siguiente manera:

- Primeramente, se debe realizar una selección de variables que respondan o expliquen el fenómeno de investigación, el cual corresponde a las zonas de regulación hídricas, partiendo de la experiencia y de la base bibliográfica revisada, se deben considerar aspectos como: variables físicas del terreno (topografía, pendientes, curvatura, longitud de la ladera, etc.), biológicas (fauna, coberturas, etc.), geológica (geología, geomorfología, hidrogeología, acuíferos, suelo, etc.) e hídricas (cuerpos de agua, nacimientos, microcuencas, evapotranspiración, rendimiento hídrico, etc.), entre otros, los cuales deben ser inicialmente cartografiados a partir del uso de SIG,
- Seguido, y con la finalidad de generar una evaluación y calificación de las variables considerando su influencia sobre el fenómeno, en la cual se puede acudir a técnicas estadísticas, como el caso de un Análisis de Componentes Principales (PCA), y no mediante un proceso de ponderación tradicional, debido a las desventajas que este trae, y discutidas en el presente artículo, que no permite una discriminación de las variables, y por lo tanto una correcta diferenciación y agrupación del resultado, explicado en la redundancia de variables que generan una sobreestimación del modelo.
- Finalmente, una vez se cuenta con las variables espacializadas y analizadas mediante las técnicas estadísticas y los softwares de apoyo, y los resultados obtenidos de cada una de las variables consideradas, se acude nuevamente a los SIG, para su modelación a partir de la calificación obtenida, y así obtener finalmente la capa con las zonas con mejores condiciones para la prestación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica.

Igualmente, queda definido que no solo contribuiría en el fenómeno objeto de la presente monografía, sino en gran cantidad de temas que involucren una definición de áreas de importancia ambiental en general, la cual depende en gran medida del enfoque definido en la calificación de las variables, y por consiguiente en el resultado buscado, con aplicación en variados asuntos, y demostrado a la hora de abordar los diferentes tipos de servicio ecosistémicos, complejos y algunos tan distantes en su relación, pero estudiados desde las técnicas mencionadas.

Demostrando así la gran aplicabilidad que se puede lograr de los procesos de estadísticos en conjunto con los SIG, para el entendimiento de fenómenos ambientales, la localización de área

de importancia estratégica, tanto relacionadas con coberturas vegetales, fuentes hídricas, a nivel subterráneo como superficial, incluso con un enfoque de abastecimiento, regulación o provisión, zonas estratégicas, que dado la evaluación de su estado, en muchas ocasiones con un grado de afectación, donde las acciones futuras puedan estar encaminadas a una restauración o recuperación, o por el contrario con una amenaza latente, estas deben orientarse a la conservación. Asimismo, dicho conocimiento de estas áreas puede presentar una gran utilidad en la localización de infraestructura importante con el objetivo de generar la menor afectación posible sobre los ecosistemas.

Por otra parte, si bien se tiene un uso generalizado en diferentes países del mundo, a nivel nacional se tiene poca implementación, evidenciado en los pocos artículos desarrollados en el país, por tal motivo, se convertiría en una oportunidad su réplica e implementación en el territorio nacional. Realizar el proceso, dejar planteado su uso, y de ser el caso realizar los ajustes pertinentes, o desarrollar nuevas metodologías relacionadas que involucren los procesos anteriormente descritos, que consista en un levantamiento de la información en campo o bibliográfica, asimismo, considerar variables propias del territorio, identificar sus particularidades, definiendo las que realmente presentan mayor influencia sobre el objeto de estudio, igualmente acudir al uso de métodos estadístico en especial los comúnmente empleados en la bibliografía como el PCA, para finalmente realizar un análisis detallado de los datos ingresados y resultados finales mediante un proceso de validación de la información final.

Otro aspecto encontrado en la bibliografía es el hecho del aporte en los diferentes proyectos territoriales presentando un beneficio a los tomadores de decisiones y sobre su gestión, representando un gran impacto sobre las poblaciones asentadas en el territorio, y las decisiones sobre la localización de sitios para infraestructura vital, la definición de áreas protegidas y su relación con los usos del suelo, así como la definición de sitios de importancia ecológica y relacionado con los servicios ecosistémicos, objeto de la presente monografía, y todos encaminados en el ordenamiento y correcta gestión del territorio.

Planteamientos que se describen, con el objetivo de lograr una metodología sencilla que puede ser fácilmente replicada en diferentes escenarios, pero con resultados confiables y con el mayor grado de certeza, de ser necesario realizar ajustes de acuerdo al contexto de aplicación, y al objetivo que se quiera lograr, brindando una herramienta con bases científicas e importantes resultados expuestos en la presente monografía, que ayuden en gran medida a los territorios, y que

puedan ser llevadas a cabo por instituciones académicas, científicas o por corporaciones y entidades territoriales.

Finalmente, queda demostrado primero, la carencia y por lo tanto la necesidad de información para el conocimiento de las áreas de importancia ambiental con funciones en la prestación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, asimismo, las grandes ventajas que conlleva la obtención de estos insumos y los resultados finales espacializados como herramienta importante en el conocimiento del territorio, convirtiéndose en un recurso de gran utilidad para las personas encargadas de tomar decisiones, como los entes administrativos y corporaciones ambientales territoriales, en especial lo relacionado con la inversión hacia la implementación de programas ambientales estratégicos para el desarrollo de las comunidades.

6 Conclusiones

En la revisión bibliográfica llevada a cabo se encuentra poca información respecto a las diferentes metodologías que evalúan específicamente los servicios ecosistémicos de regulación hídrica a partir de la aplicación de los SIG y técnicas estadísticas, la cual empleando la metodología denominada Proknow – C, que brindó herramientas de búsqueda, y accediendo a la mayor cantidad de información albergada en las diferentes bases de datos, se realiza la revisión de artículos científicos, artículos de revisión y capítulos de libros, con los cuales una vez seleccionados se construye el portafolio bibliográfico, que se analiza y desarrolla en la presente monografía.

En cuanto a la cartografía de las zonas que prestan servicios ecosistémicos tanto de regulación hídrica, como en general, (aprovisionamiento, soporte, regulación, y cultural), se encuentra en la revisión bibliográfica llevada a cabo, un uso común de software especializados, como por ejemplo: InVEST, SWAT, ARIES, MIMES Y ESTIMAP, desarrollados por grupos de investigación, entidades académicas o corporaciones tanto públicas como privadas, que permite la evaluación y cuantificación de los servicios ecosistémicos en términos biofísicos, económicos y culturales.

Por su parte, los estudios ambientales que efectivamente utilizan las técnicas estadísticas y SIG, presentan una gran variedad de aplicaciones, objetivos y lugares impactados, los cuales incluyen la identificación y delimitación de áreas protegidas, estudios para la integración del territorio y sus componentes ecológicos, así como la identificación de zonas aptas para la localización de infraestructura de alto impacto y la localización de las áreas con prestación de servicios ecosistémicos.

Adicionalmente, se evidencia que cuando se llevan a cabo este tipo de estudios sobre los servicios ecosistémicos, generalmente se abordan en conjunto todas sus funcionalidades, entre las que se encuentran de aprovisionamiento, soporte, regulación, y cultural, ya sea, a partir tanto de software especializados como mediante la implementación de SIG y técnicas estadísticas.

Por otra parte, cuando se emplean las técnicas estadísticas en dichos estudios, se tiene que la más utilizada corresponde a los métodos multivariados mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA), la cual se pudo evidenciar su uso en gran cantidad de aplicaciones con enfoque ambiental y en los cuales se buscaba dar explicación de un fenómeno a partir de la influencia de diferentes variables tanto físicas del territorio como bióticas, geológicas, hídricas entre otras.

A la hora de espacializar los elementos o las diferentes variables involucradas en los estudios ambientales, efectivamente se tiene un uso común de los SIG, como complemento del proceso en el cual inicialmente se realiza un análisis, calificación y finalmente una modelación de la ecuación para la obtención de la capa o resultados finales.

El análisis a partir de los SIG y las técnicas estadísticas mediante el método multivariado y análisis de Componentes Principales (PCA), arroja mejores resultados respecto al proceso de análisis ponderado tradicional, debido primero a que el método estadístico permite identificar una correlación de variables, y por lo tanto omitirlas de los análisis realizados, evitando una sobreestimación del modelo y redundancia de variables, y arrojando una variación estándar mayor, que permite, identificar con mayor facilidad las categorías definidas en el ejercicio, en función de la calidad ambiental del área de estudio.

Estudios ambientales, que representa un insumo de gran importancia para los tomadores de decisiones, en cuanto a la correcta gestión del territorio, y por lo tanto se convierte en un instrumento necesario para la identificación de las áreas de importancia estratégica, con funciones en la prestación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica, y a su vez en la inversión encaminada a la implementación de programas y estrategias de conservación y restauración de los ecosistemas.

Finalmente, queda evidenciado la poca información, en especial a nivel nacional sobre el estudio de las áreas de importancia ambiental con funciones de regulación hídrica, mediante el uso de los SIG y técnicas estadísticas, y por lo tanto se convierte en una oportunidad futura de desarrollar a partir de las metodologías y pasos descritos en la presente monografía, y en donde, dichos estudios constituyan un insumo importante para las corporaciones o entes territoriales, encaminados a la gestión del territorio y beneficios de las comunidades que lo habitan.

Referencias

- Biblioteca Universidad Zaragoza. (2022). Guía Básica del Gestor Bibliográfico Mendeley. Zaragoza: Biblioteca Universidad Zaragoza.
- CORPOURABA. (2020). Identificación y priorización de áreas de importancia estratégica para el abastecimiento hídrico en los municipios de la jurisdicción de CORPOURABA. Apartadó: CORPOURABA.
- Daily, G. C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Mooney, H. A., Pejchar, L., . . . Shallenberger, R. (2009). Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21-28.
- dos Santos Matos, L., Iesbik Valmorbidia, S. M., Abilio Martins, V., & Rolim Ensslin, S. (2019). Development of Performance Evaluation Theme: A Systematic Analysis of the Literature. *Contextus. Revista Contemporânea de Gestão e Economia*, 63-97.
- Gaspari, F. J., Diaz Gomez, A. R., Delgado, M. I., & Senisterra, G. E. (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense. Argentina. *Revista Facultad Agronomía La Plata*, 214-221.
- Jackson, B., Pagella, T., Sinclair, F., Orellana, B., Henshaw, A., Reynolds, B., . . . Eycott, A. (2013). Polyscape: A GIS mapping framework landscape-scale providing efficient and spatially explicit valuation of multiple ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 74-88.
- Lee, H., & Lautenbach, S. (2016). A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 340-351.
- Lopez De Pablo, C. T., & Pineda, F. D. (1985). Análisis multivariante del territorio para su cartografía ecológica. Ensayo preliminar en la provincia de Madrid. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 235-260.
- MADS. (2012). Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE). Bogotá: MADS.
- Montalvo, J., Ramírez Sanz, L., Lopez De Pablo, C. T., & Pineda, F. D. (1993). Impact Minimization through Environmentally-based Site Selection: a Multivariate Approach. *Journal of Environmental Management*, 13-25.
- Ochoa, V., & Urbina-Cardona, N. (2017). Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges. *Ecosystem Services*, 155-169.

- Ossa-Carrasquilla, L. C., Correa-Ochoa, M. A., & Múnera-Porras, L. M. (2020). La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica. *Revista Producción + Limpia*, 71-91.
- Pajarito Grajales, X. J. (2017). Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica río Hacha – Florencia Caquetá. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.
- Paredes-Leguizamón, G. (2018). Integrando las áreas protegidas al ordenamiento territorial: Caso Colombia. Bogotá: PNNC y UICN.
- Peh, K. S.-H., Balmford, A., Bradbury, R. B., Brown, C., Butchart, S. H., Hughes, F. M., . . . Birch, J. C. (2013). TESSA: A toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 1-7.
- Ruiz Agudelo, C. A., Hurtado Bustos, S. L., & Parrado Moreno, C. A. (2020). Modeling interactions among multiple ecosystem services. A critical review. *Ecological Modelling*, 1-22.
- Ruiz-Labourdette, D., Schmitz, M. F., Montes, C., & Pineda, F. D. (2010). Zoning a Protected Area: Proposal Based on a Multi-thematic Approach and Final Decision. *Environmental Modeling & Assessment*, 531-547.
- Salata, S., & Grillenzoni, C. (2021). A spatial evaluation of multifunctional Ecosystem Service networks using Principal Component Analysis: A case of study in Turin, Italy. *Ecological Indicators*, 1-13.
- Schagner, J. P., Brander, L., Maes, J., & Hartje, V. (2013). Mapping ecosystem services' values: Current practice and future prospects. *Ecosystem Services*, 33-46.
- Solano Guzmán, C. J. (2018). Evaluación de impactos en servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica, por medio de la implementación del modelo SWAT. Caso de estudio: Cuenca del Río Teusacá. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Somensi, K., Ensslin, S., Dutra, A., Ensslin, L., Ripoll-Feliu, V. M., & Dezem, V. (2017). Knowledge construction about port performance evaluation: An international literature analysis. *Intangible Capital*, 720-740.
- Staedele, A. E., Ensslin, S. R., & Forcellini, F. A. (2019). Knowledge building about performance evaluation in lean production. An investigation on international scientific research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 798-820.
- Vargas Franco, V. (2007). Evaluación de sistemas para el tratamiento de agua potable, Calidad de aire, Calidad de agua en una fuente superficial. En V. Vargas Franco, *Estadística descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS* (págs. 171-256). Cali: Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira.

Zulian, G., Polce, C., & Maes, J. (2014). ESTIMAP: A GIS-based model to map ecosystem services in the European Union. *Annali Di Botanica*, 1-7.