



Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Diana Carolina Quintero Ortiz

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Directora

Lina Berrouet Cadavid, Doctora (PhD) en Ingeniería - Recursos Hidráulicos de la
Universidad
Nacional de Colombia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Cita

(Quintero Ortiz, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Quintero Ortiz, D. C. (2023). *Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Grupo de Investigación Ecología Aplicada



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Agradecimientos

Expreso un profundo agradecimiento a mi padre, quien me inspiró a comenzar esta maestría y siempre confió en mis habilidades académicas. Lamentablemente, no podrá presenciar el logro que hoy obtengo, ya que hace unos meses trascendió de este plano terrenal. Sin su respaldo, palabras de estímulo y aliento, este logro no sería posible. Agradezco a mi madre y hermana por su apoyo incondicional y constante motivación.

A mi directora, Lina Berrouet Cadavid, por su paciencia y orientación, fundamental en la realización de mi trabajo de investigación de manera profesional. También, agradezco al grupo de investigación en Ecología Aplicada por acogerme. A las corporaciones CORNARE y CORANTIOQUIA quienes entregaron de manera oportuna la información solicitada.

Expreso mi gratitud a compañeros y amigos que, de diversas formas, me brindaron apoyo, consejos y estímulo para avanzar en mi maestría. En particular, agradezco a Jessica Sánchez, ingeniera ambiental, y a Jhon Osorio, ingeniero civil, quienes generosamente compartieron sus conocimientos para avanzar en mi investigación.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	12
2	Marco conceptual	15
2.1	Servicios Ecosistémicos	15
2.2	Tipos de propagación de acuerdo con los servicios	15
2.3	Clasificación de los Servicios ecosistémicos.....	16
2.4	Propagación espacial de los Servicios ecosistémicos en la gestión ambiental colombiana	17
2.4.1	Proyectos de desarrollo.....	17
2.4.2	Pequeñas Centrales hidroeléctricas	17
2.4.3	Área de influencia del Proyecto	18
3	Objetivos.....	19
3.1	Objetivo general	19
3.2	Objetivos específicos (OE).....	19
4	Métodos	20
4.1	Identificación de los criterios usados por los casos de estudio (EsIA) para delimitar el área de los SE	21
4.1.1	Revisión bibliográfica	21
4.1.2	Revisión de casos de estudio (EsIA)	22
4.1.3	Aplicación de la matriz CICES	24
4.2	Articulación/comparación del AIP y las APSE de los casos de estudio	27
4.2.1	Análisis del AIP para el SE de cada caso de estudio.....	28
4.2.2	APSE del SE seleccionado para cada caso de estudio, con el protocolo ECOSER 28	
4.2.3	Comparación de áreas AIP vs APSE.....	37
4.3	Generación de lineamientos	38
5	Resultados.....	39
5.1	Revisión bibliográfica	39
5.2	Revisión de casos de estudio (EsIA)	43
5.3	Aplicación de la matriz CICES	51
5.4	Articulación/comparación del AIP y las APSE de los casos de estudio	56
5.4.1	Análisis del AIP para el SE	56
5.4.2	APSE del SE seleccionado para cada caso de estudio con ECOSER	58
5.4.3	Comparación de áreas AIP y APSE	59
6	Generación de lineamientos	67

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

7	Discusión	70
8	Conclusiones.....	78
9	Recomendaciones	78
10	Bibliografía.....	80

Listado de tablas

Tabla 4-1.	Información geográfica recopilada para comparación espacial de áreas.	28
Tabla 4-2.	Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente.	31
Tabla 4-3.	Funciones ecosistémicas (filas) y principales tipos de ecosistemas (columnas) considerados en el protocolo ECOSER. Los valores representan flujos relativos sugeridos por defecto a partir la bibliografía.	35
Tabla 5-1.	Impactos unificados por cantidad de nombramientos en los artículos consultados En la tabla se visualiza la frecuencia con la que el impacto unificado es mencionado en cada artículo consultado, representado mediante una escala de colores que va desde un tono azul intenso, indicando los impactos más frecuentemente citados, hasta un tono más claro que denota los impactos mencionados en un solo artículo.	41
Tabla 5-2.	Ubicación y área de influencia -AIP de los casos de estudio.....	44
Tabla 5-3.	Impactos unificados identificados en cada caso de estudio -EIA Los impactos se encuentran en orden descendente, desde al más al menos mencionado en los EIA.	47
Tabla 5-4.	Servicios ecosistémicos asociados a cada Casos de estudio	54
Tabla 5-5.	información de la precipitación de cada cuenca de estudio	58
Tabla 5-6.	Usuarios del agua pertenecientes a la cuenca para cada APSE.....	66
Tabla 5-7.	Indicadores de los casos de estudio 1 y2.....	67
Tabla 5-8.	Indicadores de los casos de estudio 4, 5 y 6.....	67
Tabla 7-1.	Indicadores de los casos de estudio 1 y2.....	75
Tabla 7-2.	Indicadores de los casos de estudio 4, 5 y 6.....	76

Listado de figuras

Figura 2-1. (a). Posibles relaciones espaciales/tipos de propagación entre áreas de producción de servicios (P) y áreas de beneficios de servicios (B)(Fisher et al., 2009); (b). flujo de servicios ecosistémicos (Serna &Chavez et al., 2014).....	16
Figura 2-2. Área de influencia por componentes y medio. Medio abiótico. Fuente: tomado de (ANLA., 2018). Fuente: Tomado de (ANLA. Autoridad Nacional De Licencias Ambientales., 2018).....	19
Figura 4-1. Estructura gráfica de los métodos a desarrollar, dividido por objetivos específicos en tres fases. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 4-2. Fragmento del modelo de la tabla de síntesis de las acciones e impactos, para la información filtrada de la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 4-3. Fragmento del modelo de la tabla de síntesis, para la homologación de impactos. Información filtrada de la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia. ...	22
Figura 4-4. Fragmento del modelo de tabla para los impactos ambientales identificados en los EIA y su respectiva valoración. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 4-5. Fracción de la matriz de clasificación CICES. Fuente: (CICES Haines-Young & Potschin, 2018) en su versión 5.1.	25
Figura 4-6. Ejemplificación de la identificación de los SE impactados mediante la clasificación CICES. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 4-7. Fragmento de la tabla de asociación de los impactos socioambientales con los servicios ecosistémicos y su clase. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 4-8. Ejemplo de la matriz de datos utilizada para la identificación de los criterios de propagación espacial a el análisis de SE de los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 4-9. Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos modulo 1. Fuente: Tomado de (Latterra et al., 2017).....	30
Figura 4-10. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 1 de todo el procedimiento. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1	32
Figura 4-11. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 2 de todo el procedimiento. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1	34
Figura 4-12. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 3, integración de la función ecosistémica REP normalizada con el b1: aporte relativo para obtener el SE. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1.	35
Figura 4-13. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el último paso, integración del beneficio y el SE para obtener el beneficio. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1.....	37
Figura 5-1. Fragmento de los impactos ocasionados por las actividades de los proyectos PCH encontrados en la bibliografía. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 5-2. Ejemplo: Unificación y estandarización del impacto cambio de la oferta hídrica mediante el listado de impactos ambientales específicos del Min Ambiente (2021). Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 5-3. Cantidad de impactos mencionados en la literatura e impactos mencionados en la literatura unificados mediante el listado de impactos ambientales específicos del Min Ambiente (2021). Fuente: Elaboración propia	41

Figura 5-4. Impactos relevantes identificados en la literatura y en los seis casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 5-5. Tipo /división de Servicio ecosistémico presente en cada caso de estudio. fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 5-6. Asociación de Servicios Ecosistémicos afectados por las actividades de las PCH. En la figura se indican las distintas clases de SE, en las cuales se indica el beneficio que está asociado a cada SE. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 5-7. Actividades que causan el impacto al SE: animales criados con fines nutricionales. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 5-8. Actividades que causan el impacto al SE: agua superficial (y subsuperficial) para beber. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 5-9. Selección de los servicios ecosistémicos más importantes encontrados en la literatura y en los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 5-10. Identificación de los criterios de propagación espacial en los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 5-11. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 1. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 1 (Pantagoras). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 5-12. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 2. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 2 (Cocorná III). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 5-13. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 3. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 3 (Churimo). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 5-14. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 4. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 4 (Chorreritas). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 5-15. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 5. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 5 (Los Milagros). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 5-16. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 6. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 6 (La Bonita). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 6-1. Flujograma complementario de los lineamientos propuesto a seguir. Fuente: Elaboración propia.....	69

Glosario

Área de Influencia del Proyecto (AIP): Zona delimitada para evaluar los efectos de las acciones de un proyecto de desarrollo sobre los componentes abióticos, bióticos y socioeconómicos del ambiente.

Área para la Evaluación de Servicios Ecosistémicos (APSE): Zona específica delimitada para identificar y evaluar los servicios ecosistémicos, atendiendo a los criterios de propagación espacial.

Clasificación Internacional Común de Servicios de los Ecosistemas (CICES): Sistema de clasificación que describe los servicios de los ecosistemas en términos de productos de aprovisionamiento, regulación y culturales, basado en las interacciones entre la estructura y los procesos del ecosistema.

Estudio de Impacto Ambiental (EsIA): Documento requerido para la obtención de una licencia ambiental en Colombia, que evalúa los posibles impactos ambientales de un proyecto de desarrollo y propone medidas para mitigar estos impactos.

Licencia Ambiental (LA): Permiso otorgado por la autoridad ambiental en Colombia, necesario para la ejecución y operación de proyectos de desarrollo que puedan generar impactos ambientales.

Metodología General para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (2018): Guía establecida en Colombia que detalla los procedimientos y criterios para la realización de Estudios de Impacto Ambiental.

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH): Proyectos de infraestructura que generan energía hidroeléctrica a pequeña escala y requieren una licencia ambiental debido a su potencial impacto ambiental.

Propagación Espacial: Movimiento de materia, energía e información desde la zona de provisión de un servicio ecosistémico hasta las áreas donde los beneficiarios captan y disfrutan de esos servicios.

ECOSER: Protocolo de la herramienta utilizada para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos en proyectos de desarrollo, incluyendo criterios de propagación espacial.

Servicios Ecosistémicos (SE): Beneficios directos e indirectos que la sociedad obtiene del funcionamiento de los ecosistemas, como la provisión de agua potable, regulación del clima y servicios culturales.

Términos de Referencia (TdR): Directrices establecidas por la autoridad ambiental que especifican los requisitos para la realización de Estudios de Impacto Ambiental y otros procedimientos relacionados.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Zona de Captura del Beneficio: Área donde los servicios ecosistémicos son aprovechados por la sociedad.

Zona de Provisión del Servicio: Área donde, dadas las características biofísicas del sistema, se genera la oferta potencial de un servicio ecosistémico a través de procesos ecológicos.

Zona de Flujo: Espacio donde ocurre el movimiento de materia y energía entre la zona de provisión y la zona de captura de un servicio ecosistémico.

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare): Entidad encargada de la gestión ambiental en la región de Antioquia, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia): entidad encargada de la gestión ambiental en el centro de Antioquia, Colombia.

Funciones Ecosistémicas (FE): Procesos y actividades que tienen lugar en los ecosistemas y que contribuyen a la provisión de servicios ecosistémicos.

Número de Curva de Escorrentía (CN): Parámetro utilizado para estimar el escurrimiento superficial de una cuenca hidrográfica, basado en características del suelo y la cobertura vegetal.

Análisis de Varianza (ANOVA): Técnica estadística utilizada para comparar las medias de dos o más grupos para determinar si son significativamente diferentes entre sí.

Kriging: Método de interpolación utilizado para generar superficies continuas a partir de datos puntuales, teniendo en cuenta la correlación espacial entre los puntos de datos.

Interpolación de Distancia Inversa (IDW): Método de interpolación que asigna valores a ubicaciones desconocidas basándose en la ponderación de los valores conocidos más cercanos, dando más peso a los valores cercanos que a los lejanos.

Resumen

En Colombia, la ejecución de proyectos de desarrollo está sujeta a la obtención de una licencia ambiental, para la cual se realiza un Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) con base en los Términos de Referencia y la Metodología General para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (2018). Aunque desde 2018 se introdujo el tema de los Servicios Ecosistémicos (SE) en estas guías, algunos aspectos, como la propagación espacial de estos servicios y su integración con otros componentes del estudio, no están explícitamente vinculados. Esta investigación busca evaluar el ajuste entre las áreas de influencia de proyectos (AIP) de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) bajo los actuales parámetros de los estudios de impacto ambiental y un enfoque que incorpore criterios de propagación espacial para la evaluación de servicios ecosistémicos (APSE).

Este estudio se desarrolló en tres etapas. La primera identificó los criterios usados por los casos de estudio para delimitar el área de los Servicios Ecosistémicos (SE) mediante una revisión de literatura y la clasificación Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). Esta etapa comparó el AIP y el APSE en los casos de estudio de PCH en Antioquia, mediante el protocolo ECOSER. Finalmente, en etapa tres se generaron lineamientos para incorporar el APSE en los Estudios de Impacto Ambiental (EsIA).

La etapa dos, se realizó mediante el protocolo ECOSER (evaluación y mapeo de SE), donde se analizó el SE de aprovisionamiento de agua potable en seis casos de estudio de PCH, utilizando el método de número de curva de escorrentía (CN), evaluando la escorrentía superficial, encontrando principalmente que los casos de estudio no incorporan adecuadamente los criterios de propagación espacial de los SE, ya que la zona de provisión y captura queda fuera del AIP. Como los hallazgos debilitan los EsIA, se sugiere incorporar una APSE para el análisis e identificación de los SE.

Palabras clave: Propagación espacial, servicios ecosistémicos, estudio de impacto ambiental, pequeñas centrales hidroeléctricas, impactos ambientales, protocolo ECOSER.

Abstract

In Colombia, the execution of development projects is subject to obtaining an environmental license, for which an Environmental Impact Assessment (EIA) is conducted based on the Terms of Reference and the General Methodology for the Preparation of Environmental Impact Assessments (2018). Although the topic of Ecosystem Services (ES) was introduced in these guidelines since 2018, some aspects, such as the spatial propagation of these services and their integration with other study components, are not explicitly linked. This research aims to assess the alignment between the influence areas of small hydroelectric power projects (SHP) under the current parameters of environmental impact studies and an approach that incorporates spatial propagation criteria for ecosystem services assessment (APSE).

This study was developed in three stages. The first stage identified the criteria used by the case studies to delimit the area of Ecosystem Services (ES) through a literature review and the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). This stage compared the areas of influence of projects (AIP) and APSE in SHP case studies in Antioquia, using the ECOSER protocol. Finally, in stage three, guidelines were generated to incorporate the APSE into Environmental Impact Assessments (EIA).

Stage two was conducted using the ECOSER protocol (evaluation and mapping of ES), where the provisioning service of potable water was analyzed in six SHP case studies, using the Curve Number (CN) method to evaluate surface runoff. It was found that the case studies do not adequately incorporate the spatial propagation criteria of ES, as the provision and capture zones fall outside the AIP. As the findings suggest, to incorporate an APSE for the analysis and identification of ES.

Keywords: Spatial propagation, ecosystem services, environmental impact assessment, small hydroelectric power plants, environmental impacts, ECOSER protocol.

1 Introducción

La biodiversidad es transformada por diferentes impulsores de cambio (Martín y López et al., 2007). Los impulsores pueden ser indirectos, se asocian con transformaciones derivadas de procesos de toma de decisiones del sistema social, como, la implementación de políticas, los cambios en las demandas y preferencias del mercado, y las decisiones relacionadas con la forma de aprovechamiento de los recursos. Los impulsores directos son aquellos con incidencia en el funcionamiento de los ecosistemas, por afectación de las propiedades y atributos de los sistemas biofísicos (i.e cambios de uso del suelo, del clima, de los ciclos biogeoquímicos y del agua, contaminación del agua, suelo y atmósfera, e introducción de especies invasoras) (Martín & López et al., 2007). Estos últimos comprometen la oferta de servicios ecosistémicos para la sociedad.

Los servicios ecosistémicos son definidos como los beneficios que los humanos obtienen de los ecosistemas (MEA, 2005). No obstante definiciones posteriores como las planteadas por Fisher (2008) y Serna (2014) establecen que los servicios ecosistémicos son los beneficios directos e indirectos que la sociedad deriva del funcionamiento de los ecosistemas. Esta definición pone de manifiesto un aspecto relevante: la propagación espacial del servicio ecosistémico (Fisher et al., 2009)(Serna & Chavez et al., 2014), por cuanto incorpora distintas dependencias del servicio (múltiples beneficiarios) de zonas donde los ecosistemas en su funcionamiento los proveen (zonas de provisión). La propagación espacial son movimientos en el espacio de materia, energía e información obtenidos del ecosistema entre un sistema emisor y uno receptor (Schröter et al., 2018), el movimiento o flujo involucra la ruta, camino o medio de desplazamiento explícito desde la fuente de un SE hasta los usuarios (Bagstad et al., 2013), es decir, las conexiones espaciales y temporales entre las áreas de provisión y las áreas beneficiarias (Serna-Chavez et al., 2014). Los elementos involucrados en el análisis de la propagación de un SE son i) las zonas de provisión del servicio, donde dadas las características biofísicas del sistema se genera la oferta potencial del servicio a través de procesos ecológicos (funcionamiento ecológico), ii) la zona de captura del beneficio, donde los servicios son disfrutados por la sociedad, y iii) las zonas de flujo donde se da el movimiento de materia y energía entre la zona de provisión y captura (Serna & Chavez et al., 2014)

La propagación espacial relaciona la presencia de beneficiarios en múltiples escalas y diversidad de beneficiarios, en cuanto a necesidades y beneficios que obtienen de un mismo tipo de servicio ecosistémico (Serna & Chavez et al., 2014). En el primer caso la identificación, por ejemplo, de los beneficiarios que pueden ser afectados por un cambio en el funcionamiento por la inserción de un proyecto de desarrollo, pueden estar en el área de influencia del proyecto (AIP), e incluso por fuera de dicha área dependiendo del servicio afectado. Y en el segundo caso los niveles de dependencia de un beneficiario pueden diferir

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

de los niveles de otro debido al tipo de necesidad o beneficios que satisface, incluso, de un mismo servicio ecosistémico (Serna & Chavez et al., 2014). En esta línea, comprender el efecto de las acciones que los proyectos de desarrollo generan sobre la oferta de los SE y los beneficios que deriva la sociedad, es un reto para los procesos de gestión ambiental.

En el caso colombiano para los proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), y en general para todos los proyectos sujetos a licenciamiento ambiental, se sugiere un análisis de SE dentro del AIP, según lo establecido por los Términos de Referencia (TdR)¹ y la Metodología general para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (ANLA, 2018). El AIP se determina por medio del análisis y superposición de las áreas que define cada uno de los componentes o medios (abiótico, biótico y socioeconómico) sobre los cuales se manifestaran los efectos de las acciones del proyecto (ANLA, 2018). Adicionalmente, la metodología general y los TdR solicitan el análisis de SE y sugieren, que dicho análisis, se realice en la misma AIP que se establece para la evaluación de impactos socioambientales, y no plantea - de forma explícita - la delimitación de un área específica para identificar y evaluar los SE atendiendo el criterio de propagación espacial de los mismos (ANLA, 2018). Consecuente con esto, las evaluaciones de la dependencia y la cantidad o nivel en que los beneficiarios de un SE son afectados por un determinado proyecto de desarrollo en el marco de los estudios de impacto ambiental, pueden presentar incertidumbre, dependiendo si esas evaluaciones de SE se realizan considerando solo los criterios técnicos de definición del AIP o si se adiciona a esta definición Áreas para la evaluación de Servicios Ecosistémicos incluyendo los elementos de Propagación espacial (APSE), lo cual puede determinar la calidad de la gestión de los SE impactados significativamente por los proyectos de desarrollo, para este caso, proyectos de desarrollo de PCH.

Se optó por seleccionar las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) como caso de estudio para este trabajo de grado, ya que son catalogadas como proyectos de desarrollo que requieren de LA para su ejecución y operación, debido a la generación de impactos por las acciones producidas por este tipo de proyecto (MADS, 2015). Además, Colombia demuestra capacidad para desarrollar proyectos de PCH debido a la cantidad y a lo caudaloso que son los ríos. Antioquia en particular presenta un potencial hidroeléctrico importante y de alta calidad gracias a la combinación de sus saltos naturales, ríos con gran caudal y condiciones geológicas estables; presenta adicionalmente una aceptable conectividad eléctrica que facilita la transferencia de energía, así como infraestructura vial (Duque Grisales & Arango Vásquez, 2016).

¹ Son lineamientos generales que la autoridad ambiental señala y publica para la elaboración y ejecución de EIA y Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) presentados ante la autoridad ambiental competente al momento de solicitar el otorgamiento de una licencia ambiental (ANLA).

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Esta tesis de maestría analizó la forma en la que actualmente se está realizando el análisis de los SE dentro del AIP y/o las APSE, con el propósito de identificar: i) si la forma en como son definidas las áreas en los estudios de impacto de PCH son suficiente para involucrar los criterios de propagación espacial, ii) cuáles elementos de la propagación espacial de los SE son excluidos (o no) en los ejercicios de evaluación de SE en este tipo de estudios y los aspectos de incertidumbre que se generan en el caso de las omisiones de dichos criterios y finalmente, iii) cuáles son los aspectos mínimos que requieren ser incluidos para acercarse a la incorporación de las APSE atendiendo todos los criterios/elementos de propagación espacial.

El trabajo se realizó en tres etapas. Primero se realizó una revisión de literatura sobre los principales conceptos de las PCH, las acciones y los impactos socioambientales causados por ellas, que a su vez afectan los SE, con el propósito de identificar los principales SE afectados por los proyectos de PCH, este resultado se obtuvo con la ayuda de la matriz de clasificación CICES. En la segunda etapa mediante la revisión de casos de estudio de PCH en Antioquia, se buscó comparar el área propuesta por la metodología general y los Términos de Referencia (TdR) con un área propuesta utilizando criterios de propagación APSE, mediante el protocolo ECOSER. se analizaron casos de EsIA de PCH en Antioquia, identificando aspectos relacionados con la selección de los SE y cómo delimitan el área para su identificación y evaluación, analizando las concordancias o divergencias entre estas áreas y sus implicaciones para el análisis de SE. Por último, con los resultados obtenidos en las etapas anteriores se generaron unos lineamientos técnicos mínimos para incorporar las APSE en EsIA para PCH.

Consecuente con lo expuesto, este trabajo de investigación avanzó en el entendimiento de los vacíos que se presentan a la hora de la toma de decisiones en relación con la gestión ambiental de la oferta, demanda y transporte de los SE, paralelamente se brindan lineamientos operativos para mejorar la gestión ambiental alrededor de los proyectos de desarrollo de PCH. Se espera contribuir en esta línea, aportando elementos operativos que permitan mejorar la aplicación específicamente en lo relacionado con los EsIA como requisito para el trámite de Licencias Ambientales (LA) y aportar elementos que pueden ser incorporados adecuadamente en el análisis de los SE dentro de los procesos de EsIA para PCH, además podrá servir de referente para otros tipos de proyectos de desarrollo.

2 Marco conceptual

2.1 Servicios Ecosistémicos

Los Servicios Ecosistémicos (SE) son posibles gracias al funcionamiento de los ecosistemas. Según Fisher & Kerry Turner (2008) “los SE son los aspectos de los ecosistemas utilizados (activa o pasivamente) para producir bienestar humano” (Fisher & Kerry Turner, 2008). Es decir, involucra la estructura, los procesos y/o funciones del servicio, implica también, conocer si los SE son consumidos o utilizados directa o indirectamente por la humanidad (usuarios) (Fisher et al., 2009).

Esta definición implica el reconocimiento del flujo del SE, del cual dependen los usuarios para el disfrute del beneficio (Fisher et al., 2009). El flujo abarca desde la zona donde se produce el SE hasta llegar al lugar donde se aprovecha, es decir el transporte de información, materia y energía desde un sistema de envío a un sistema de recepción (Bagstad et al., 2013), donde se involucran las conexiones espaciales y temporales entre las zonas de provisión y las zonas de beneficio (Serna-Chavez et al., 2014), este proceso se define como propagación espacial del SE (Ala-Hulkko et al., 2019).

2.2 Tipos de propagación de acuerdo con los servicios

La propagación espacial de los SE implica identificar aspectos como, lugar de provisión del SE, flujo del SE, localización y tipo de beneficiarios del SE, que determinan la escala espacial en la que se mueven los SE (local, regional e incluso global) (Fisher & Kerry Turner, 2008). Para identificar estos aspectos a lo largo de los años se han propuesto clasificaciones de SE que toman en cuenta estos aspectos espaciales. El marco propuesto por Fisher et al (2009) involucra categorías que describen las relaciones entre la zona de producción de servicios y el lugar dónde se obtienen los beneficios, clasificándolos en (*Figura 2-1*), a): i) in situ: la zona donde se proveen los servicios y la zona donde estos son aprovechados para la obtención de beneficios es en el mismo lugar, ii) omnidireccional: los servicios se brindan en un solo lugar, los beneficios pueden ser aprovechados fuera de la zona de provisión y alrededor de esta sin sesgo direccional, iii) direccional: la zona de beneficio se encuentra fuera de la zona de provisión y específicamente en una dirección debido al flujo que el servicio posee, y iv) barrera/sumidero: la zona de provisión actúa como una barrera evitando que los beneficiarios se vean afectados por algún fenómeno o actividad, también se genera otro efecto, donde la zona de provisión sirve de amortiguamiento (sumidero) y colinda con la zona de beneficio, específicamente en una dirección. Esta clasificación permite reconocer características como la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas y la dependencia de las distintas formas en que los beneficios de los servicios son distribuidos a la sociedad (Fisher et al., 2009).

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

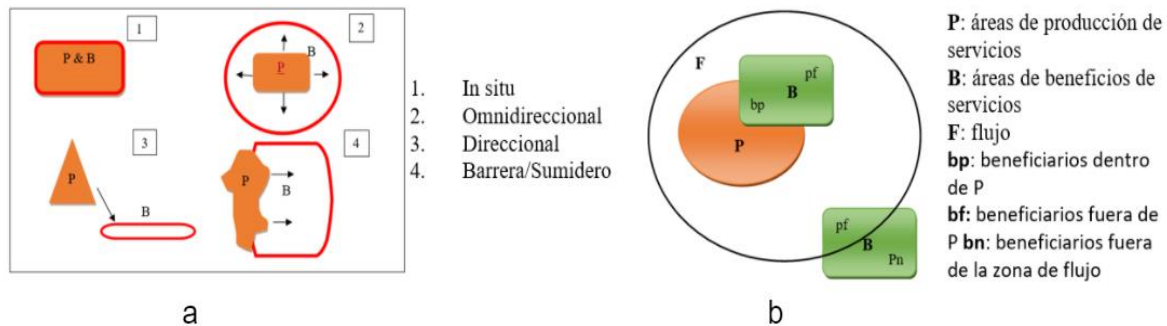


Figura 2-1. (a). Posibles relaciones espaciales/tipos de propagación entre áreas de producción de servicios (P) y áreas de beneficios de servicios (B) (Fisher et al., 2009); (b). flujo de servicios ecosistémicos (Serna & Chavez et al., 2014).

Derivada de esta clasificación se infiere que hay distintas zonas donde se obtiene el beneficio y por tanto un servicio puede tener diversidad de beneficiario en necesidades y ubicación espacial con respecto a la zona de provisión, como lo evidencia el marco conceptual para analizar las conexiones espaciales propuesto por Serna-Chavez et al. (2014) (Figura 2-1,b). El marco anterior propone un medio para reconocer los aspectos de las interacciones entre las zonas de provisión y captura y, la forma cómo se distribuye el servicio, se pueden encontrar las siguientes clasificaciones de beneficiarios, beneficiarios presentes al interior de la zona donde se producen el SE (bp), beneficiarios en la zona de flujo F (pf) e incluso beneficiarios fuera de esta (pn) (Serna-Chavez et al., 2014). Con esto se logra entender que cada servicio tiene una forma de propagación y ubicación de los beneficiarios diferente, incluso aun cuando los beneficiarios capturen el mismo servicio.

2.3 Clasificación de los Servicios ecosistémicos

Otras clasificaciones, complementarias, centra su análisis en los aspectos del ecosistema que determinan su funcionalidad y su capacidad para proveer los SE. Este es el caso de la Clasificación Internacional Común de Servicios de los Ecosistemas (CICES) desarrollada a partir del trabajo sobre contabilidad ambiental realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) (2009). Esta clasificación es coherente con las tipologías aceptadas de bienes y servicios de los ecosistemas usadas actualmente en la literatura internacional, y compatible con los métodos de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada (Haines-Young & Potschin, 2010). Para esta clasificación existen varios tipos de conexión cruzada, como la de los SE y la cobertura del suelo, la de los SE y las clasificaciones de los productos (CICES Haines-Young & Potschin, 2018).

La clasificación CICES (2010) considera que las funciones del ecosistema determinan la capacidad del sistema para proporcionar servicios y beneficios a los usuarios. Las funciones del ecosistema están conformadas por componentes que son las interacciones entre la estructura y los procesos, que pueden ser físicos (i.e, infiltración del agua, el movimiento de los sedimentos), químicos (i.e, reducción, oxidación) o biológicos (por i.e, fotosíntesis

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

desnitrificación) (Haines-Young & Potschin, 2010). Por lo tanto, esta clasificación describe los vínculos entre las estructuras, procesos y los beneficios que se derivan de ellos. El objetivo es conectar entre los componentes biofísicos de los ecosistemas y los diversos productos, actividades y beneficios que dependen total o parcialmente de ellos. La CICES se encarga de los productos de aprovisionamiento, regulación y culturales, ya que el objetivo es identificar los "productos finales" de los ecosistemas (Haines-Young & Potschin, 2010).

2.4 Propagación espacial de los Servicios ecosistémicos en la gestión ambiental colombiana

2.4.1 Proyectos de desarrollo

En Colombia la gestión de los SE impactados por los proyectos de desarrollo se realiza por medio del Licenciamiento Ambiental (LA), este es un procedimiento tramitado ante la autoridad ambiental con base en el Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) y otros requerimientos (MADS & Desarrollo Sostenible, 2015). Antes de la expedición de la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad (PNGIBSE), publicada en el año 2012, no se incluía explícitamente el tema de los SE como un capítulo propuesto en la Metodología General para la Elaboración de EsIA (MinAmbiente, 2002), es a partir del decreto 2820 de 2010 (Ministerio de Ambiente 2010) y el 2041 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) que se exigió la valoración económica de los SE y su identificación – evaluación, correspondientemente, dentro de los EsIA como un paso necesario para tomar decisiones sobre el otorgamiento de la LA.

Años más tarde algunos Términos de Referencia (TdR) de los proyectos de desarrollo incorporaron un capítulo adicional sobre la definición, identificación y descripción de los SE, antes de ser retomado por la Metodología General para la elaboración de EsIA en el año 2018 (ANLA, 2018). El capítulo sugiere, que el análisis de los SE, se puede realizar en la misma AIP que se establece para la evaluación de impactos socioambientales, y no plantea - de forma explícita - la delimitación de un área específica para identificar y evaluar los SE atendiendo el criterio de propagación espacial de los mismos (ANLA, 2018). En línea con lo anterior la toma de decisiones sobre la gestión ambiental de los SE impactados por los proyectos de desarrollo podría no ser acertada al dejar fuera del análisis aspectos como: múltiples beneficiarios a distintas escalas, niveles de dependencia de un mismo servicio.

2.4.2 Pequeñas Centrales hidroeléctricas

Existen diferentes tipos de proyectos de desarrollo (ANLA, 2020). Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son catalogadas como proyectos de infraestructura, y de acuerdo con la normatividad Colombiana requieren de LA para su ejecución y operación, debido a la

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

generación de impactos por las acciones producidas por este tipo de proyecto (MADS & Desarrollo Sostenible, 2015). Las PCH muestran un desarrollo creciente debido a que posee ventajas comparativas, como la eficiencia económica a largo plazo, la flexibilidad para adaptarse a la demanda y en algunos casos una mayor regulación de la variabilidad hidrológica en los territorios frente a otros proyectos de suministro de energía hidroeléctrica (Angarita et al., 2018).

Colombia se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo debido a la localización geográfica, orografía y la variedad de regímenes climáticos (M AVDT, 2010). Además, en Colombia, las PCH son consideradas como una de las opciones más adecuadas para suplir la creciente demanda de energía (Duque et al., 2016). Sin embargo, las PCH pueden: fragmentar las coberturas vegetales, reducir la disponibilidad de agua para riego, generar cambios en las prácticas agrícolas, disminución de las poblaciones de peces y erosión debido a su construcción y operación (Harlan et al., 2020) (Zhang et al., 2014) por lo tanto, requieren realizar un EsIA (MADS & Desarrollo Sostenible, 2015).

Las PCH, así como otros proyectos de desarrollo, para elaborar el EsIA utilizan como guía la metodología general para la elaboración de EsIA del año 2018 y los TdR del año 2017 (ANLA., 2018). Dentro de estas guías como se mencionó en el apartado anterior 3.4.1. se incorporó un capítulo de análisis de los SE. En ese capítulo se exige identificar el tipo de beneficiarios (directos o indirectos) y la cuantificación de estos dentro del AIP y cualificar los SE teniendo en cuenta las comunidades y la dependencia del proyecto hacia los SE. Las guías proponen la cualificación por medio de criterios de dependencia: alta, media o baja, y la tendencia de los SE: creciente, estable o decreciente. Y para calificar el impacto en los SE causados por las acciones del proyecto de desarrollo se realiza con base a las consideraciones del capítulo de Evaluación Ambiental perteneciente al EsIA (ANLA., 2017) con el objetivo de aplicar medidas de manejo para prevenir, mitigar, minimizar o compensar el impacto negativo ocasionado en los SE (Conesa, 1997).

2.4.3 Área de influencia del Proyecto

El AIP se delimita mediante el análisis de cada uno de los componentes o medios (abiótico, biótico y socioeconómico) que conforman el ambiente como se muestra en la *Figura 2-2*, posteriormente mediante la intersección y unión de las áreas definidas por cada uno de los componentes se define el AIP (ANLA., 2018).

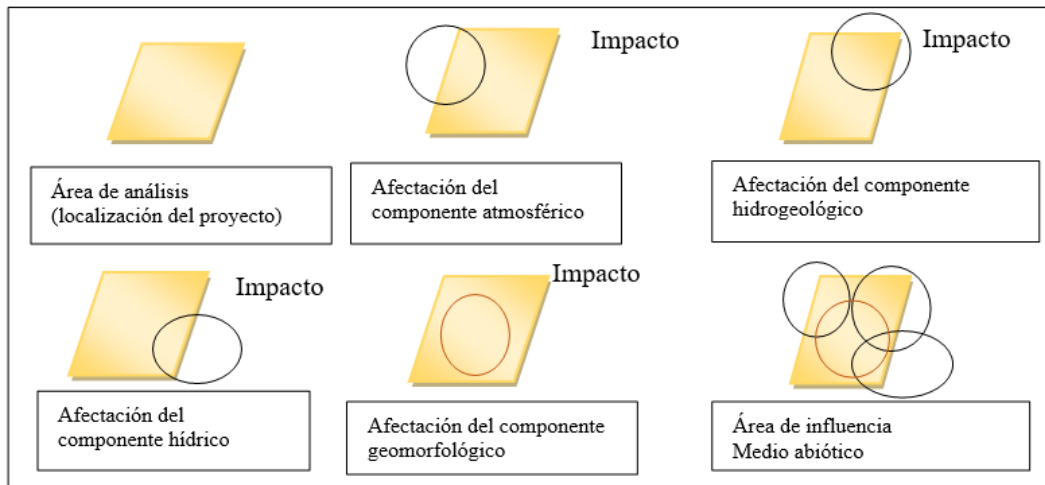


Figura 2-2. Área de influencia por componentes y medio. Medio abiótico. Fuente: tomado de (ANLA., 2018). Fuente: Tomado de (ANLA. Autoridad Nacional De Licencias Ambientales., 2018)

Sin embargo, la forma cómo se delimita el AIP en proyectos de desarrollo puede no ser suficiente en cuanto a la delimitación del área necesaria para la evaluación de los SE. La evaluación de un SE debe permitir entender dónde y en qué cantidad los SE son producidos y consumidos (Serna-Chavez et al., 2014). Sin embargo, el análisis de estos conceptos se ve limitado por el AIP, ya que es posible en algunos casos existan beneficiarios fuera de esta área, quedando excluidos de la cuantificación y toma de decisiones de la gestión de los SE, en algunos casos el AIP podría coincidir con un APSE, es decir con un área que incorpore los elementos de la propagación espacial. Aun así, es un limitante y reto presente actualmente los TdR y la metodología general, para el análisis e identificación de SE.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el ajuste entre el área de influencia de proyectos de desarrollo (AIP) delimitada bajo los parámetros de los estudios de impacto ambiental (EsIA) para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) desde el contexto técnico – normativo actual, y el AI que incorpore los criterios de propagación espacial para la delimitación de áreas para la evaluación de servicios ecosistémicos (APSE).

3.2 Objetivos específicos (OE)

- OE1: Identificar para el análisis y evaluación de los servicios ecosistémicos en EsIA de PCH, los criterios empleados para delimitar el área para el análisis de los servicios ecosistémicos.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

- OE2: Analizar los puntos de articulación entre las AIP determinadas bajo los enfoques establecidos en los TdR y las que se planteen incorporando criterios de propagación espacial de servicios.
- OE3: Establecer requerimientos básicos para la incorporación adecuada en los TdR para el análisis o la delimitación de SE incorporando los criterios de propagación espacial.

4 Métodos

El desarrollo de los objetivos se llevó a cabo en tres etapas como se muestra en la **Figura 4-1**. La primera tuvo como objetivo identificar los criterios usados por los casos de estudio (EsIA) para delimitar el área de los SE. Esta etapa se dividió en tres pasos, se llevó a cabo una revisión de bibliografía seguido de la revisión de casos de estudio y, con la ayuda de la clasificación CICES, se identificaron los SE más impactados por las acciones de este tipo de proyectos y así poder seleccionar el SE a utilizar en la siguiente etapa. En la segunda etapa, se analizaron las AIP de cada caso de estudio propuesta por la metodología general y los Términos de Referencia (TdR) para luego ser comparadas área propuesta utilizando criterios de propagación APSE mediante el protocolo ECOSER. Por último, se elaboraron lineamientos para incorporar el APSE en los Estudios de Impacto Ambiental (EsIA).

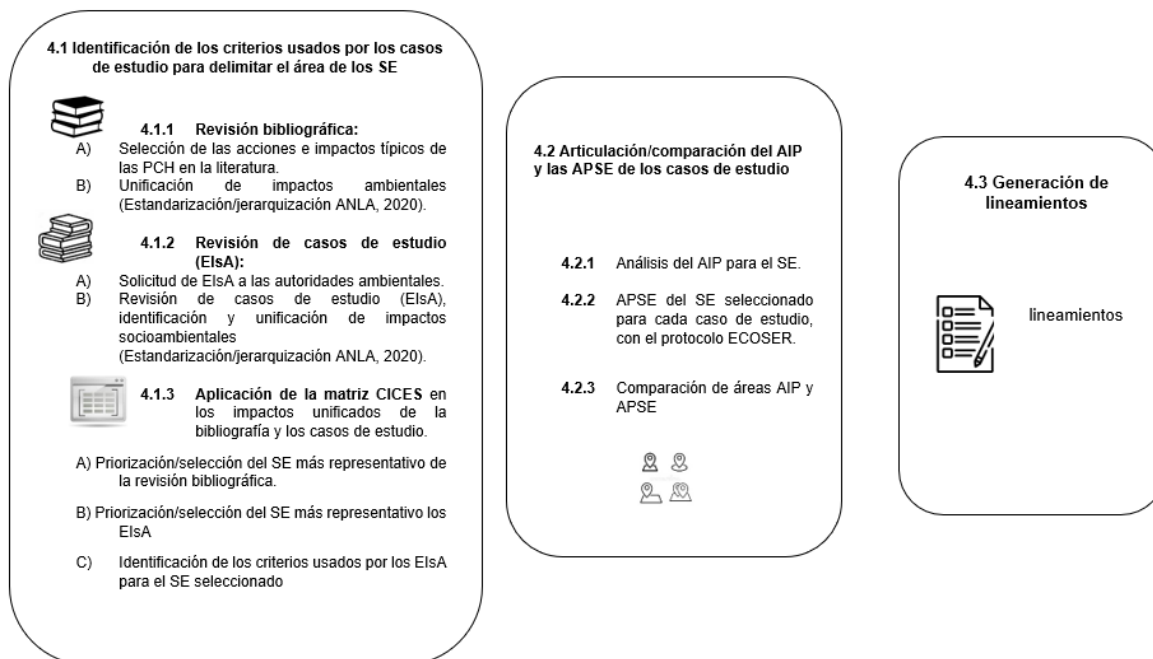


Figura 4-1. Estructura gráfica de los métodos a desarrollar, dividido por objetivos específicos en tres fases. Fuente: Elaboración propia.

4.1 Identificación de los criterios usados por los casos de estudio (EsIA) para delimitar el área de los SE

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica en la que se seleccionaron las acciones/actividades e impactos típicos de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). Posteriormente, se unificaron los impactos ambientales siguiendo las normas de estandarización y jerarquización establecidas por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2020). En segundo lugar, se realizó la revisión de los casos de estudio, Estudios de Impacto Ambiental (EIsA) solicitados a las autoridades correspondientes. De estos se identificaron y unificaron los impactos socioambientales, nuevamente siguiendo los criterios establecidos por el ANLA en el 2018. Finalmente, se aplicó la metodología de la matriz CICES a los impactos extraídos desde la bibliografía al igual que en los casos de estudio (EIsA). Los resultados de la matriz CICES permitió priorizar y seleccionar el SE más representativo tanto de la revisión bibliográfica como de los EIsA. Además, permitió identificar los criterios utilizados por los EIsA para el SE seleccionado, como se discrimina a continuación.

4.1.1 Revisión bibliográfica

En esta etapa, se realizó una revisión exhaustiva de artículos indexados disponibles en bases de datos científicas como ScienceDirect y Scielo. Los artículos puestos en consideración proporcionan información crucial para avanzar en el desarrollo de la investigación. Se establecieron tres pautas fundamentales para la selección y análisis de los artículos: i) Inclusión de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) ubicadas en diversas regiones del mundo. ii) Abordaje de impactos sociales y ambientales, como erosión, contaminación, entre otros, así como acciones que pudieran modificar factores o componentes ambientales, como la remoción de cobertura vegetal o la desviación del cauce. iii) Mención de Servicios Ecosistémicos (SE) y/o funciones afectadas por dichas acciones, como conectividad, biomasa y hábitat.

A) Selección de las acciones/actividades

Posteriormente, se procedió a la selección de aquellos artículos que cumplieran con las pautas, y la información encontrada se sistematizó en un cuadro de síntesis como se observa en la *Figura 4-2*. El cuadro abarca las acciones e impactos generados en las distintas etapas del desarrollo de las PCH. Los impactos sociales y ambientales fueron consignados utilizando la terminología empleada en la literatura de origen, considerando que un mismo impacto puede ser referido de diversas maneras.

Nombre artículo	Autor	Ubicación (de las PCH mencionadas)	Acciones	Impactos (tal y como se nombran en la literatura)
1				
2				
...				

Figura 4-2. Fragmento del modelo de la tabla de síntesis de las acciones e impactos, para la información filtrada de la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia.

B) Unificación/Estandarización de impactos ambientales

A continuación, se estandarizaron los nombres de los impactos mediante un proceso de unificación. El propósito era evitar la duplicidad o ambigüedad en el registro de los impactos, permitiendo así contabilizar con precisión la frecuencia con la que estos fueron mencionados en la literatura. Para llevar a cabo esta normalización, se adoptaron las pautas establecidas en la "Estandarización y Jerarquización de Impactos Ambientales" desarrollada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en 2020 (ANLA, 2020), así como el Listado de Impactos Ambientales Específicos del ministerio de medio ambiente (MinAmbiente, 2021).

Este proceso se ejecutó de manera manual, examinando individualmente cada impacto presente en la literatura. Se compararon los impactos identificados con el listado del ministerio, unificando aquellos que tenían denominaciones distintas en un único impacto estandarizado. Los resultados de este procedimiento se reflejaron en un cuadro de síntesis, el cual se presenta en la *Figura 4-3*.

Nombre del artículo	Acciones	Impacto	Impacto unificado
1			
2			
...			

Figura 4-3. Fragmento del modelo de la tabla de síntesis, para la homologación de impactos. Información filtrada de la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Revisión de casos de estudio (EsIA)

Se llevo a cabo una revisión de seis estudios de impacto ambiental (EsIA) que constituyeron los casos de estudio de esta investigación. El objetivo era examinar cómo se determinan las áreas para el análisis de los Servicios Ecosistémicos (SE). Siguiendo la directriz del manual

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

de 2018 y los Términos de Referencia (TdR) de 2017, se identificaron y analizaron las siguientes posibilidades: i) Realizar el análisis dentro de la misma Área de Influencia del Proyecto (AIP). ii) Explorar variaciones en la AIP. iii) Considerar criterios de propagación espacial. iv) Incluso llevar a cabo el análisis sin ninguna delimitación específica de la unidad de análisis. Para llevar a cabo este análisis, se siguió una serie de pasos que se describen detalladamente a continuación.

A) Solicitud de casos de estudio

Se solicitó la información de Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) a las autoridades ambientales con jurisdicción en el departamento de Antioquia, considerado un ejemplo representativo para las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). Antioquia destaca en este tipo de proyectos debido a su potencial hidroeléctrico, condiciones geológicas estables y la infraestructura existente. La región lidera en Colombia con 47 PCH que representan 434.85 MW (Cuartas Hernandez, 2020).

Dado que varias jurisdicciones ambientales concurren en Antioquia, y que según los datos estimados hasta 2010, las subregiones de Antioquia más ricas en capacidad hidroeléctrica eran el Norte y el Oriente (Duque Grisales & Arango Vásquez, 2016), se solicitó la información a la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare "Cornare" y a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia "Corantioquia". Para garantizar la comparabilidad de los casos de estudio, se establecieron cuatro criterios:

- Estudios de impacto ambiental correspondientes a PCH.
- Preferiblemente, que los EsIA estuvieran aprobados o en revisión. Esto garantiza que la autoridad haya evaluado la validez del proceso y estudio.
- Los EsIA posteriores al año 2018, ya que después de esa fecha deben seguir la metodología modificada en 2018.
- Que los EsIA se hubieran realizado conforme a los Términos de Referencia actuales (TdR014), que incluyen el capítulo de identificación y análisis de los Servicios Ecosistémicos (SE).

Los EsIA anteriores a la fecha indicada fueron excluidos, ya que no incluían el capítulo de análisis de SE, fue considerado un factor de exclusión.

B) Revisión de casos de estudio (EsIA), identificación y unificación de impactos socioambientales

Se procedió a la consolidación de los impactos sociales y ambientales identificados en cada caso de estudio. Estos impactos fueron unificados de acuerdo con el Listado de Impactos Ambientales Específicos del Ministerio de Medio Ambiente (MinAmbiente, 2021),

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

manteniendo la coherencia con la metodología empleada en el punto B anterior y evitando ambigüedades en los nombres de los impactos. Simultáneamente, mediante la información directa proporcionada por el estudio y la revisión de otros elementos del mismo, como la matriz de impactos ambientales, se construyó un cuadro de síntesis que destaca la importancia relativa asignada a cada impacto ambiental, como se ilustra en la *Figura 4-4*.

Proyecto hidroeléctrico	Impacto del EIA	Impacto unificado	Valoración cualitativa del impacto	Valoración cuantitativa del impacto	Evalúan magnitud y/o importancia
EIA1					
EIA2					
...					

Figura 4-4. Fragmento del modelo de tabla para los impactos ambientales identificados en los EIA y su respectiva valoración. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Aplicación de la matriz CICES

A) Identificación de funciones ecológicas y SE

Con el fin de llevar a cabo la identificación de los Servicios Ecosistémicos (SE) y las funciones ecológicas afectadas por las acciones analizadas, en la bibliografía al igual que en los casos de estudio; se estableció un vínculo entre los impactos (factores ambientales) y las propiedades/atributos que determinan el funcionamiento de los ecosistemas y los SE. Para forjar la vinculación, se adoptó el enfoque conceptual de la Clasificación Internacional de los Servicios Ecosistémicos (CICES) propuesta por Haines-Young & Potschin, 2010.

La clasificación CICES se estructura en varios niveles, incluyendo sección, división, grupo, clase y tipo de clase, como se detalla en la *Figura 4-5*. Al descender desde la Sección hasta la División, el Grupo y la Clase, los "servicios" se vuelven cada vez más específicos, pero siguen enmarcados dentro de categorías más amplias. Estas categorías más amplias hacen referencia a los procesos bióticos o elementos abióticos que los sustentan (CICES Haines-Young & Potschin, 2018).

En la parte superior de la clasificación como se ve en la *Figura 4-5*, los servicios se agrupan en tres secciones según sus contribuciones al bienestar humano: i) suministro de necesidades materiales y energéticas, ii) regulación y mantenimiento del medio ambiente para los seres humanos, o iii) características no materiales de los ecosistemas que afectan estados físicos y mentales de las personas (CICES Haines-Young & Potschin, 2018). La división permite la clasificación estándar en grupos de procesos ecológicos, mientras que la clase, más detallada que el grupo, indica el propósito específico de la actividad, y el tipo de clase especifica los productos o fines particulares de la clase.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

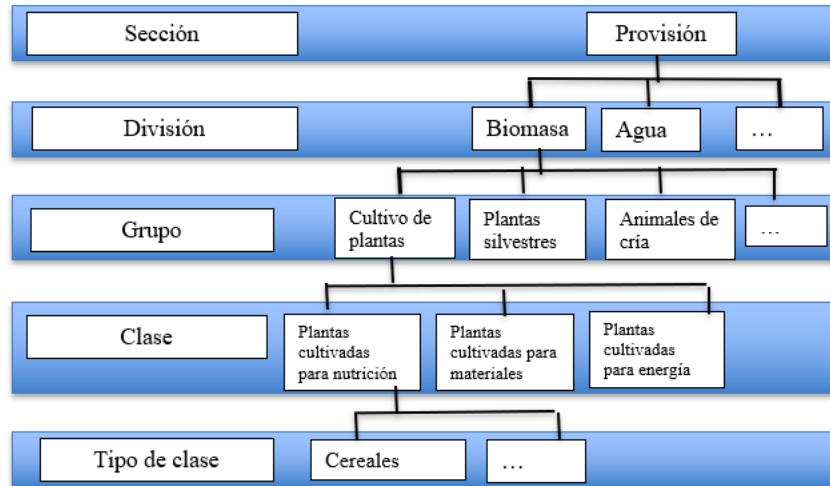


Figura 4-5. Fracción de la matriz de clasificación CICES. Fuente: (CICES Haines-Young & Potschin, 2018) en su versión 5.1.

B) Priorización/selección del Servicio Ecosistémico (SE) más representativo de la revisión bibliográfica

En coherencia con lo expuesto previamente, para la identificación de los SE se llevó a cabo un análisis que permitió establecer vínculos entre las acciones registradas en el cuadro de síntesis de la *Figura 4-2* y las funciones ecológicas que podrían ser afectadas por dichas acciones. Este proceso involucró el análisis del factor y efecto ambiental (acción e impacto), utilizando la sección y división de la clasificación CICES como se muestra en la *Figura 4-6*. Así, se identificaron los procesos o elementos ecosistémicos (bióticos y abióticos) afectados y, posteriormente, se estableció una conexión con la categoría clase para determinar el Servicio Ecosistémico relacionado con esos procesos.

La información derivada de este análisis se organizó mediante un cuadro de sistematización. Este cuadro proporciona una visión estructurada de la relación entre las acciones específicas, sus impactos ambientales y los Servicios Ecosistémicos correspondientes, facilitando así la comprensión y evaluación de las interconexiones entre las acciones y los servicios ofrecidos por el ecosistema.

Nombre del artículo	Acciones	Impacto	Impacto unificado	Sesión CICES	Clase CICES
1					
2					
...					

Figura 4-6. Ejemplificación de la identificación de los SE impactados mediante la clasificación CICES. Fuente: Elaboración propia.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Considerando la frecuencia con la que los SE fueron identificados o mencionados en la literatura, se tomó en cuenta este elemento como un criterio para la posterior selección y limitación que se tuvo en cuenta en la fase de comparación durante la siguiente etapa.

C) Priorización/selección del SE más representativo los EsIA

Tomando como referencia la información extraída de los casos de estudio, se procedió a verificar la asociación de cada impacto identificado con un SE específico. Además, se evaluó si el SE en cuestión contaba con alguna valoración o evaluación cuantitativa. Para realizar este análisis, se asignó a cada SE la clase correspondiente según la clasificación CICES. Los resultados de esta evaluación se sistematizaron en un cuadro de síntesis, detallado en la *Figura 4-7*. Este enfoque permitió consolidar de manera clara la relación entre los impactos ambientales y los Servicios Ecosistémicos asociados, proporcionando una visión integral de la interconexión entre ambos elementos.

Proyecto hidroeléctrico	Impacto unificado	Tipo de SSEE	Servicio Ecosistémico	Estructura	Valor del SE	Clase del Servicio Ecosistémico
EIA1						
EIA2						
...						

Figura 4-7. Fragmento de la tabla de asociación de los impactos socioambientales con los servicios ecosistémicos y su clase. Fuente: Elaboración propia.

Para concluir este proceso de análisis, se llevó a cabo una priorización de los SE, con el objetivo de seleccionar los más relevantes según las siguientes opciones:

- i) **Coincidencia en el punto A y B:** Se priorizaron aquellos SE que fueron mencionados tanto en la bibliografía revisada como en los EsIA. Esta doble identificación refuerza la importancia del SE al ser reconocido en ambas instancias.
- ii) **Consistencia en EsIA:** Se dieron prioridad a los SE que fueron consistentemente mencionados en todos los EsIA evaluados, incluso si no estaban presentes en la literatura revisada. Esta coherencia entre los estudios de caso destaca la relevancia del SE en el contexto específico de las PCH.
- iii) **Importancia según la Literatura:** También se priorizaron aquellos SE que fueron identificados como significativos en la literatura revisada, pero no fueron reconocidos de manera consistente en los EsIA. Esta divergencia entre las fuentes resalta posibles brechas o diferencias en la percepción de la importancia de ciertos SE.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

En esta fase, se llevó a cabo un análisis entre el área determinada por el EsIA para el análisis y aquella que tiene en cuenta los elementos de propagación espacial del SE (APSE).

La aplicación de estas opciones permitió seleccionar y priorizar los SE relevantes, de los cuales se seleccionó un SE que fue sometido a una comparación detallada entre las áreas (AIP vs APSE) en el siguiente ítem de análisis.

D) Identificación de los criterios usados por los EsIA para el SE seleccionado

En el proceso de análisis de los SE, se llevó a cabo una investigación específica para determinar si dichos servicios incorporaban los criterios de propagación espacial y/o un APSE. Los métodos de análisis de los SE son variados y pueden abordarse de manera cualitativa, descriptiva, participativa, a través de consultas, entre otros.

El propósito principal de parte de la metodología fue comprender los elementos que actualmente se incluyen en el capítulo de SE y aquellos que quedan excluidos cuando se aplican los criterios de propagación espacial APSE. Los resultados y hallazgos derivados de esta evaluación se organizaron de manera sistemática en un cuadro de síntesis, cuya representación gráfica se presenta en la *Figura 4-8*. Este cuadro proporciona una visión clara y detallada de la integración de los criterios de propagación espacial en el análisis de los SE.

Proyecto hidroeléctrico	Servicio Ecosistémico	Clase del Servicio Ecosistémico	Área de propagación de servicios ecosistémicos (APSE)	Zona de provisión	Zona de captura	Zona de flujo	Beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos
EIA1								
EIA2								
...								

Figura 4-8. Ejemplo de la matriz de datos utilizada para la identificación de los criterios de propagación espacial a el análisis de SE de los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Articulación/comparación del AIP y las APSE de los casos de estudio

Con la finalidad de llevar a cabo el análisis de las áreas, se emprendió la tarea de identificar los mapas e información geográfica correspondiente a cada caso de estudio. La información geográfica recopilada mostrada en la *Tabla 4-1* a escala de 1:100,000 fue esencial para llevar a cabo la comparación espacial entre el Área de Influencia del Proyecto (AIP) asociada a un Servicio Ecosistémico (SE) y el Área de Propagación de Servicios Ecosistémicos (APSE) calculado mediante la herramienta ECOSER -aplicada en el software ArcGis- a nivel de cuenca hidrográfica realizada para cada caso de estudio. La información recopilada en la *Tabla 4-1* se desglosa de la siguiente manera: la columna A contiene datos elaborados de manera propia para producir la APSE de cada caso de estudio; la columna B presenta los

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

insumos proporcionados por la herramienta ECOSER, utilizando como base la información de la sección A; y la columna C incluye los insumos proporcionados por los casos de estudio para realizar las comparaciones pertinentes.

Tabla 4-1. Información geográfica recopilada para comparación espacial de áreas.

A) Insumos producidos propios	B) Insumos producidos ECOSER	C) Insumos producidos por los casos de estudio
Capa cuenca para la APSE	IE -retención inicial	Área de influencia de cada EIA
Capa tipo hidrológico del suelo (A, B, C, D)	IE*0.2	
Capa de cobertura de la tierra	ES -escurrimiento superficial	
Capa ráster curva número CN	REP -retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal (mm)	
Capa ráster de precipitación del evento (mm en 24 horas).	Mapa del SE	
Días de tormenta		
Capa máscara escurrimiento superficial	Factor de aporte relativo de la función ecosistémica al SE	
Capa REP normalizada en una escala de 0-100	Mapa de captura de beneficiarios	
Shape de puntos de beneficiarios	Mapa de beneficio	
Mapa del SE normalizado en una escala de 0-100		

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Análisis del AIP para el SE de cada caso de estudio

Se realizó un análisis detallado de cómo cada caso de estudio identificó y evaluó el área para el SE, examinando los criterios utilizados para seleccionar y ubicar espacialmente estos SE, especialmente para el SE seleccionado. Este análisis tuvo como objetivo proporcionar una base para comparación con el área propuesta por la APSE (teórica).

4.2.2 APSE del SE seleccionado para cada caso de estudio, con el protocolo ECOSER

Previo a dar inicio al desarrollo del protocolo ECOSER, fue fundamental delimitar la cuenca hidrográfica. Cada caso de estudio realiza su propia AIP tomando elementos territoriales como cuencas, coberturas, entre otros (ANLA., 2018). En este caso, para el APSE

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

considerando el movimiento del SE, se selecciona la cuenca hidrográfica hasta el punto de descarga de proyecto PCH.

ECOSER es una herramienta diseñada para respaldar tanto la toma de decisiones en relación con el uso del suelo como la investigación, la integración disciplinaria y la colaboración científica en torno a los "flujos de funciones (FE) y servicios ecosistémicos (SE)" (Lattera et al., 2017). Su enfoque principal se centra en la interacción de estos flujos y servicios, así como en su "captura por la sociedad" y la "vulnerabilidad socioecológica (VSE)" ante diversos escenarios de pérdida de servicios ecosistémicos. Esta herramienta se basa en un protocolo o conjunto de procedimientos que permiten evaluar y mapear servicios ecosistémicos bajo la plataforma ArcGis (Lattera et al., 2018).

Los procedimientos, modelos e índices que integran ECOSER se dividen en dos módulos esenciales: 1) la evaluación del flujo de SE en una unidad de paisaje y 2) la evaluación de la vulnerabilidad socioecológica frente a la pérdida del flujo de SE y sus beneficios (Lattera et al., 2017). Este trabajo de investigación se centró específicamente en el módulo 1, que hace uso de matrices de contribución a partir de tres pasos principales como se observa en la *Figura 4-9*, i) la evaluación de las FE y/o paisajes, a partir de la selección de atributos que se combinan dentro de variables sustitutas o proxys basadas en índices o modelos de procesos para representar FE, ii) la evaluación de SE a partir de la o las FE que los soportan (considerando que en general, un SE dado resulta de la interacción entre distintas FE), y iii) la evaluación de los beneficios que se derivan de los SE considerando que estos se propagan espacialmente y son capturados por beneficiarios tanto directos como indirectos (Lattera & Paruelo, 2011). Se resalta que este protocolo se usa como una herramienta dentro del software ArcGis.

MODULO 1



Figura 4-9. Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos módulo 1. Fuente: Tomado de (Laterra et al., 2017).

En esta fase de la investigación, se empleó un análisis detallado del Servicio Ecosistémico (SE) priorizado, que como se verá más adelante es el SE de aprovisionamiento de agua potable en los seis casos de estudio seleccionados. Este análisis se realizó mediante el cálculo de la Función Ecosistémica (FE) de retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal otorgada por ECOSER (Tabla 4-1, B). Para obtener esta FE, se empleó el método de número de curva de escorrentía (CN) (Tabla 4-1, A) que permite realizar un cálculo distribuido de la escorrentía superficial. La FE de regulación hidrológica se refiere a la capacidad del ecosistema para capturar la lluvia de tormenta a lo largo de un año, se calcula a partir de la diferencia entre la escorrentía superficial (ES) y la precipitación (P) durante eventos de tormenta otorgada por ECOSER.

$$REPi = (P - ES) \times DT$$

Ecuación 1

Donde,

REP: retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal en el píxel i (mm),

P: lluvia de un evento de tormenta (mm) y

DT: número de días de tormenta en un año.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

ES: escorrentía superficial (mm), calculada a partir de:

$$ES = \frac{(P-0.2XIE)^2}{P+0.8XIE} \quad \text{Si } P > 0.2 \times IE$$

$$ES=0 \quad \text{si } P \leq 0.2 \times IE$$

Ecuación 2

Donde,

IE: pérdida inicial o retención máxima potencial, que incluye la cantidad de lluvia retenida por el ecosistema antes del escurrimiento, evaporación e infiltración, se determina mediante

$$IE = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 3

Donde,

El valor de CN (Tabla 4-1,A) relacionado con usos del suelo, cobertura de la tierra, permeabilidad y humedad antecedente del suelo, se encuentra en un rango de 0-100, donde valores altos significan un mayor escurrimiento (poca infiltración) y valores bajos garantizan altas tasas de infiltración (poco escurrimiento y erosión hídrica baja) (Barral, 2017), es decir los valores de condiciones de humedad antecedente (AMC), por sus siglas en ingles.

Los AMC (**Tabla 4-2**) se obtuvieron a partir del número de curva para grupos de suelos hidrológicos (GHS) del manual de drenaje de INVIAS, 2009, mediante insumo propio como se indica en la Tabla 4-1, A. Estos valores se determinaron según la información textural del horizonte A de cada unidad de suelo y las categorías del mapa de coberturas, que se catalogan en cuatro tipos: A (bajo potencial de escorrentía), B (moderadamente bajo potencial de escorrentía), C (moderadamente alto potencial de escorrentía) y D (alto potencial de escorrentía) (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Tabla 4-2. Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente.

Condición de humedad antecedente (AMC)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)	Justificación
AMC I	0 - 36	se caracteriza por el menor potencial de escorrentía, indicando que los suelos están lo suficientemente secos para permitir un arado efectivo o la realización de siembras. Por otro lado,
AMC II	36.1 – 52.5	exhibe un potencial de escorrentía de nivel intermedio
AMC III	Más de 52.5	presenta el mayor potencial de escorrentía, indicando que la cuenca hidrográfica se

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

		encuentra prácticamente saturada debido a precipitaciones anteriores abundantes.
--	--	--

Fuente: Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Los GHS y las categorías del mapa de coberturas de la tierra se combinan para generar complejos hidrológicos de la cobertura del suelo, a los cuales se les asigna un valor de CN. Estos valores se calcularon para condiciones de humedad antecedente media (AMC II) (**Tabla 4-2**) para cada cobertura del suelo, insumo que se ingresa a la interfaz de ECOSER como se observa en la *Figura 4-10*.

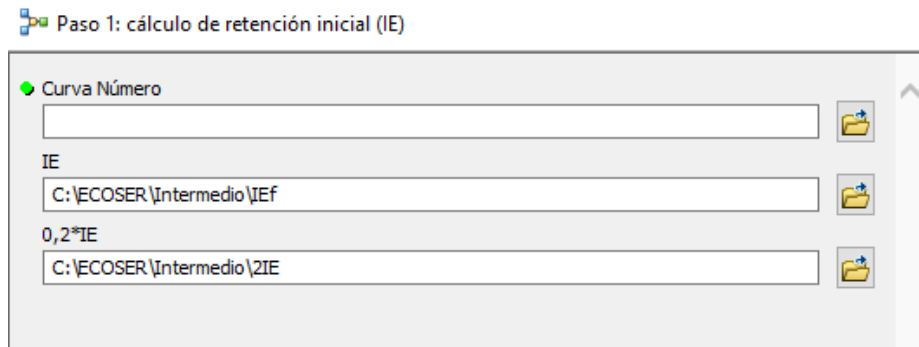


Figura 4-10. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 1 de todo el procedimiento. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1

El procedimiento del protocolo ECOSER continua mediante la aplicación exclusiva en días que conllevan eventos de precipitación con el potencial de ocasionar inundaciones. Se escogieron las estaciones de precipitación distribuidas en el área de estudio y sus alrededores, pertenecientes a los seis casos de estudio identificados, y se consideró un período de tiempo específico. La elección de los días de tormenta para cada año y estación se basó en dos condiciones clave, obtenidas mediante lenguaje de programación R, ya que se trata de datos dependientes:

- i) valores diarios de precipitación que superen el percentil 90. Ya que ayuda a identificar los eventos de precipitación más extremos, es decir, aquellos que se encuentran en el 10% superior de los valores diarios, indicando que tienen un mayor potencial para generar escorrentía significativa y acumulación de agua. Al seleccionar días con precipitaciones que superan el percentil 90, por lo tanto el área de influencia se centra en los eventos más críticos y representativos (Chow et al., 1988).
- ii) Correspondan con la condición de humedad antecedente AMCII. Esta condición, que representa un nivel de humedad promedio, se utilizó porque refleja las condiciones normales de la zona. Las características de la zona en los casos de estudio se consideran generales, por lo que AMC II proporciona una referencia adecuada.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

A este resultado, se le aplicó un análisis de desviación estándar para evaluar la variabilidad y dispersión de los datos del conjunto y de la varianza (ANOVA) para comparar las medias del valor promedio de los días de tormenta (mm). Se utilizó el software R para realizar el análisis. Primero, se prepararon los datos, asegurando de tener una variable de respuesta y una o más variables categóricas. Luego, se ejecutó la desviación usando la función `sd()` y para la ANOVA utilizando la función `aov()`. Interpretando los resultados, considerando el valor p para determinar si existen diferencias significativas entre los grupos.

Continuando con el resultado de la precipitación con las condiciones anteriores se convirtió en datos espaciales mediante un proceso de interpolación para las cuencas delimitadas para la APSE de cada caso de estudio. Para la elección del evento de precipitación se calculó el promedio de los milímetros correspondientes a los días que cumplieron con las condiciones clave mencionadas anteriormente, y mediante la herramienta "Interpolation" en "Spatial Analyst Tools" de ArcGis, se evaluó la interpolación de todos los años de información mediante el método Kriging, ya que este es adecuado para eventos con una variabilidad espacial compleja y permite modelar las correlaciones espaciales entre los puntos de datos. Además, Kriging funciona bien con datos que presentan patrones irregulares, proporcionando estimaciones más precisas que Inverse Distance Weighting (IDW) (Lam et al., 2003). Por otro lado, para la interpolación de los días de tormenta se utilizó IDW, ya que este método es apropiado cuando los puntos de datos están distribuidos regularmente en el espacio, en este caso representa un único valor para la cuenca.

Con todos los datos recopilados, se aplicó el ArcToolbox según el protocolo ECOSER (Barral, 2017) como se muestra en la interfaz de la *Figura 4-11* para la función ecosistémica de retención de excesos de precipitación por parte de la cobertura vegetal (REP). Se obtuvo información sobre la escurrentía para el evento de tormenta en las cuencas seleccionadas de los seis casos de estudio al igual que la FE REP, es importante destacar que, para que el cálculo del escurrimiento sea válido, la cantidad de precipitación seleccionada debe ser mayor al 20% de las pérdidas iniciales, es decir, $P > 0.2IE$ retención inicial.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

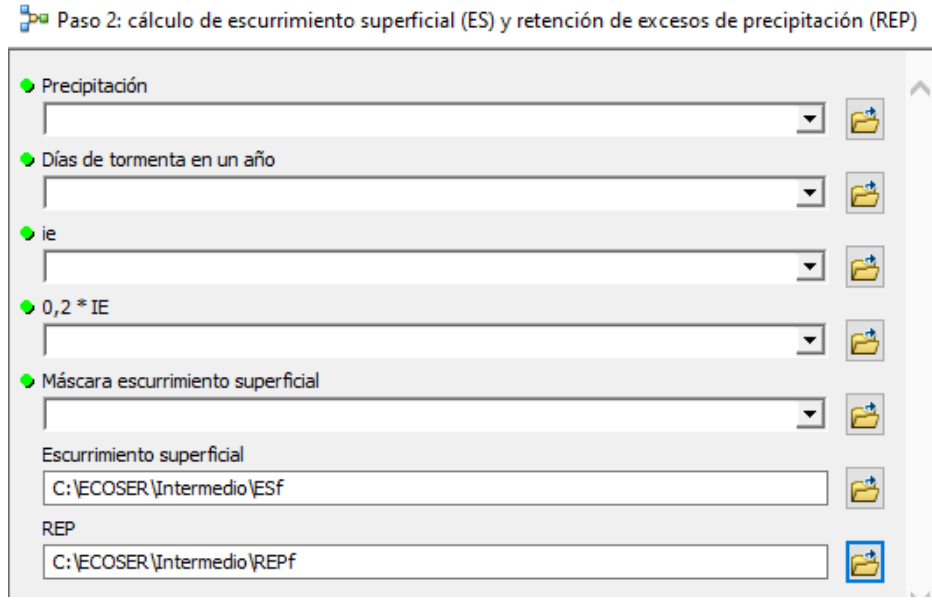


Figura 4-11. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 2 de todo el procedimiento.
Fuente: Herramienta ECOSER 2.1

Del protocolo ECOSER se obtuvo la función REP (Figura 4-11) a la cual se le aplicó una normalización según los valores máximo y mínimo debido a que los mapas de funciones tienen unidades diferentes, así se generó un insumo propio para ingresar a ECOSER y obtener la provisión relativa del SE.

Continuando con el protocolo como se muestra en la interfaz de la *Figura 4-12* se requiere la función REP normalizada (*Figura 4-1, A*) y el valor del aporte relativo (*Figura 4-1,B*), que es un índice asignado por expertos, que determina la provisión relativa de SE para cada tipo de ecosistema principal, donde se consigna la importancia relativa de cada función ecosistémica (filas) en cada tipo de ecosistema principal (columnas) (Tabla 4-3). Los elementos de esta matriz variaron desde 0 (importancia baja o despreciable) hasta 1 (máxima expresión de la función en el ecosistema (Latterra & Paruelo, 2011). Para este trabajo de investigación se utilizó la matriz proporcionada por (Latterra & Paruelo, 2011) (Latterra et al., 2018) (Tabla 4-3).

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Tabla 4-3. Funciones ecosistémicas (filas) y principales tipos de ecosistemas (columnas) considerados en el protocolo ECOSER. Los valores representan flujos relativos sugeridos por defecto a partir la bibliografía.

<div style="text-align: center;"> Servicios ecosistémicos Funciones Ecosistémicas </div>	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Disponibilidad de agua superficial limpia	Disponibilidad de aguas subterránea limpia	Producción potencial de cultivos
Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo	0,9	0,2	0,3	0,3	0,8
Almacenamiento de carbono en biomasa	1,0	0,2	0,2	0,2	0,3
Control de la erosión	0,4	0,7	0,9	0,6	0,8
Fertilidad del suelo	0,2	0,2	0,1	0,2	1,0
Retención de exesos de precipitación por cobertura vegetal	0,4	1,0	0,7	0,6	0,7
Retención de exesos de precipitación por humedales	0,3	1,0	0,7	0,6	0,7
Protección de acuíferos por cobertura vegetal	0,0	0,3	0,4	1,0	0,3
Filtrado de sedimentos y contaminantes en humedales	0,0	0,3	1,0	0,8	0,2
Filtrado de sedimentos y contaminantes en franjas de vegetación ribereña	0,0	0,3	1,0	0,8	0,2

Fuente: Protocolo ECOSER (Lattera et al., 2018).

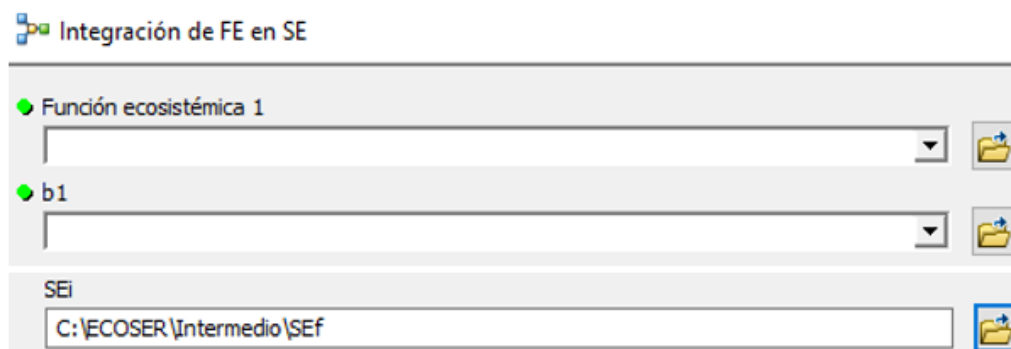


Figura 4-12. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el paso 3, integración de la función ecosistémica REP normalizada con el b1: aporte relativo para obtener el SE. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Los beneficios se refieren a la porción del flujo de SE que se captura o transforma en pro de mejorar el bienestar de la población local. Dos lugares con flujos iguales de Funciones Ecosistémicas (FE) que respaldan ciertos SE pueden implicar ofertas diferentes de beneficios, dependiendo de factores como la propagación espacial del SE, el acceso y la cantidad, así como el tipo de beneficiarios (directos y/o indirectos) (Latterra & Paruelo, 2011) (Fisher & Kerry Turner, 2008).

Mediante la fórmula:

$$\text{Beneficio} = \text{Flujo de Servicio Ecosistémico} \times \text{Captura}$$

Ecuación 4

Para el flujo de SE, se normaliza el SE obtenido mediante el protocolo ECOSER para generar un insumo propio. De manera similar, la captura se genera como insumo propio considerando la distribución de la población en relación con la población total o máxima. Esta distribución implica la interpolación de los beneficiarios en toda el área de estudio, utilizando para ello el método de interpolación de distancia inversa (IDW), al igual que se hace para los días de tormenta.

Estos insumos se ingresan en la interfaz como se muestra en la *Figura 4-13*, al igual que la capa de beneficiarios, en este caso son los usuarios del agua obtenidos mediante la solicitud oficial a las corporaciones ambientales mediante correo electrónico o mediante las plataformas, algunas corporaciones disponen de bases de datos de usuarios del agua con acceso público, los usuarios solicitados fueron los ubicados en los municipios pertenecientes a las cuencas seleccionada para la APSE de cada caso de estudio.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

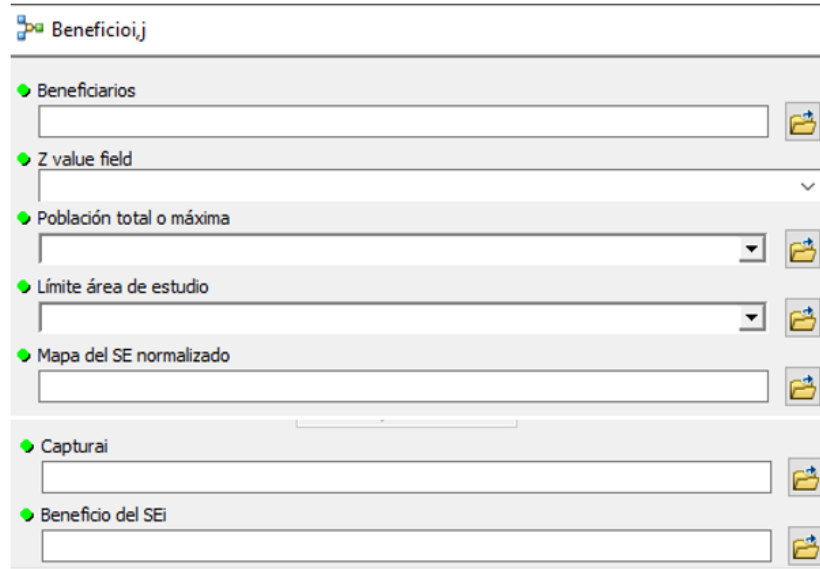


Figura 4-13. Interfaz de la herramienta ECOSER en el software ArcGis mostrando el último paso, integración del beneficio y el SE para obtener el beneficio. Fuente: Herramienta ECOSER 2.1.

4.2.3 Comparación de áreas AIP vs APSE

Mediante la superposición de las áreas de cada caso de estudio (AIP) y las obtenidas del paso anterior con ECOSER, se realizó una comparación entre ellas para determinar si el AIP es suficiente para involucrar un APSE o si requiere ser modificado para incorporar los criterios.

La comparación de estas dos áreas podría arrojar tres posibles resultados para la evaluación e identificación del SE:

- i) que el SE estuviera en el AIP y no en el APSE
- ii) que el SE no estuviera en el AIP, pero si en el APSE y
- iii) que el SE no estuviera ni el AIP ni en el APSE.

Estos resultados se traducen en un indicador de comparación

$$\frac{AIP - APSE(teórica)}{APSE(teórica)} \begin{matrix} < 0 \text{ el AIP No captura la APSE} \\ = 0 \text{ coincide el AIP con el APSE} \\ > 0 \text{ el AIP puede incorporar el APSE} \end{matrix}$$

Ecuación 5

se puede interpretar de la siguiente manera:

- i) Cuando el indicador es menor que cero (< 0): Esto indica que el AIP no captura adecuadamente el APSE teórico. En términos prácticos, significa que el valor del AIP es menor que el valor del APSE teórico, sugiriendo una subestimación de área del SE identificado comparado con lo que se teoriza basado en las

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

condiciones del suelo y la escorrentía (ECOSER). Esta discrepancia puede señalar una insuficiencia de AIP o una falta de integración de todos los criterios relevantes para una APSE.

- ii) Cuando el indicador es igual a cero ($=0$): Esto indica una coincidencia entre el AIP y el APSE teórico. En este escenario, el AIP puede reflejar los criterios para una APSE lo cual sugiere que el AIP está bien interpretado para incorporar los criterios que determinan el APSE. Esta concordancia es ideal, ya que muestra que el análisis del SE está alineado con las expectativas teóricas basadas de la APSE.
- iii) Cuando el indicador es mayor que cero (>0): Esto indica que el AIP puede incorporar el APSE teórico, ya que el valor del AIP es mayor que el del APSE teórico. Este resultado sugiere que el análisis del área del SE no solo captura el APSE teórico, sino que también podría estar incluyendo otros factores adicionales. Esto puede ser indicativo de un AIP más conservador o que incluye criterios o factores adicionales que aumentan el valor del AIP por encima del APSE teórico.

El uso de este indicador es crucial para validar y ajustar el área de análisis del SE en relación con el análisis teórico de una APSE. Un valor negativo sugiere la necesidad de revisar y potencialmente mejorar el AIP para asegurarse de que captura todos los factores relevantes que influyen en el APSE. La coincidencia (valor igual a cero) es el objetivo ideal, indicando una precisión y adecuación del AIP. Por otro lado, un valor positivo puede llevar a una revisión del AIP para entender por qué está estimando un área mayor de análisis que el APSE y determinar si este aumento está justificado por la incorporación de criterios adicionales o si se trata de una sobreestimación que requiere corrección. En resumen, este indicador sirve como una herramienta de diagnóstico y ajuste, asegurando que las áreas de análisis de SE potencial se alineen adecuadamente con las condiciones de un APSE.

4.3 Generación de lineamientos

Por último, se elaboró una propuesta de la generación de unos lineamientos para una APSE dentro de los TdR de PCH, por medio de los resultados de las dos etapas anteriores.

Se procedió a la generación de los lineamientos para la identificación y análisis de los Servicios Ecosistémicos (SE). Durante este proceso, se destacó la importancia de incorporar criterios de propagación para una identificación y análisis más integral de los SE.

La propuesta resultante busca ser aplicable a proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) y, además, se plantea su potencial aplicabilidad a otros tipos de proyectos de desarrollo.

5 Resultados

5.1 Revisión bibliográfica

A) Selección de las acciones e impactos típicos de las PCH en la bibliografía

Primero, se identificaron las acciones que provocan impactos ambientales y sociales, resultando en un total de 110 acciones identificadas. Estas acciones, a su vez, generaron un total de 169 impactos, como se observa en la Figura 5-1. El elevado número de acciones e impactos se debe a la variabilidad en la denominación de estas en cada artículo. Esta diversidad de nombres para las mismas acciones conduce a una multiplicidad de impactos, lo que resulta en el alto número total observado.

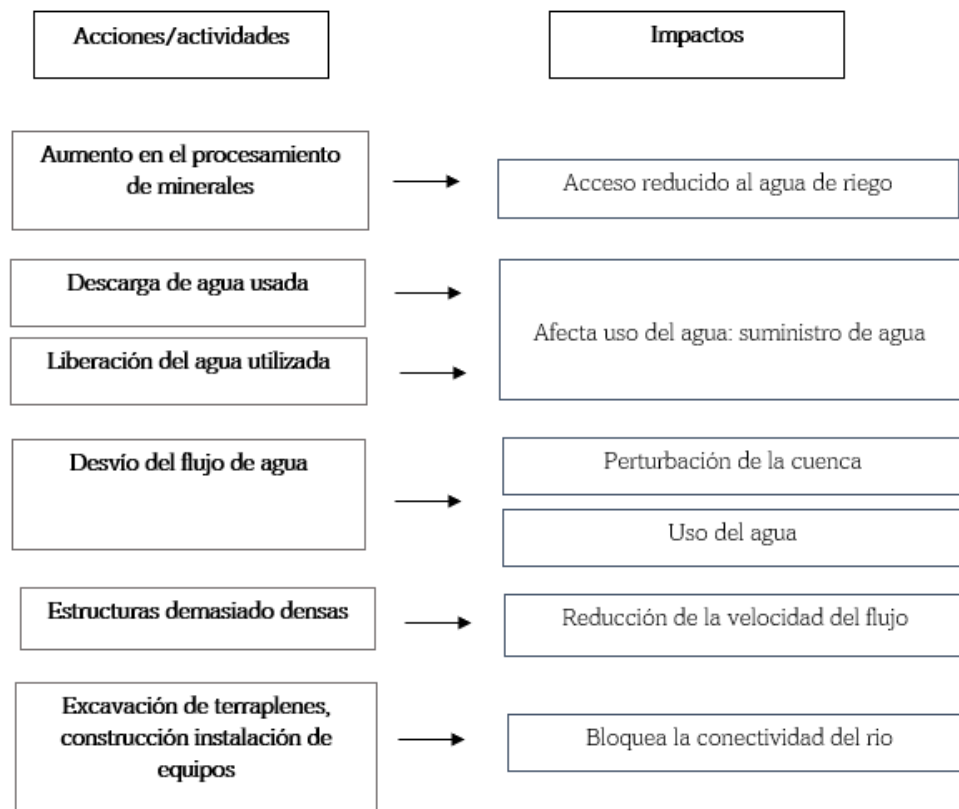


Figura 5-1. Fragmento de los impactos ocasionados por las actividades de los proyectos PCH encontrados en la bibliografía. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, una alta cantidad de impactos genera multiplicidad en el conteo de estos.

B) Unificación de impactos ambientales (Estandarización/jerarquización)

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Posteriormente, se aplicó un proceso de unificación y estandarización siguiendo el ejemplo detallado en la *Figura 5-2*. Este proceso implicó la comparación de los diversos nombres atribuidos a los impactos por los artículos (bloque izquierdo) con el listado proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente (Min Ambiente, 2021) para determinar la correspondencia y estandarizarlos.

Como resultado de este proceso, se determinó que, de los 169 impactos eran 79 impactos distintos (ver *Figura 5-3*, barra rosa).

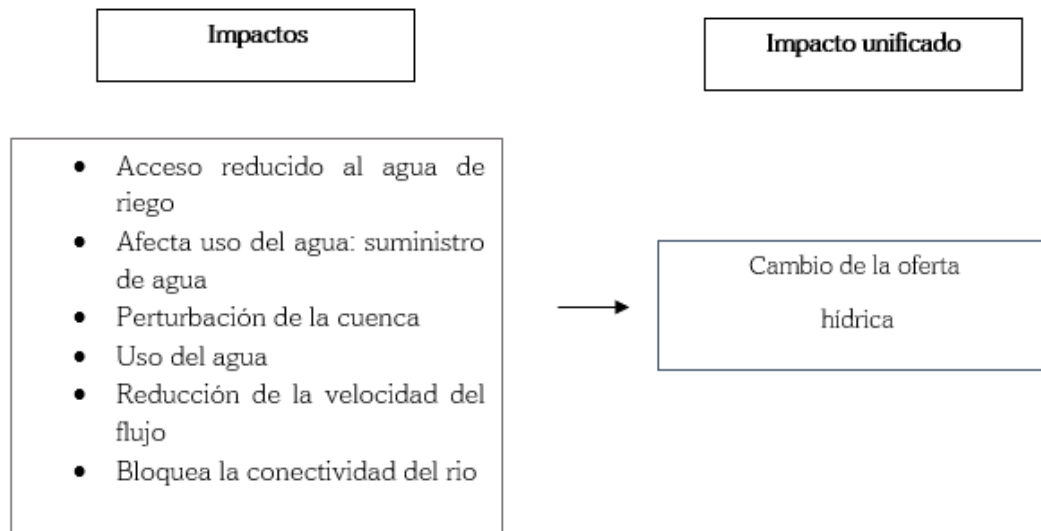


Figura 5-2. Ejemplo: Unificación y estandarización del impacto cambio de la oferta hídrica mediante el listado de impactos ambientales específicos del Min Ambiente (2021). Fuente: Elaboración propia.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

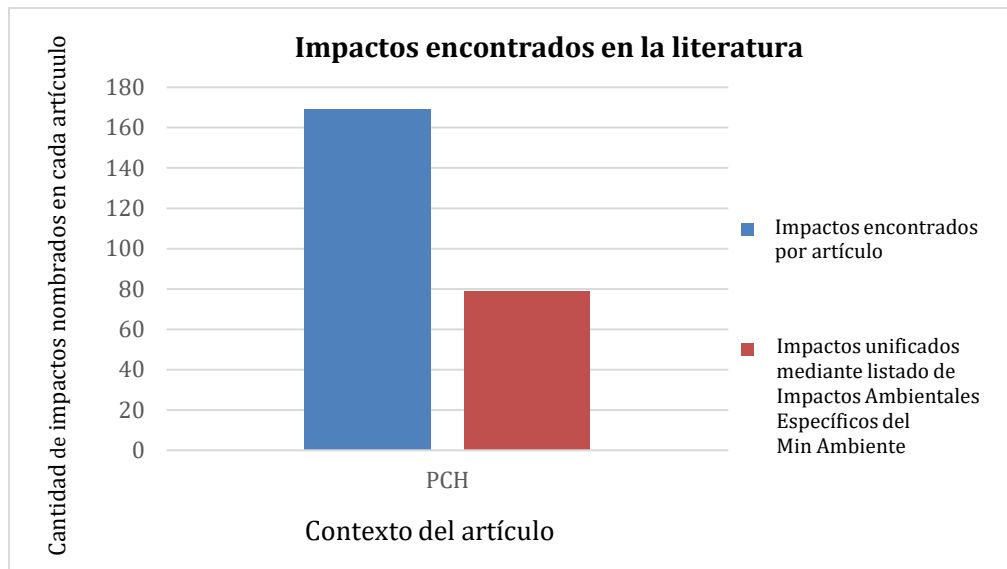


Figura 5-3. Cantidad de impactos mencionados en la literatura e impactos mencionados en la literatura unificados mediante el listado de impactos ambientales específicos del Min Ambiente (2021). Fuente: Elaboración propia

En línea con lo mencionado anteriormente, se identificaron los impactos más frecuentes abordados en los artículos, como se aprecia en la **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1. Impactos unificados por cantidad de nombramientos en los artículos consultados
 En la tabla se visualiza la frecuencia con la que el impacto unificado es mencionado en cada artículo consultado, representado mediante una escala de colores que va desde un tono azul intenso, indicando los impactos más frecuentemente citados, hasta un tono más claro que denota los impactos mencionados en un solo artículo.

Impacto identificado unificado	Número de artículos que nombran el mismo impacto
Interrupción de las rutas migratorias de especies de fauna acuática	7
cambio de la oferta hídrica	6
cambio de los volúmenes de un cuerpo de agua superficial	6
afectación a las poblaciones de especies acuáticas	6
cambio en los procesos sedimentarios	6
disminución del hábitat de las especies acuáticas	5
disminución del hábitat	5
fragmentación del hábitat	5
cambio en los procesos erosivos	4
incremento de la oferta de energía eléctrica	4
interrupción de la continuidad fluvial superficial	4
disminución de la capacidad de asimilación y dilución de sustancias contaminantes	4

Crterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Impacto identificado unificado	Número de artículos que nombran el mismo impacto
cambios en las características químicas de las aguas superficiales	4
fragmentación del hábitat de las especies acuáticas	3
disminución del volumen de agua	3
perdida de uno o más horizontes del suelo	3
cambio en la diversidad de las especies	3
cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna	2
incremento de los sólidos suspendidos totales (SST)	2
incremento de la oferta hídrica para uso agrícola	2
cambio en el hábitat de las especies acuáticas	2
cambio en la conectividad ecosistémica	2
cambio en el número de especies	2
cambio en la conservación de un recurso natural	2
cambio en la dinámica sedimentológica	2
generación de ruido tonal	2
disminución del caudal ambiental	2
cambio en la conectividad ecológica potencial	2
disminución de la sedimentación	2
ratificación del entorno	2
afectación a la salud de las poblaciones de especies acuáticas de importancia económica	2
disminución de la biodiversidad	2
incremento de la demanda de recolección de residuos sólidos ordinarios	1
disminución en el transporte de sedimentos	1
incremento de los impuestos	1
cambio en la composición de las especies	1
generación de conflictos por el uso de la tierra	1
cambios de cauce	1
incremento de la oferta hídrica para consumo humano	1
cambio en el curso de los cuerpos de agua superficial	1
cambio en los nichos ecológicos	1
disminución de ecosistemas	1
cambio en la organización comunitaria	1
afectación de humedales	1
cambio en las características físicas del suelo	1
cambio de los caudales de un cuerpo de agua superficial	1
incremento de la oferta de empleo	1
afectación a las poblaciones de especies acuáticas de importancia ambiental	1
incremento de la oferta hídrica para uso industrial	1
disminución de la cobertura vegetal	1
incremento de olores ofensivos - desagradables	1

Crterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Impacto identificado unificado	Número de artículos que nombran el mismo impacto
disminución de la concentración de nutrientes en el agua	1
cambio en la fisonomía del paisaje	1
disminución de la diversidad genética	1
fragmentación de la cobertura vegetal	1
disminución de la ocurrencia de inundaciones	1
cambio en la percepción de la calidad visual del paisaje	1
disminución de la oferta hídrica para la preservación de la flora y fauna	1
generación de expectativas en la población	1
disminución de la oferta hídrica para uso agrícola	1
incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI)	1
disminución de la potencia o capacidad de generación energética	1
incremento de la demanda de recolección de residuos sólidos ordinarios	1
disminución de la riqueza	1
cambio en las poblaciones y/o comunidades acuáticas	1
cambio en el turismo	1
cambio en las unidades geomorfológicas	1
disminución de las poblaciones de especies acuáticas	1
incremento de la sedimentación	1
disminución de las unidades paisajísticas	1
cambio en los ecosistemas acuáticos, marino-costeros y/o continentales	1
cambio en la estabilidad del terreno	1
incremento del pH (alcalinización - acidificación)	1
cambio en la estructura de las especies	1
cambio en la abundancia de las especies	1
cambio en la estructura del suelo	1
incremento de la temperatura	1
Disminución de la biodiversidad	1

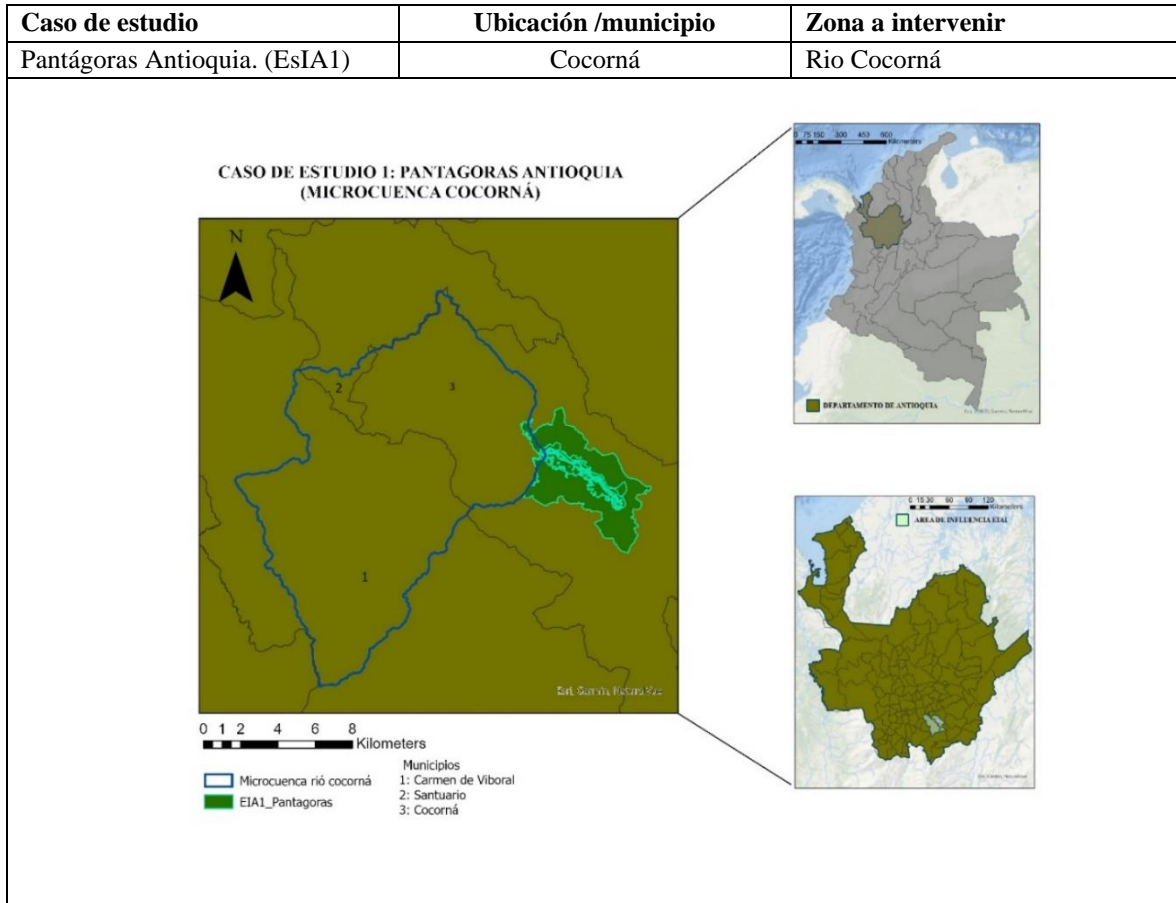
5.2 Revisión de casos de estudio (EsIA)

Las autoridades ambientales proporcionaron seis casos de estudio actuales relacionados con Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) de proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), los cuales requieren la aprobación de la Licencia Ambiental (LA). El estado de los EsIA varía, algunos se encuentran en revisión, mientras que otros ya han obtenido la aprobación y correspondiente LA. Como se muestra en la *Tabla 5-2* la autoridad ambiental CORNARE presentó tres casos de estudio: Pantágoras Antioquia (EsIA1), PCH Cocorná III (EsIA2) y Churimo (EsIA3). Por su parte, la autoridad ambiental

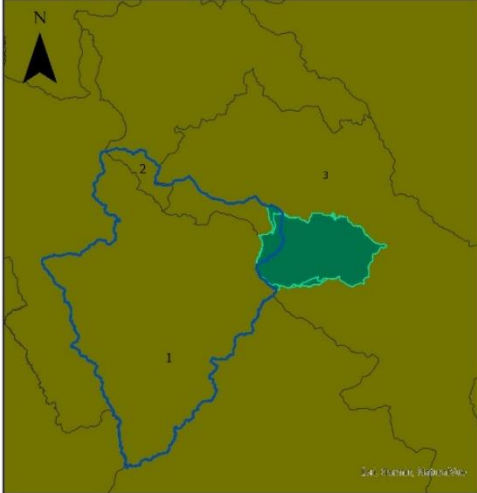


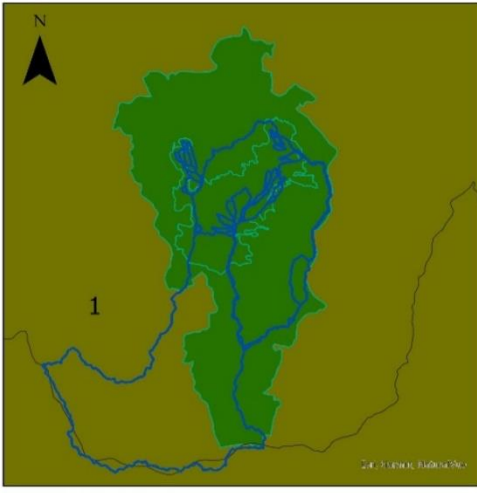


Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

CORANTIOQUIA Territorial Tahamíes brindó tres casos adicionales: Chorreritas (EsIA4), Los Milagros (EsIA5) y La Bonita II (EsIA6).

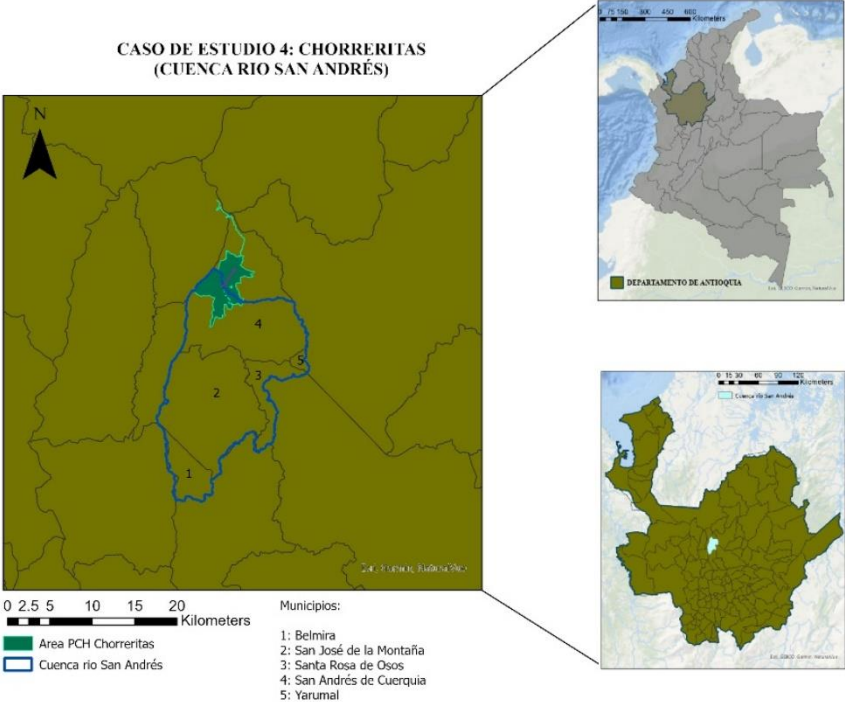
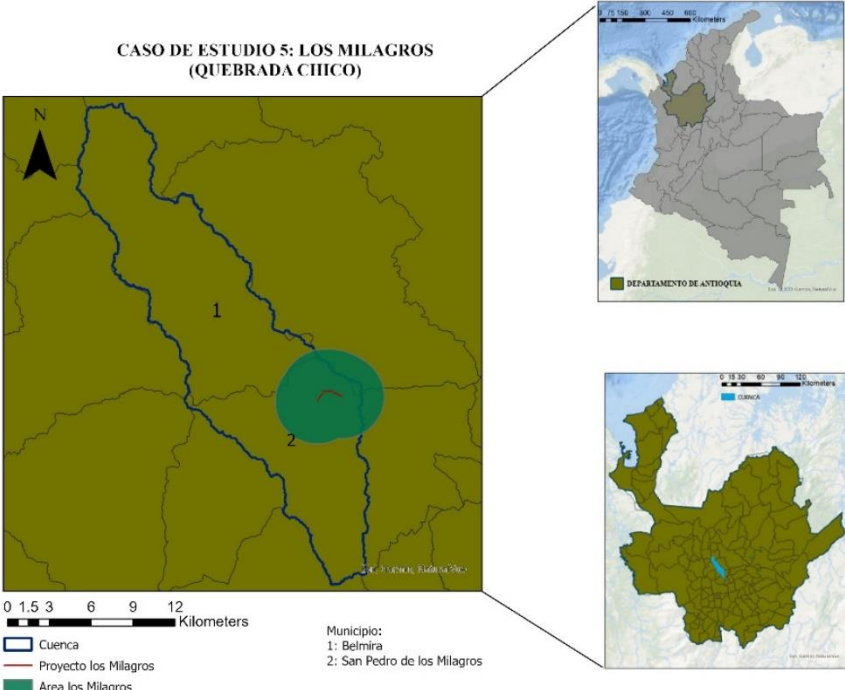
Tabla 5-2. Ubicación y área de influencia -AIP de los casos de estudio



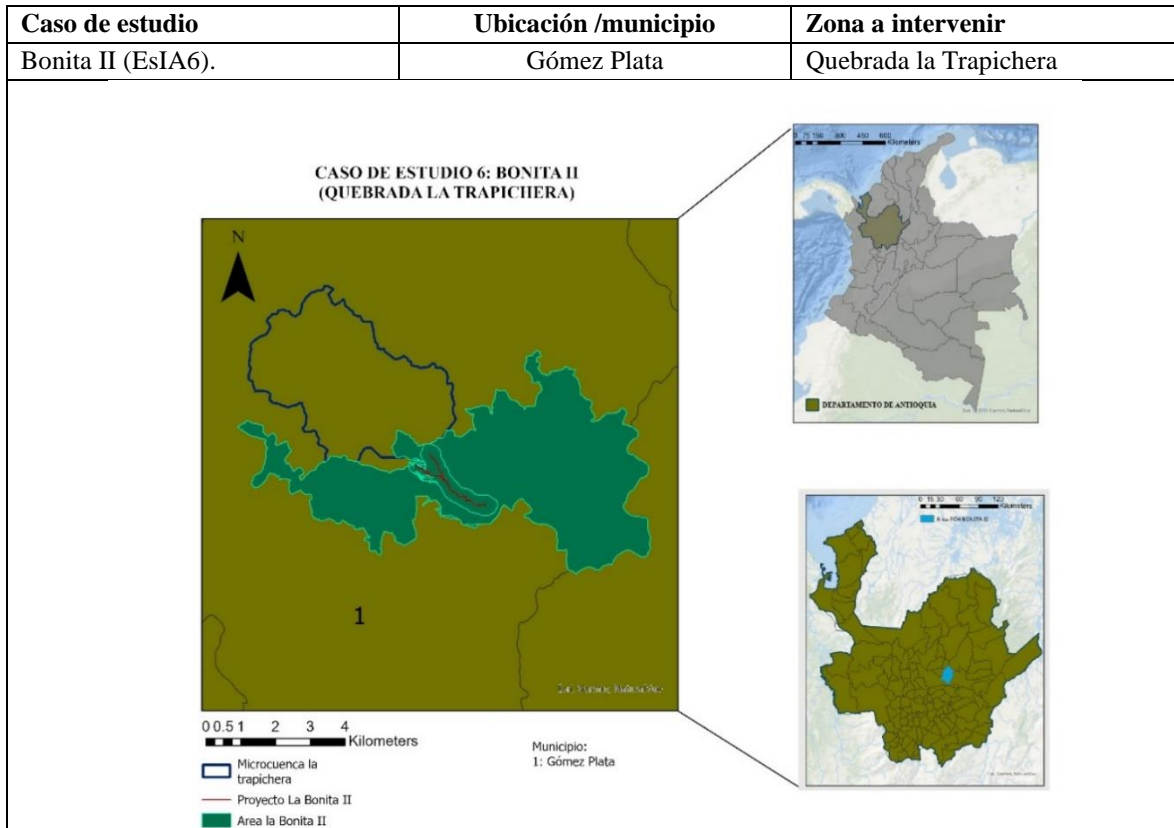
Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Caso de estudio	Ubicación /municipio	Zona a intervenir
PCH Cocorná III (EsIA2)	Cocorná	Rio Cocorná
<p style="text-align: center;">CASO DE ESTUDIO 2: PCH COCORNÁ III (MICROCUCNA COCORNÁ)</p>  <p>0 1 2 4 6 8 Kilometers</p> <p> ■ Área influencia_ PCH Cocorná Microcuena Cocorná </p> <p> Municipios: 1: Carmen de Viboral 2: Santuario 3: Cocorná </p>  		
Churimo (EsIA3)	San Rafael	Rio Churimo
<p style="text-align: center;">CASO DE ESTUDIO 3: CHURIMO (MICROCUCNA CHURIMO)</p>  <p>0 0.4 0.85 1.7 2.55 3.4 Kilometers</p> <p> ■ Area PCH Churimo Microcuena rio Churimo </p> <p>Municipio: 1: San Rafael</p>  		

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Caso de estudio	Ubicación /municipio	Zona a intervenir
Chorreritas (EsIA4),	San Andrés de Cuerquia	Rio San Andrés
<p style="text-align: center;">CASO DE ESTUDIO 4: CHORRERITAS (CUENCA RIO SAN ANDRÉS)</p>  <p style="text-align: center;">Municipios:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: Belmira 2: San José de la Montaña 3: Santa Rosa de Osos 4: San Andrés de Cuerquia 5: Yarumal 		
Los Milagros (EsIA5)	San Pedro de los Milagros	Rio Chico
<p style="text-align: center;">CASO DE ESTUDIO 5: LOS MILAGROS (QUEBRADA CHICO)</p>  <p style="text-align: center;">Municipio:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: Belmira 2: San Pedro de los Milagros 		

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH



Fuente: Elaboración propia con la GDB de cada caso de estudio.

En la revisión de los seis casos de estudio (EsIA), se aplicó el mismo procedimiento que en la fase anterior, que consistió en la unificación de los impactos mediante el listado de Impactos Ambientales Específicos del Ministerio de Medio Ambiente (MinAmbiente, 2021). Dado que cada caso de estudio mencionaba los impactos de manera diferente, esta unificación identificó 79 impactos diferentes. De estos, ocho impactos fueron mencionados en todos los casos de estudio revisados (seis EsIA), como se puede observar en la *Tabla 5-3*.

Los impactos socioambientales comunes a todos los casos de estudio según la *Tabla 5-3* son: cambio en las características físicas y químicas del suelo, cambio en la dinámica del empleo, cambio en el hábitat de las especies acuáticas, cambio en los niveles de ruido, cambio en los procesos erosivos, cambio en el uso del suelo, deterioro o mejora de las condiciones de conservación del patrimonio arqueológico y generación de expectativas en la población.

Tabla 5-3. Impactos unificados identificados en cada caso de estudio -EIA Los impactos se encuentran en orden descendente, desde al más al menos mencionado en los EIA.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Nº	Impacto unificado	EIA 1	EIA 2	EIA 3	EIA 4	EIA 5	EIA 6
1	Deterioro o mejora de las condiciones de conservación del patrimonio arqueológico	X	X	X	X	X	X
2	Cambio en el hábitat de las especies acuáticas	X	X	X	X	X	X
3	Cambio en las características físicas y químicas del suelo	X	X	X	X	X	X
4	cambio en los procesos erosivos	X	X	X	X	X	X
5	Generación de expectativas en la población	X	X	X	X	X	X
6	cambio en los niveles de ruido	X	X	X	X	X	X
7	cambio en la dinámica del empleo	X	X	X	X	X	X
8	cambio en el uso del suelo	X	X	X	X	X	X
9	Cambio en las actividades económicas tradicionales	X		X	X	X	X
10	disminución de la concentración de contaminantes criterio	X	X	X		X	X
11	Cambio en las prácticas de cultivo	X		X	X	X	X
12	alteración del flujo de agua	X	X		X	X	X
13	disminución de la cobertura vegetal	X	X		X	X	X
14	Cambio en la seguridad vial	X	X	X		X	X
15	cambio en la dinámica poblacional	X	X	X		X	X
16	Incremento de las poblaciones de especies de fauna terrestre	X			X	X	X
17	Incremento de la cobertura vegetal	X			X	X	X
18	Cambio en el turismo	X	X			X	X
19	Incremento o disminución de la demanda de bienes y servicios	X	X			X	X
20	Cambios en la organización social de la comunidad	X			X	X	X
21	Incremento o disminución de la calidad de la salud	X		X		X	X
22	Modificación en las actividades económicas		X	X	X		X
23	Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna				X	X	X
24	Incremento o disminución de la diversidad de flora	X				X	X
25	Incremento o disminución de la muerte de individuos de fauna silvestre	X				X	X
26	disminución del volumen de agua	X				X	X
27	disminución de la calidad del paisaje	X				X	X
28	Cambios en las características físicas, hidrobiológicas y químicas de las aguas superficiales	X			X	X	
29	Incremento o disminución de la calidad de los servicios públicos	X				X	X
30	alteración de la fauna acuática		X			X	X
31	Cambio en los lazos de interrelación entre los ciudadanos y sus instituciones	X				X	X
32	Disminución del nivel freático	X				X	X

Crterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

N°	Impacto unificado	EIA 1	EIA 2	EIA 3	EIA 4	EIA 5	EIA 6
33	Cambios en la estructura territorial	X				X	X
34	Incremento o disminución de la actividad minera	X				X	X
35	Generación de expectativas institucionales	X				X	X
36	Incremento de la diversidad de flora	X				X	X
37	Relocalización involuntaria de unidades sociales residenciales	X				X	X
38	Incremento de la población permanente	X				X	X
39	Incremento del deterioro de la infraestructura privada	X				X	X
40	Incremento de la calidad de vida	X				X	X
41	Incremento del nivel freático	X				X	X
42	disminución del deterioro de la infraestructura privada	X				X	X
43	Incremento de la calidad del paisaje	X				X	X
44	Incremento o disminución de la calidad de vida	X				X	X
45	disminución de las áreas destinadas a la explotación de recursos naturales	X				X	X
46	Incremento del volumen de agua	X				X	X
47	Incremento de la calidad de la salud	X				X	X
48	Incremento de la calidad de los servicios públicos	X				X	X
49	cambio de los volúmenes de un cuerpo de agua superficial		X	X			
50	Cambios en las características físicas, microbiológicas y químicas de las aguas superficiales		X				X
51	Perturbación en la cuenca	X			X		
52	Incremento de la concentración de contaminantes criterio	X			X		
53	Cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna		X	X			
54	alteración de la geofoma del terreno		X		X		
55	Cambio en la gestión de la administración municipal		X		X		
56	Incremento o Disminución del nivel freático		X		X		
57	Cambio en las condiciones de cobertura, calidad y/o disponibilidad de los servicios públicos				X		X
58	Incremento o disminución del deterioro de la infraestructura privada y espacio público		X		X		
59	disminución de las poblaciones de especies de fauna terrestre	X	X				
60	Generación de conflictos entre actores (públicos y privados)		X		X		
61	Incremento o disminución de la cobertura vegetal	X					
62	Incremento o disminución de las unidades paisajísticas		X				
63	erosión del suelo			X			
64	Cambios en las características físicas las aguas superficiales			X			

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

N°	Impacto unificado	EIA 1	EIA 2	EIA 3	EIA 4	EIA 5	EIA 6
65	Cambio en la fisionomía del paisaje			X			
66	alteración en la calidad del agua					X	
67	Incremento o disminución de la densidad poblacional			X			
68	generación de residuos sólidos		X				
69	Incremento o disminución del deterioro de la infraestructura privada		X				
70	cambio en la estructura demográfica		X				
71	Incremento o disminución de la abundancia de las especies de flora			X			
72	Incremento o disminución de los impuestos				X		
73	Incremento o disminución de las poblaciones de especies acuáticas	X					
74	alteración del paisaje				X		
75	Incremento o disminución de ecosistemas				X		
76	Incremento o disminución del riesgo de lesiones				X		
77	disminución en la población de peces				X		
78	perdida de uno o más horizontes del suelo				X		
79	cambio en la dinámica hidrogeomorfológica del sistema fluvial				X		
80	alteración en la fauna y flora			X			

Fuente: Elaboración propia

Con el resultado anterior se muestra a continuación (**Figura 5-4**) los impactos más nombrados en la literatura y en los casos de estudio-EIA.

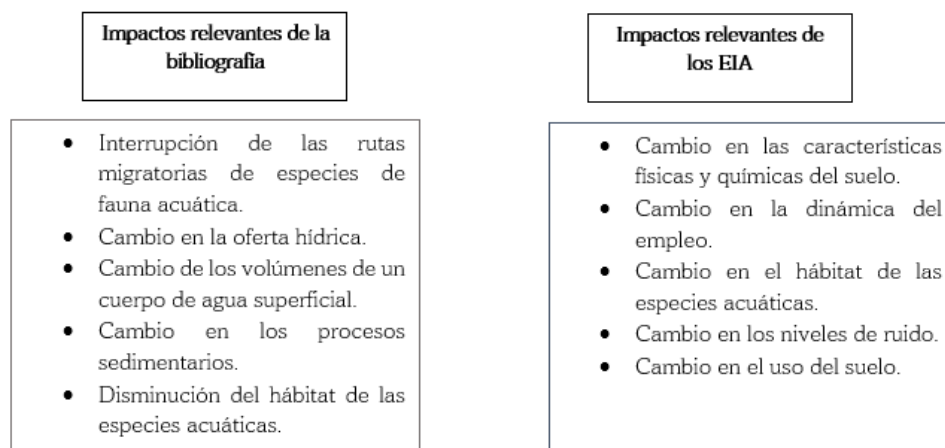


Figura 5-4. Impactos relevantes identificados en la literatura y en los seis casos de estudio. Fuente: Elaboración propia

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

En este contexto, se procedió a determinar si cada uno de los 80 impactos identificados (*Tabla 5-3*) estaba asociado a un Servicio Ecosistémico (SE) o no. De los cuales el EIA2 no estableció ninguna asociación o relación entre los impactos identificados y algún SE, a diferencia de los otros cinco casos de estudio, que sí llevaron a cabo esta asociación.

Ahora entrado en detalles del SE, se observa en la *Figura 5-5* que la mayoría de los casos de estudio -EIA clasifican el servicio de regulación y soporte como uno sólo, únicamente dos de los seis EIA utilizan la clasificación de regulación y soporte por separado, sin embargo, el EIA 4 asocia los impactos a SE de aprovechamiento y regulación dejando por fuera el resto de SE.

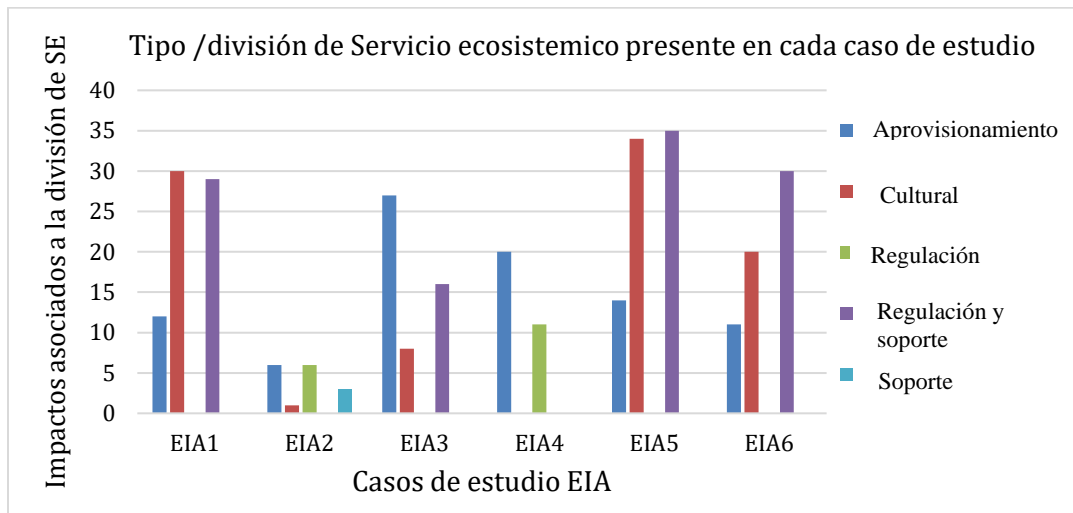


Figura 5-5. Tipo /división de Servicio ecosistémico presente en cada caso de estudio. fuente: Elaboración propia.

5.3 Aplicación de la matriz CICES

Este paso resultó esencial, ya que la literatura revisada no detallaba la afectación específica de los tipos de SE por parte de los proyectos de PCH. De los 24 artículos seleccionados, solo dos mencionaron los SE, aunque lo hicieron de manera general sin proporcionar detalles adicionales.

A) Priorización/selección del SE más representativo de la revisión bibliográfica

Después de identificar las actividades e impactos previamente mencionados, se llevó a cabo una asociación con los tipos de Servicios Ecosistémicos (SE) mediante la clasificación CICES. Los resultados, presentados en la *Figura 5-6*, muestran la asociación de los SE de cada categoría de división (Provisión, Regulación y Mantenimiento, y Culturales) (Haines-Young & Potschin, 2010).

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

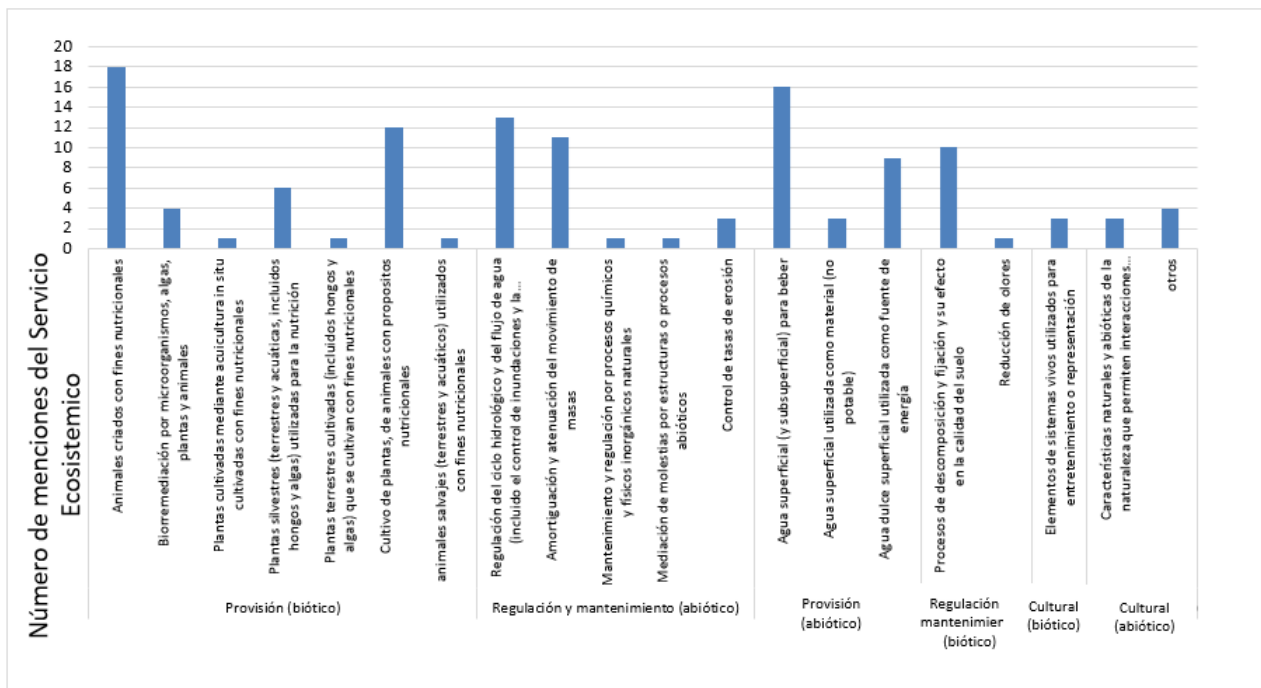


Figura 5-6. Asociación de Servicios Ecosistémicos afectados por las actividades de las PCH. En la figura se indican las distintas clases de SE, en las cuales se indica el beneficio que está asociado a cada SE. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados, presentados en la *Figura 5-6*, muestran la asociación de los SE de cada categoría de división (Provisión, Regulación y Mantenimiento, y Culturales) (Haines-Young & Potschin, 2010). Estas categorías, a su vez, se subdividen entre abióticas y bióticas con el fin de especificar el SE afectado. Se observa que el SE más vinculado a la literatura pertenece a la división de provisión biótica, destacando el SE de animales criados con fines nutricionales, el cual fue mencionado en 18 de los 24 artículos revisados. Las actividades que más afectan a este SE se detallan en la *Figura 5-7*, al igual que para el segundo SE más asociado en los artículos que corresponde al agua superficial (y subsuperficial) para beber, presentadas en las *Figura 5-8*.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

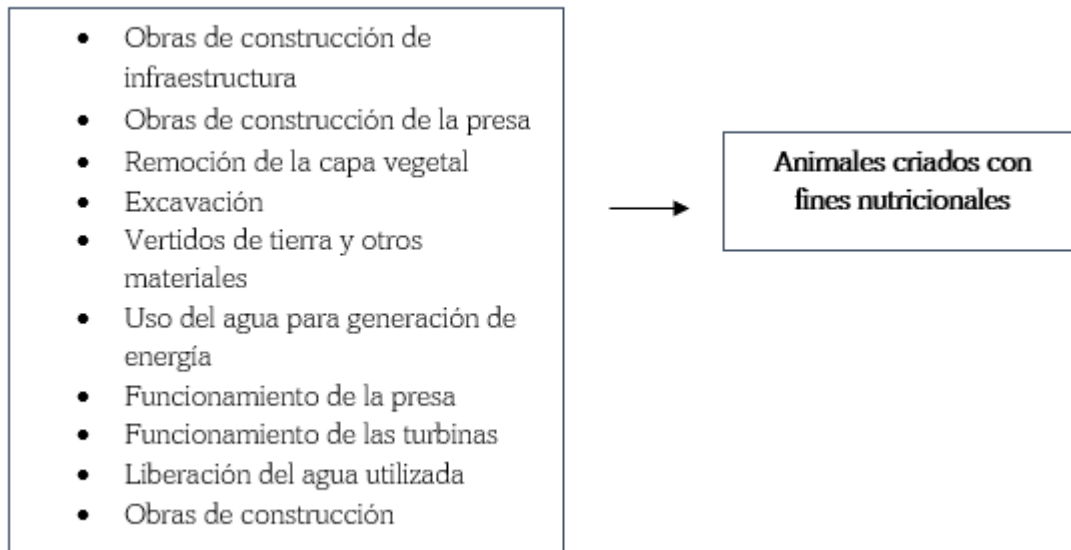


Figura 5-7. Actividades que causan el impacto al SE: animales criados con fines nutricionales. Fuente: Elaboración propia.

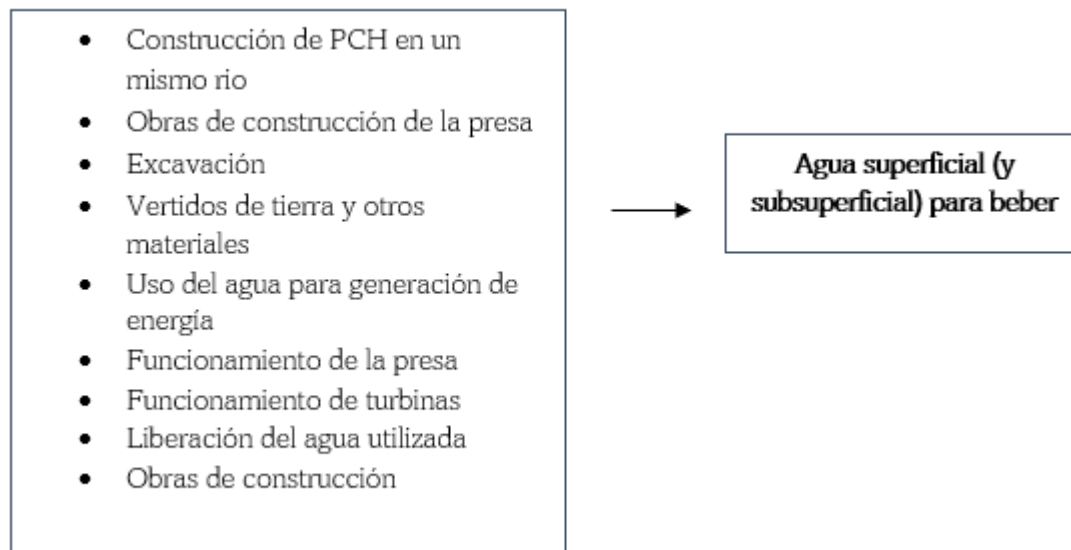


Figura 5-8. Actividades que causan el impacto al SE: agua superficial (y subsuperficial) para beber. Fuente: Elaboración propia.

B) Priorización/selección del SE más representativo los EISA

Continuando con la clasificación CICES se procedió a realizar la asociación entre la clase, la acción realizada por la PCH y el impacto, de esta manera observar cual SE se ve afectado. Analizando los resultados en la **Tabla 5-4** se obtienen SE como: Agua superficial (y

Crterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

subsuperficial) para beber y control de tasas de erosión se asociaron a casi todos los EIA revisados, indicando que estos dos son los más impactados por las actividades de PCH.

Tabla 5-4. Servicios ecosistémicos asociados a cada Casos de estudio

N°	SE con CICES	EIA1	EIA2	EIA3	EIA4	EIA5	EIA6
1	Agua superficial (y subsuperficial) para beber	X		X	X	X	X
2	Control de tasas de erosión	X		X	X	X	X
3	animales criados con fines nutricionales	X		X	X	X	
4	Características naturales y abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y vivenciales activas o pasivas	X		X		X	X
5	Regulación del ciclo hidrológico y del flujo de agua (incluido el control de inundaciones y la protección costera)	X			X	X	X
6	Cultivo de plantas, de animales con propósitos nutricionales	X			X	X	X
7	Fibras y otros materiales de plantas silvestres para uso directo o procesamiento (excluidos los materiales genéticos)	X		X		X	X
8	Regulación de la temperatura y la humedad, incluyendo la ventilación y la transpiración	X			X	X	X
9	Amortiguación y atenuación del movimiento de masas	X				X	X
10	Características naturales y abióticas de la naturaleza que permiten interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo	X				X	X
11	Dispersión de semillas			X		X	X
12	Mantenimiento y regulación por procesos químicos y físicos inorgánicos naturales	X				X	X
13	Plantas cultivadas mediante acuicultura in situ cultivadas con fines nutricionales	X				X	X
14	Procesos de descomposición y fijación y su efecto en la calidad del suelo	X				X	X
15	Regulación de la composición química de la atmósfera y los océanos				X		
16	Sustancias minerales utilizadas para fines materiales	X					

De la Figura 5-6 y la Tabla 5-4 se obtienen los cinco SE más relevantes de la bibliografía y los casos de estudio respectivamente, los cuales por medio de la *Figura 5-9* se les realizó una comparación y se les aplicó la priorización de las opciones mencionada en los métodos, para este caso se aplicó la opción i) Se priorizaron aquellos SE que fueron mencionados tanto en la bibliografía revisada como en los casos de estudio. De los cinco SE relevantes se seleccionó únicamente un SE al cual se le realizó la comparación de áreas de la siguiente etapa.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

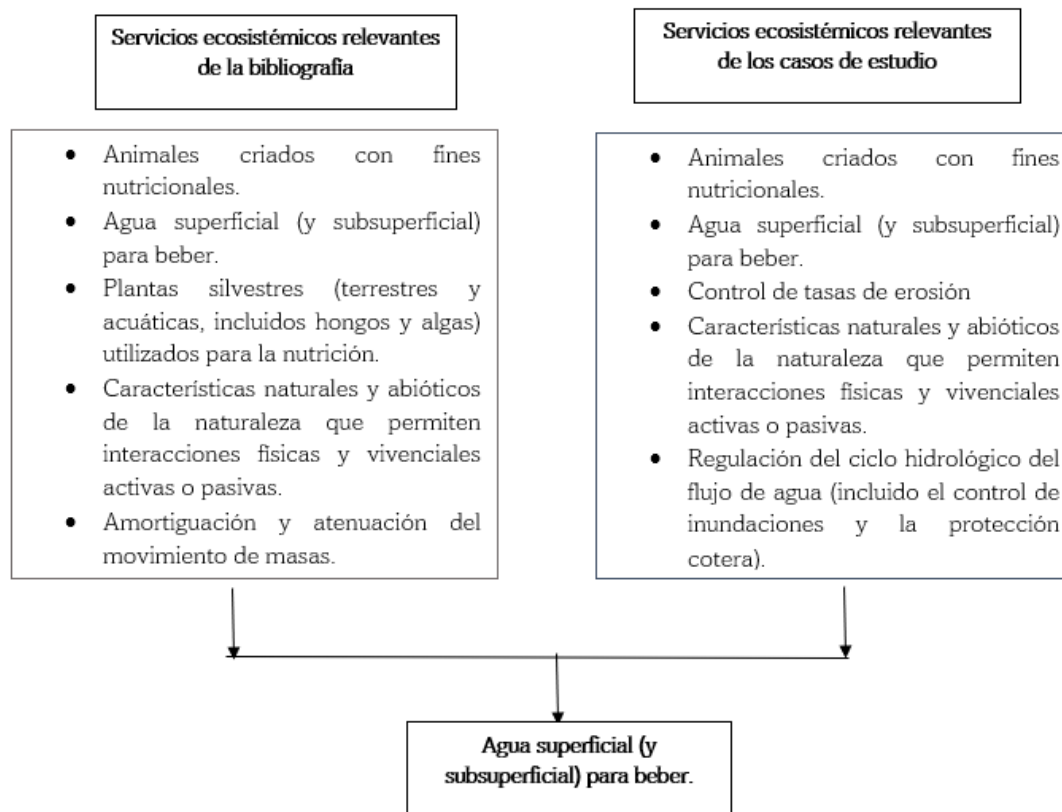


Figura 5-9. Selección de los servicios ecosistémicos más importantes encontrados en la literatura y en los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

C) Identificación de los criterios usados por los EIsA para el SE seleccionado

Una vez seleccionado el SE a analizar se le examinaron los criterios de propagación espacial dentro de cada caso de estudio, es decir, se evaluó el Área de Propagación de Servicios Ecosistémicos (APSE). En el ámbito de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), el enfoque descriptivo y cualitativo es el más comúnmente utilizado. Se observó que ninguno de los EIA incluye el APSE. Aunque ningún EIA incorpora el APSE, algunos identifican ciertos criterios relacionados con la propagación espacial (Figura 5-10). Por ejemplo, cuatro casos de estudio señalan la zona de provisión, se aclara que esta zona de provisión la identifican dentro del AIP y en la mayoría de los casos se refieren a la misma zona de captura, mientras que tres identifican la zona de captura, ningún caso de estudio identifica la zona de flujo, al igual que

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

los beneficiarios directos ni los indirectos. Sin embargo, además, se evidenció que algunos de estos criterios identificados no se aplicaron a todos los SE.

	Zona de provisión	Zona de captura	Zona de flujo	Beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos
EIA1	✓	✓	⊗	⊗	⊗
EIA2	✓	⊗	⊗	⊗	⊗
EIA3	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
EIA4	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
EIA5	✓	✓	⊗	⊗	⊗
EIA6	✓	✓	⊗	⊗	⊗

Figura 5-10. Identificación de los criterios de propagación espacial en los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Articulación/comparación del AIP y las APSE de los casos de estudio

La comparación que en esta fase se realizó a partir de las áreas resultó crucial, ya que la mayoría de los enfoques cartográficos presuponen de manera implícita que la provisión o captura y el valor de los SE son homogéneos en diversas áreas de estudio (Lattera et al., 2017).

Las posibles opciones que podría arrojar esta comparación los resultados revelaron la opción i) AIP y no APSE. Ninguno de los casos de estudio revisados posee un APSE o área específica para la identificación de los SE. La mayoría de ellos utiliza la misma AIP o el Área de Influencia Social, como se explica a continuación para el SE seleccionado, agua potable para beber.

5.4.1 Análisis del AIP para el SE

5.4.1.1 EsIA 1. Ubicado en el Río Cocorná

En este caso de estudio, para el servicio de agua potable para beber consideraron el área de influencia social de unidades territoriales menores. Elaboraron un mapa que identifica los puntos de captación del agua y las fuentes de abastecimiento. Sin embargo, no se evidenció información detallada sobre la ubicación de los usuarios.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

5.4.1.2 *EIA 2. Ubicado en el Río Cocorná*

El área de influencia considerada por este caso de estudio fue el área de influencia del proyecto. En relación con el servicio de agua potable para beber, elaboraron un mapa donde dicen que detalla los diversos usos del agua, sin embargo, cuando se entra a analizar esta información únicamente se encuentra el mapa del suministro de agua destinada al consumo humano, abarcando la captación y el vertimiento, dejando fuera el resto de los usos del agua del cual hacen mención.

5.4.1.3 *EIA 3. Ubicado en el Río Churimo*

El área de influencia considerada por este caso de estudio fue el área de influencia del proyecto. La información utilizada para esta identificación fue primaria, proveniente de la caracterización del área de influencia, en cuanto a los usuarios únicamente se tomaron en cuenta aquellos predios atravesados por alguna obra constructiva del proyecto.

5.4.1.4 *EIA 4. Ubicado en el Río San Andrés*

El área de influencia considerada por este caso de estudio fue el área de influencia del proyecto, sin contar con mapas explícitos de los Servicios Ecosistémicos.

5.4.1.5 *EIA5. Ubicado en el Río Chico*

El alcance espacial lo definieron a través de los límites político-administrativos a nivel de unidades territoriales menores, específicamente las veredas donde se ejecutan las obras del proyecto. En relación con el servicio de agua potable para beber, identificaron tanto usuarios legalizados como no legalizados que hacen uso del SE, aunque su ubicación no se refleja en el mapa correspondiente al SE.

5.4.1.6 *EIA6. Ubicado en la quebrada La Trapichera*

El área de influencia considerada por este caso de estudio fue el área de influencia del proyecto. En cuanto al servicio de agua potable para beber, identificaron usuarios legalizados y no legalizados que utilizan el SE; sin embargo, no se refleja su ubicación en el mapa correspondiente al SE.

A continuación, se presenta el área resultante del Servicio Ecosistémico (SE) de agua potable para beber, mediante el protocolo ECOSER, junto con una comparación del área de influencia del proyecto (AIP) correspondiente a cada Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

5.4.2 APSE del SE seleccionado para cada caso de estudio con ECOSER

Siguiendo el tutorial del protocolo (Latterra et al., 2018), que se presenta en la metodología de este trabajo, se determinó lo siguiente.

Las áreas para identificar el SE de agua potable para beber (APSE), se delimitaron teniendo en cuenta la ubicación de cada Proyecto de PCH. Se delimitó una cuenca a hasta el punto de descarga de la PCH, ya que la zona de provisión del SE no se limita exclusivamente al Área de Influencia Propuesta (AIP) por los EIA (ANLA, 2018), que se distingue por el color negro (ver desde la **Figura 5-11** hasta la **Figura 5-16**), ya que esta área se limita a los alrededores del proyecto sin tomar en cuenta que la cuenca o río tiene su origen aguas arriba de la PCH y abarca las coberturas circundantes.

La distribución de los 6 casos de estudio consiste en 5 cuencas, dado que los EIA 1 y 2 están ubicados en la misma cuenca. Cada cuenca de estudio cuenta con una cantidad distinta de estaciones de monitoreo, así como con diferentes periodos de información. Estos datos se detallan en la tabla siguiente (**Tabla 5-5**).

Tabla 5-5. información de la precipitación de cada cuenca de estudio

Cuenca/caso de estudio	Código de la estación	Valor de referencia para cumplir día de tormenta (mm)	Valor promedio de los días de tormenta (mm)	Cumple con las condiciones para evento de tormenta	Años de información de las estaciones	Días de tormenta
CUENCA 1. EIA1 Y 2	23080650	23	44,72±0.20	SI	30	1527
	26185020	27,2	44,66±0.28	SI		
	23085140	43	44,79±0.46	SI		
	26180170	18,2	44,72±1.20	SI		
	23080750	36	44,68±1.56	SI		
	23080920	22	44,71±0.78	SI		
CUENCA 2. EIA 3	23085110	21,2	36,05±0.89	SI	28	698
	23080810	27	46,89±1.21	SI		
	23085160	23,3	38,73±0.96	SI		
	23085210	32,8	54,17±1.13	SI		
CUENCA 3. EIA 4	26230220	19	29,85±0.68	SI	28	117
	26230200	31	5,90±1.56	NO		
	26230140	17	23,41±1.66	SI		
	27020210	18	5,90±1.78	NO		
	26230240	22	56,42±0.99	SI		
	26230190	24	5,90±1.09	NO		
	26230160	48	5,90±1.13	NO		
	26230130	19	29,68±2.1	SI		

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Cuenca/caso de estudio	Código de la estación	Valor de referencia para cumplir día de tormenta (mm)	Valor promedio de los días de tormenta (mm)	Cumple con las condiciones para evento de tormenta	Años de información de las estaciones	Días de tormenta
	26230110	18	31,44±2.1	SI		
CUENCA 4. EIA 5	27010820	18	35,25±1.56	SI	27	237
	27010800	15	26,68±1.17	SI		
	26230180	17	32,78±0.98	SI		
	27010830	14	28,22±1.12	SI		
	27010870	18	31,60±1.92	SI		
	26230140	17	5,21±0.65	NO		
	27015150	16	30,48±078	SI		
CUENCA 5. EIA 6	27010840	30	49,56±1.21	SI	24	688
	27010900	30	48,75±0.21	SI		
	227011230	20	41,43±0.45	SI		
	27010880	19	8,41±2.12	NO		
	27010850	26	8,41±2.8	NO		

Fuente: Tomado del IDEAM, 2022

Se interpretan los resultados de la ANOVA que arrojó el R, considerando el valor p para determinar si existen diferencias significativas entre los grupos. Se obtuvo para todos los conjuntos un valor $P > 0.05$, lo que sugiere diferencias significativas para los días de tormenta dentro de cada una de las cuencas de los casos de estudio en todos los años de análisis; la falta de homogeneidad en todos los grupos; se debe a la dispersión de datos a través de los años de recolección de datos. Los resultados de la desviación estándar se pueden verificar dentro de la *Tabla 5-5*, para cada uno de los datos en relación.

Después de ingresar la información obtenida y seguir el procedimiento de la herramienta, se determinó finalmente el área del SE del agua potable para beber, considerada como la APSE, la cual se muestra a continuación.

5.4.3 Comparación de áreas AIP y APSE

El AIP se encuentra delineado por color negro mientras que el APSE se encuentra en la escala de colores azul como se observa en las siguientes figuras

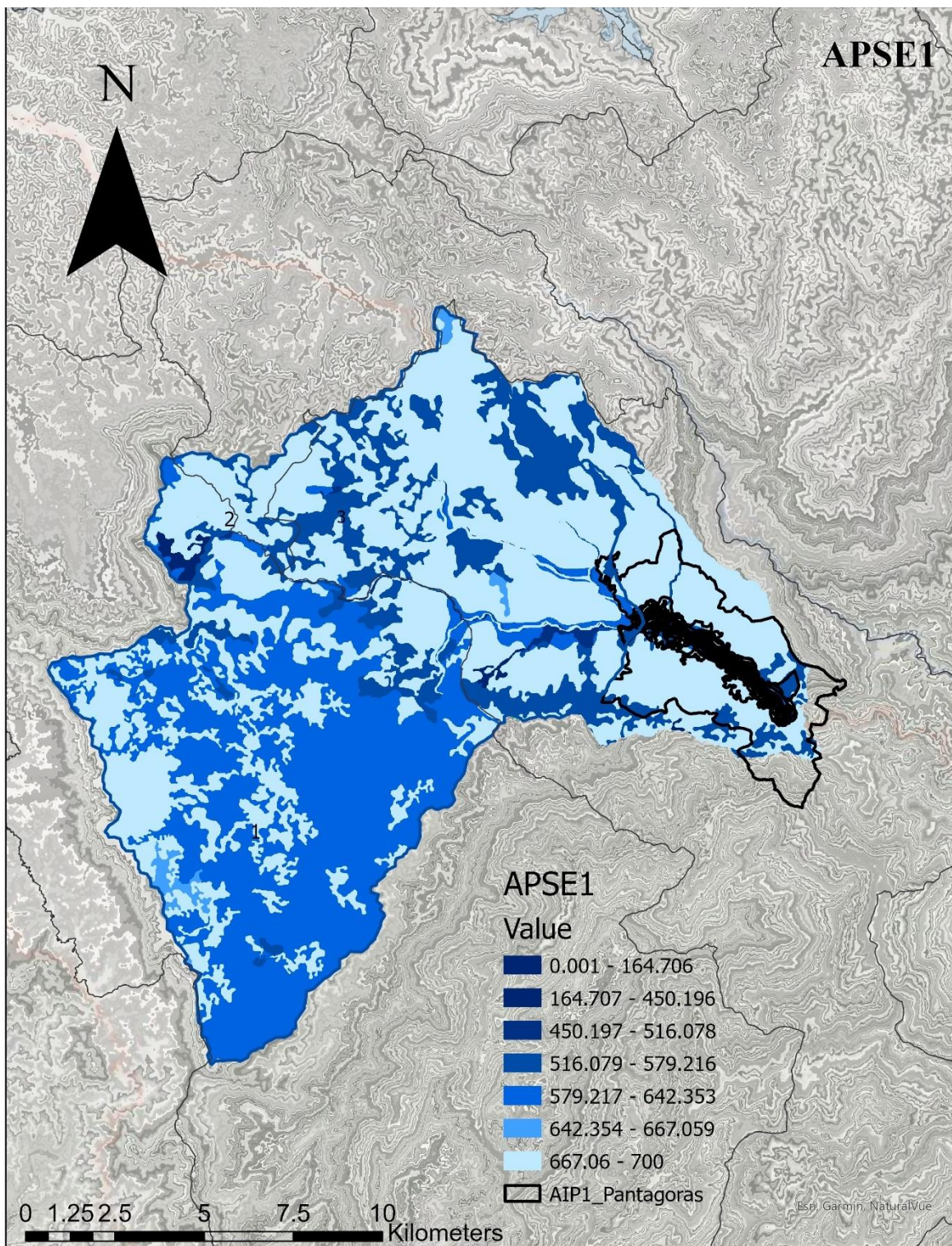


Figura 5-11. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 1. Mapas cartográficos, donde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 1 (Pantagoras). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

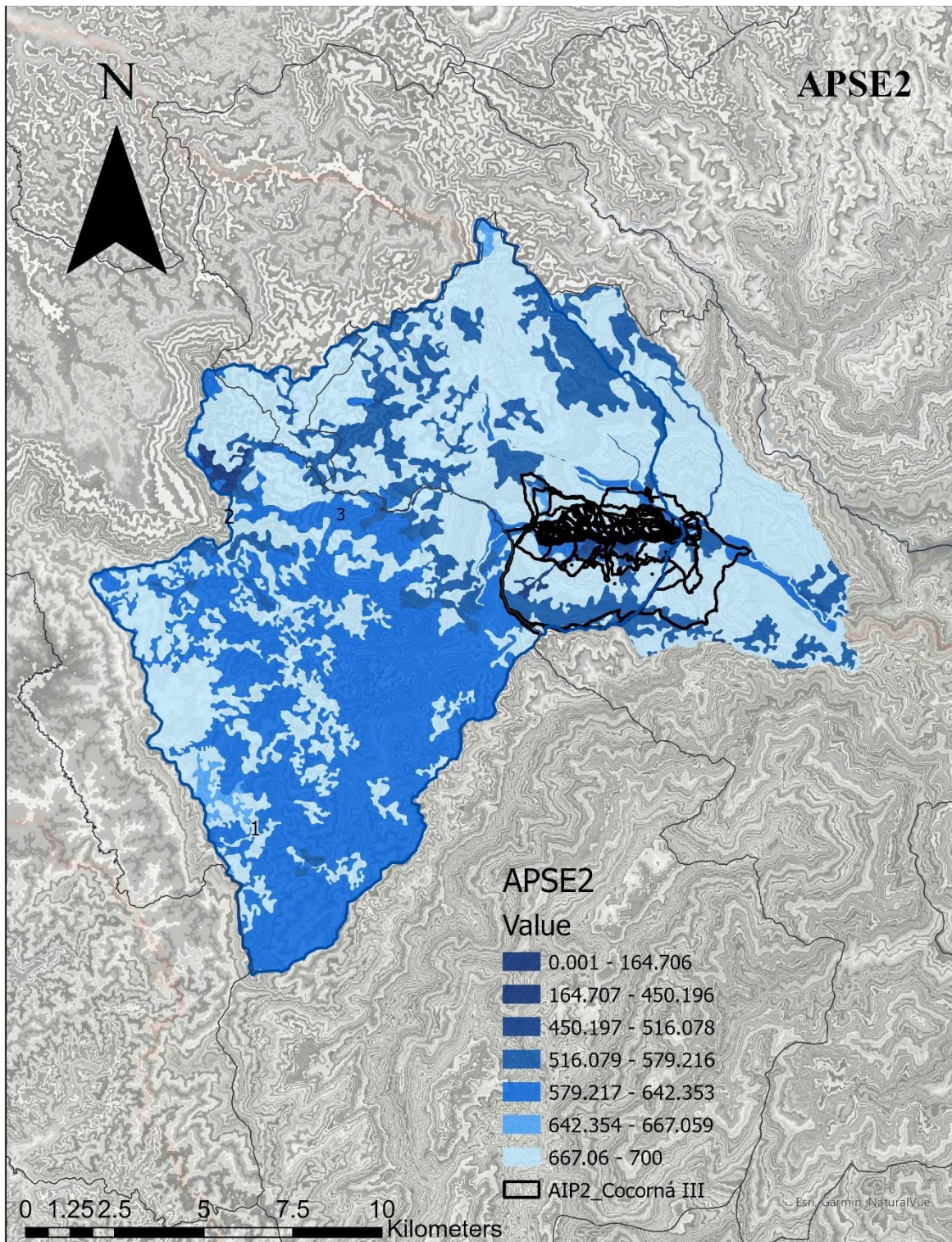


Figura 5-12. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 2. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 2 (Cocorná III). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

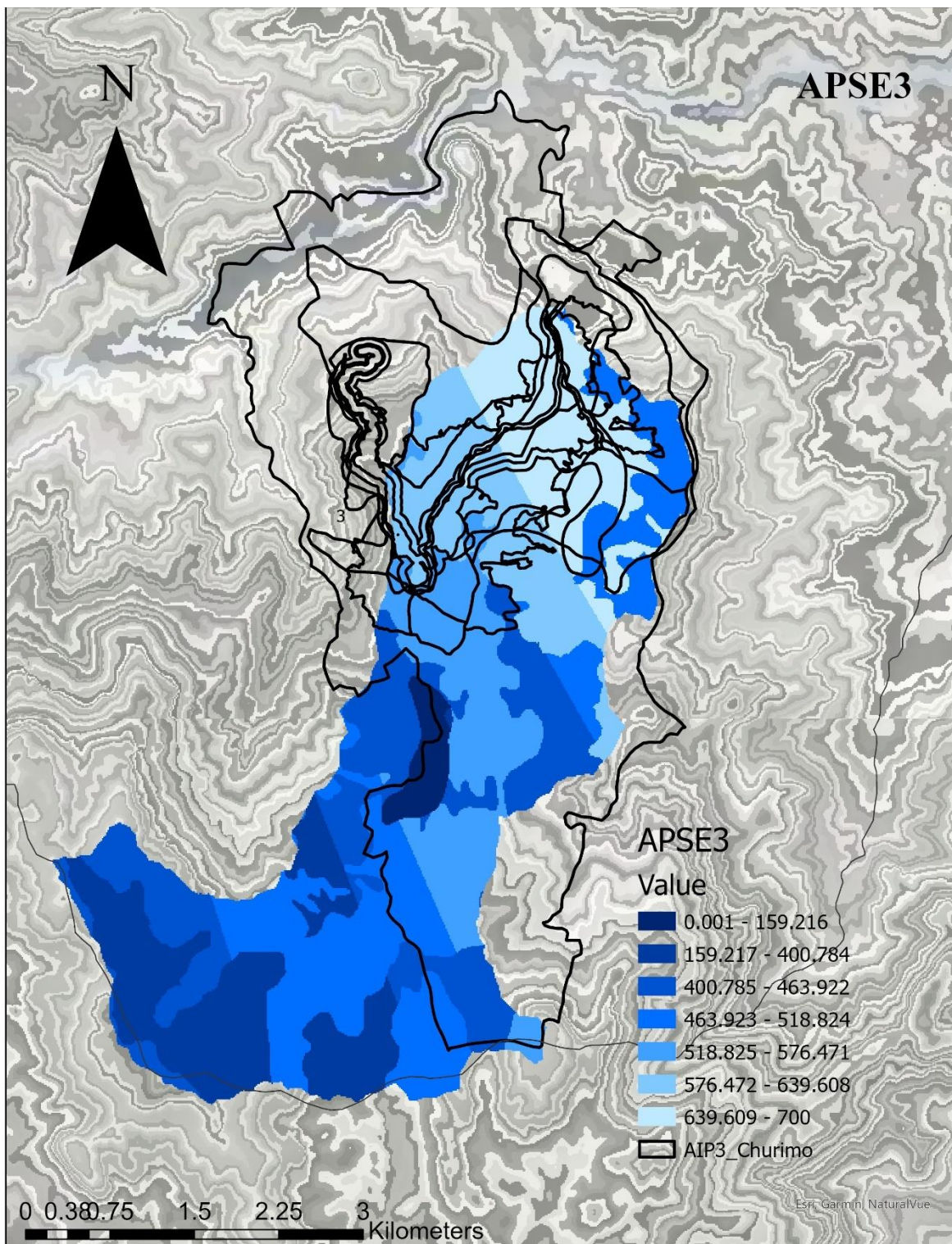


Figura 5-13. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 3. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 3 (Churimo). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

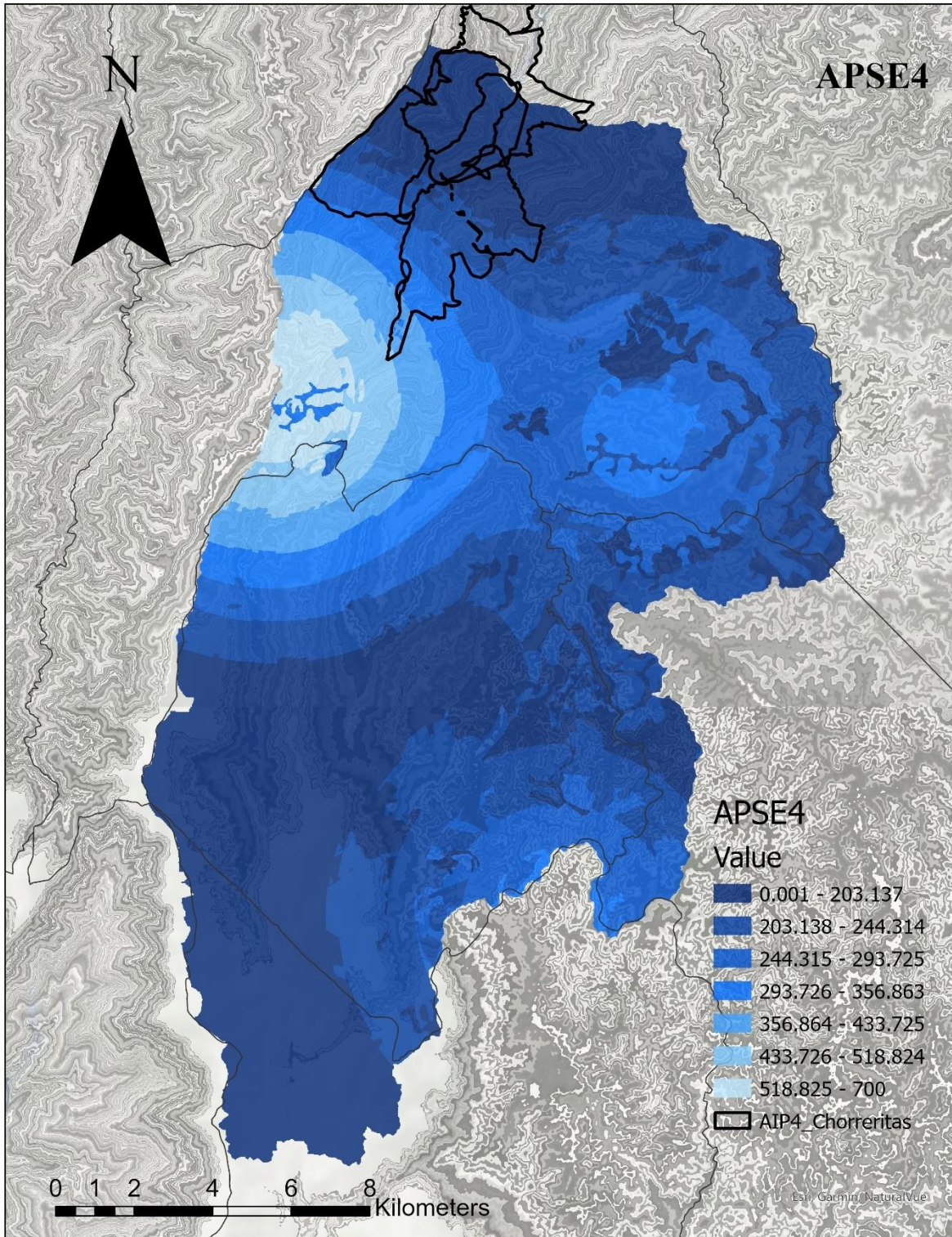


Figura 5-14. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 4. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 4 (Chorreritas). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

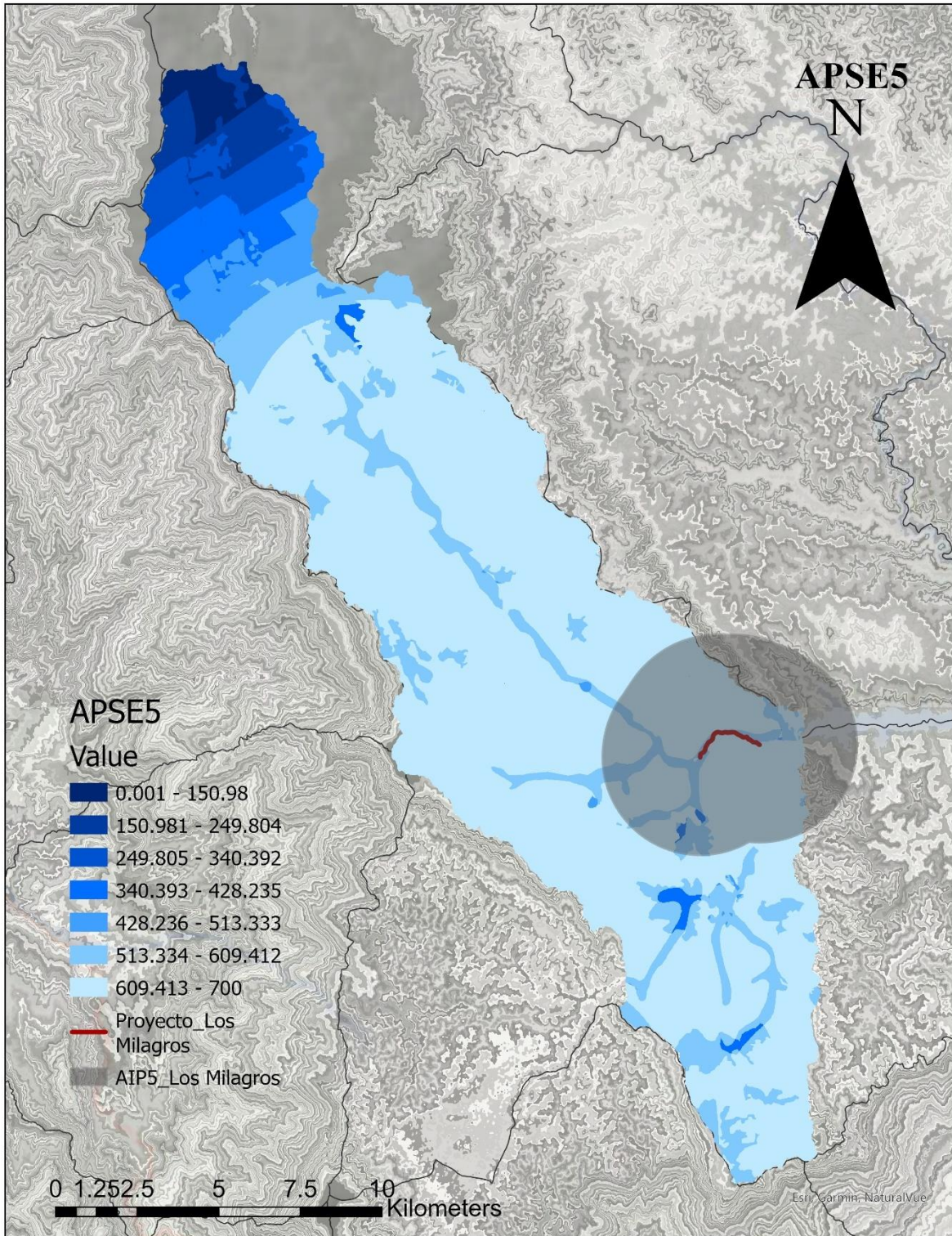


Figura 5-15. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 5. Mapas cartográficos, donde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 5 (Los Milagros). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

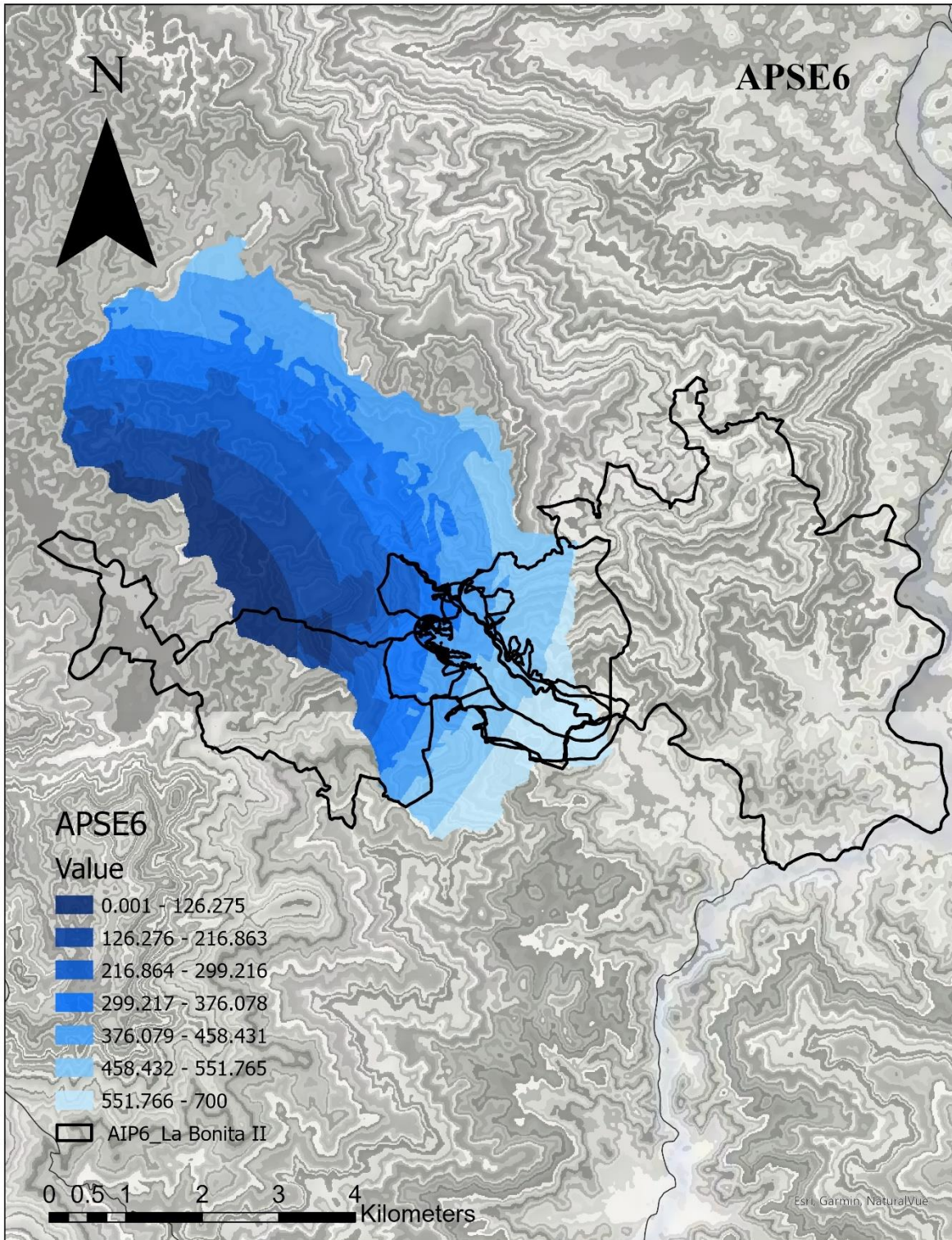


Figura 5-16. Comparación de áreas, APSE con AIP del caso de estudio 6. Mapas cartográficos, dónde se evidencia la comparación de áreas, APSE vs AIP, para el caso de estudio 6 (La Bonita). El raster que delimita el APSE fue obtenido bajo el protocolo ECOSER y geoprocesado dentro del software de ArcGIS pro, para el servicio ecosistémico de agua potable para beber. Fuente: Elaboración propia.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

El resultado de las áreas del APSE, se clasificaron en 7 subclases, que se diferencia en una escala colorimétrica; desde el azul más oscuro (mayor disponibilidad de agua para beber), hasta el más claro (menor disponibilidad del SE). En cada uno de los 6 mapas (*Figuras 5-11 hasta la 5-16*); se logró percibir las distintas APSE, en confrontación con el área de influencia de cada proyecto.

Para el cálculo del beneficio se utilizó el SE obtenido en la **Tabla 5-5** normalizado de 0- 100 (esri ArcGis, 2023) y la base de datos de los usuarios de los municipios a los cuales pertenece cada cuenca, abarcando en lo posible la totalidad de los usuarios de la cuenca.

Para calcular el beneficio, se empleó el SE de las *Figura 5-11, Figura 5-12, Figura 5-13, Figura 5-14, Figura 5-15 y Figura 5-16* previamente revitalizado en una escala de 0-100 (Esri ArcGIS, 2023). Al mismo tiempo, se utilizó la base de datos de los usuarios correspondientes a los municipios donde se ubica la cuenca, los cuales son los mostrados en la *Tabla 5-6*, estos datos fueron proporcionados por las autoridades ambientales. Para el caso de Cornare otorgó la información de los municipios mediante correo electrónico para las cuencas 1, 2 y 3, mientras que la información de Corantioquia se obtuvo mediante la plataforma publica con registro previo el Sirena para las cuencas 4, 5 y 6. Además, en uno de los campos de información requeridos para el cálculo, se solicita el número exacto de beneficiarios de cada punto.

Tabla 5-6. Usuarios del agua pertenecientes a la cuenca para cada APSE

Cuenca del SE de agua potable para beber (APSE)	Usuarios del agua de los municipios solicitados
APSE 1 para el caso de estudio 1 y 2	Cocorná, Grana y el Carmen del Viboral
APSE 2 para el caso de estudio 3	San Rafael
APSE 3 para el caso de estudio 4	San Andrés De Cuerquia, Belmira, Santa Rosa De Osos y San José de la Montaña
APSE 4 para el caso de estudio 5	San Pedro De Los Milagros, Belmira Y Sopetrán
APSE 5 para el caso de estudio 6	Gómez Plata

Fuente: Elaboración propia.

Los mapas de beneficio no pudieron ser analizados adecuadamente debido a la información incompleta sobre la totalidad de los usuarios del agua. En algunos mapas, la cantidad de datos de usuarios y beneficiarios por cada punto no era suficiente para el software de ECOSER. Además, estos mapas no proporcionaron información que permitiera obtener un resultado representativo. En contraste, los mapas del APSE ofrecieron una visión más completa y confiable.

Para las **Figura 5-11 y Figura 5-12** el indicador de la **Tabla 5-7**. Indicadores de los casos de estudio 1 y2, muestra un valor menor a cero, lo que confirma que el AIP no captura adecuadamente la APSE.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Tabla 5-7. Indicadores de los casos de estudio 1 y 2

Caso de estudio 1	Caso de estudio 2
$\frac{3805 - 21002(\text{teórica})}{21002(\text{teórica})} = -0,819 \text{ ha}$	$\frac{4673 - 21002(\text{teórica})}{21002(\text{teórica})} = -0,777 \text{ ha}$

Mientras que el indicador para la **Figura 5-13** es un resultado de un valor positivo, lo que sugiere que el AIP puede incorporar el APSE. Aunque el indicador es positivo, no significa que el AIP realmente incorpore el APSE de manera efectiva.

$$\frac{1978 - 1726(\text{teórica})}{1726(\text{teórica})} = 0,146 \text{ ha}$$

Por otro lado, los indicadores para las **Figura 5-14**, **Figura 5-15** y **Figura 5-16** dieron todos negativos indicando que el AIP no captura el APSE (**Tabla 5-8**).

Tabla 5-8. Indicadores de los casos de estudio 4, 5 y 6

Caso de estudio 4	Caso de estudio 5	Caso de estudio 6
$\frac{8900 - 29757(\text{teórica})}{29757(\text{teórica})} = -0,701 \text{ ha}$	$\frac{3 - 24586(\text{teórica})}{24586(\text{teórica})} = -1,000 \text{ ha}$	$\frac{8860 - 21002(\text{teórica})}{21002(\text{teórica})} = -0,578 \text{ ha}$

6 Generación de lineamientos

En el contexto del EsIA, los lineamientos son cruciales para asegurar una evaluación integral y precisa de los SE. Estos lineamientos guían el proceso de evaluación y garantizan que se aborden todos los aspectos relevantes, desde la identificación hasta la gestión de impactos (ver *Figura 6-1*).

La identificación del Área de Propagación del Servicio Ecosistémico (APSE) es fundamental para delimitar las áreas donde los SE se producen y se consumen. Esta delimitación permite una comprensión más completa de la distribución espacial de los SE y asegura que se incluyan todas las áreas relevantes en la evaluación. Evitar la exclusión de beneficiarios potenciales fuera del área de influencia del proyecto, así como asegurar que se consideren tanto los usuarios directos como los indirectos en la evaluación, es esencial para una evaluación justa y exhaustiva, proporcionando una visión integral del impacto del proyecto sobre la comunidad.

Entender el tipo de propagación y el flujo de los SE es vital para evaluar cómo estos servicios se distribuyen y se mueven en el espacio. Este conocimiento es crucial para comprender las interacciones entre diferentes componentes del ecosistema y cómo los proyectos de desarrollo pueden afectar estas dinámicas.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

El desarrollo de un mapa que visualice la distribución y el beneficio de los SE es una herramienta poderosa para comunicar los resultados de la evaluación. Este mapa facilita la comprensión de cómo los SE se distribuyen espacialmente y quiénes son los beneficiarios, apoyando la toma de decisiones informadas. Existen diversas herramientas para mapear los SE y, como se observó en este caso, ECOSER puede ser una opción efectiva, siempre y cuando se disponga de la información completa.

La validación de los datos utilizados en la evaluación es crucial para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados. Este proceso incluye la revisión y corroboración de la información recogida, garantizando que las conclusiones del EsIA sean sólidas y basadas en datos verificados.

Proveer capacitación para los profesionales involucrados en los EsIA sobre la integración de los SE y los criterios de propagación espacial es esencial. La formación adecuada asegura que todos los involucrados comprendan y apliquen correctamente los conceptos y metodologías, mejorando así la calidad y efectividad de la evaluación ambiental.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

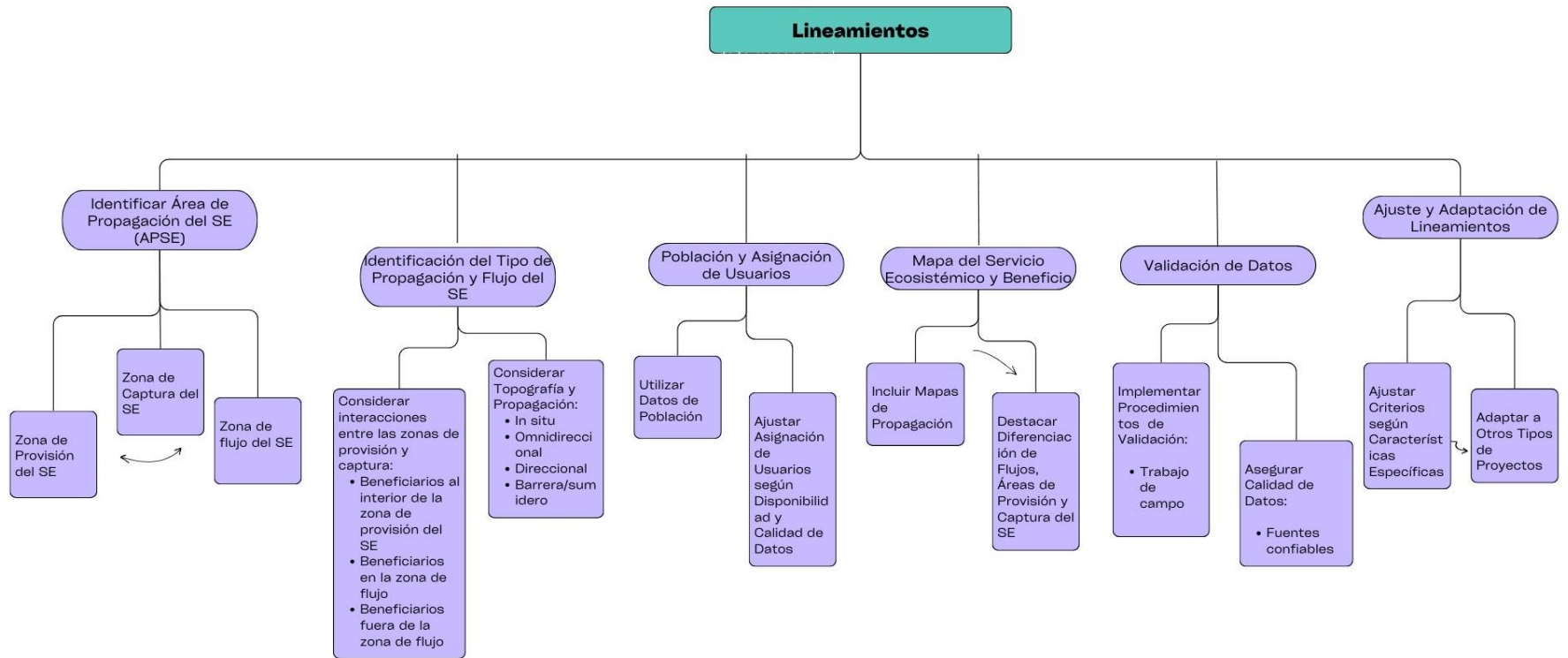


Figura 6-1. Flujograma complementario de los lineamientos propuesto a seguir. Fuente: Elaboración propia

7 Discusión

Se seleccionaron inicialmente 40 artículos indexados, de estos, se revisaron detalladamente 24, descartándose el resto al encontrarse que no abordaban específicamente las PCH. De los artículos revisados. En la Figura 5-1 se observa una cantidad de actividades que generan diferentes impactos, los cuales se identificaron un total de 169 impactos distintos (ver Figura 5-3, barra azul). No obstante, es importante señalar que esta cantidad aparentemente alta se debe a la variabilidad en la terminología empleada para describir un mismo impacto, incluso dentro de un mismo artículo. Esta diversidad o ambigüedad en la denominación de los impactos, común en los estudios de impacto ambiental, plantea desafíos tanto en la medición precisa como en la comparación de resultados entre diferentes investigaciones (Toro Calderón & Prada, 2015).

La utilización del listado de Impactos Ambientales Específicos proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente (Min Ambiente, 2021) se evidenció como una estrategia eficaz para evitar ambigüedades en los nombres y errores en la contabilización de los impactos. Este enfoque implicó un proceso de estandarización, donde los impactos identificados con diferentes nombres pero que se referían al mismo impacto fueron consolidados bajo una única denominación (ver *Figura 5-2*). Esta medida permitió contar con precisión cada impacto, evitando errores en el recuento total. A través de este proceso de unificación y estandarización, se determinó que, de los 169 impactos inicialmente identificados, en realidad correspondían a 79 impactos distintos, según los nombres utilizados en los artículos (ver *Figura 5-3*, barra naranjada). El Anexo 1 presenta la lista completa (169) de los impactos identificados, así como su posterior estandarización basada en el listado de impactos proporcionado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). En el mismo anexo, se incluye la lista estandarizada de los 79 impactos diferentes y la cantidad de artículos que los mencionaron.

Este enfoque permitió la cuantificación de la frecuencia con que estos impactos se hicieron referencia en la literatura.

En la *Tabla 5-1* se organizó por orden de impactos más recurrentes a menos recurrentes mencionados, en donde se destacan: la interrupción de las rutas migratorias de especies de fauna acuática, atribuida a los cambios en el flujo ascendente y descendente que afectan aguas abajo a las especies de peces migratorios (Jimenez, 2022). Además, se señala que la corriente generada por el agua tras pasar por la turbina estimula el ingreso de peces potamódromos a los túneles de descarga, afectando el proceso de migración (Jiménez-Segura et al., 2018).

Otro impacto relevante es el cambio en la oferta hídrica, originado por actividades como la desviación de aguas, excavaciones, obras de construcción de infraestructura y liberación del agua utilizada (Walczak, 2018) (Popa et al., 2020) (McManamay et al., 2015). Asimismo, se

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

destaca el cambio en los procesos sedimentarios, influenciado por actividades como obras de desviación de aguas y construcción (Osorio, 2017) (Angarita et al., 2018). Por último, se aborda el cambio en los volúmenes de un cuerpo de agua superficial, asociado a prácticas como el funcionamiento de la presa, obras de construcción de la presa y el uso del agua para la generación de energía (Harlan, 2018) (Braun-Cruz et al., 2021).

La Tabla 5-3 revela los impactos más recurrentes asociados a proyectos similares en Antioquia. Se identifican 8 impactos que son mencionados en todos los casos de estudio, lo cual se atribuye a la coincidencia en zonas geográficas y contextos ambientales y sociales similares, aunque cada proyecto tenga sus particularidades.

Comenzando con el impacto del Deterioro o mejora de las condiciones de conservación del patrimonio arqueológico, es significativo dada la rica historia precolombina de Antioquia. La región ha sido objeto de numerosos estudios arqueológicos destinados a investigar y preservar su valioso patrimonio cultural. Este impacto se cataloga como no recuperable ni reversible (Pantagoras, 2021).

El impacto del Cambio en el hábitat de las especies acuáticas se relaciona con las actividades de crianza de especies de peces, que requieren recursos como el agua para su cría y abastecimiento. Dado que los peces desempeñan un papel crucial en la ecología al ser los principales animales estructuradores de los ecosistemas acuáticos y tener altos requerimientos de caudal, garantizar condiciones óptimas para satisfacer sus necesidades ecológicas puede favorecer la conservación de otras especies, como invertebrados y algas bentónicas (Ibarra, 2005). El cambio en el hábitat se ha manifestado mediante la reducción de la biomasa, cambios en la composición de especies y modificaciones en la estructura de la población. Además, la interrupción de la conectividad longitudinal, especialmente a partir del azud en el canal, se ve agravada por los flujos reducidos que pasan sobre el azud (Churimo, 2019).

En cuanto a los impactos relacionados con el suelo, se observan cambios en las características físicas y químicas del suelo, así como procesos erosivos y modificaciones en el uso del suelo debido a la realización de apiques y sondeos y demás procesos que implican el transporte de materias primas para la construcción de obras, así como el traslado de escombros materiales de construcción y material vegetal removido, lo que conlleva el flujo constante de vehículos y maquinaria pesada. En algunos proyectos, además, se requiere la construcción de nuevas vías para facilitar el acceso. Otro aspecto para considerar es la excavación y la instalación de tuberías de conducción, que incluye tanto la excavación manual como la mecánica (Churimo, 2019) (Pantagoras, 2021).

En cuanto al impacto de las expectativas generadas por el desarrollo de los proyectos, aunque moderadamente negativas, están estrechamente vinculadas a la aceptación de las

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

comunidades en el área de influencia respecto al proyecto. El empleo, un aspecto significativo, se relaciona con la contratación de personal según las políticas establecidas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el empleo demandado por el proyecto implica la utilización de recursos de mano de obra que podrían haberse destinado a otras actividades productivas anteriormente desarrolladas por la comunidad. Además, dado que muchos de los empleos generados son de naturaleza transitoria, particularmente durante la etapa de construcción, existe incertidumbre sobre la posibilidad de vinculación a otras actividades una vez que finalicen los contratos laborales (Los Milagros, 2019).

En la *Figura 5-4* se presenta una comparación de los cinco impactos más relevantes tanto en la literatura como en los casos de estudio. Se han seleccionado los primeros cinco impactos de ambos análisis para facilitar la comparación, dado que el impacto más relevante en la literatura no coincide necesariamente con el más relevante en los casos de estudio. Esta discrepancia se debe a la diversidad de ubicaciones de las PCH mencionadas en la literatura, mientras que los casos de estudio comparten una ubicación geográfica similar. Además, el impacto más relevante en la literatura se centra específicamente en la ruta de migración de los peces, mientras que en los casos de estudio el enfoque es más general, abarcando la fauna acuática en su totalidad (Jiménez-Segura et al., 2018). Esto indica que, si bien es un tema relevante a nivel mundial, es generalizado a nivel local.

De los SE presentados en la *Figura 5-6*, se ha seleccionado el SE más mencionado, lo que sugiere que la mayoría de la literatura coincide en que es el más afectados por las actividades de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) y los impactos que estas generan. Es "Agua superficial (y subsuperficial) para beber", pertenecen a las categorías de provisión abiótica. Esta elección se justifica porque las actividades que generan impacto sobre el servicio afecta directamente al suelo o al agua que proporcionan alimento y bebida, como se ilustra en la *Figura 5-7* y *Figura 5-8*.

Al aplicar esta misma clasificación CICES en los casos de estudio, se observan similitudes con la literatura. Se realizó un cuadro comparativo entre los SE más relevantes (*Figura 5-9*), preseleccionando los primeros cinco de cada grupo para una comparación adecuada, ya que no todos los SE más relevantes coinciden en ambos. A pesar de las discrepancias, tres SE coinciden en ambos conjuntos, mientras que los otros dos son completamente diferentes. Por ejemplo, en los casos de estudio, un SE relevante es el control de tasas de erosión, que no se menciona en la literatura. Esto se debe a la geografía montañosa de los proyectos en Antioquia, caracterizada por pendientes pronunciadas y alta intensidad de lluvias (Pantagoras, 2021), lo que aumenta la propensión a la erosión. Además de la descarga de aguas turbinadas que pueden activar procesos erosivos en el cuerpo de agua (Los Milagros, 2019).

Una vez identificados los impactos, tal como se muestra en la *Figura 5-5*, se procedió al análisis de los SE. La mayoría de los casos de estudio clasifican el servicio de regulación y soporte como uno solo, argumentando que en ocasiones es difícil diferenciar entre ambos servicios. Solo dos de los seis EIA utilizan la clasificación de regulación y soporte de manera

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

separada. Sin embargo, en el EIA 4 únicamente se hace referencia a los SE de aprovechamiento y regulación, omitiendo el resto de los SE. Esta omisión resulta significativa, ya que excluye otros SE que son importantes para el análisis y que están presentes en la zona, pero que no son considerados en el análisis realizado.

En la Figura 5-10 se concluye que los EIA respecto al análisis de los SE no se realizan de forma completa ni contemplan los criterios de propagación espacial, revelando un vacío en este análisis. Aunque los EIA identifican los beneficiarios, lo hacen únicamente dentro del AIP y, en algunos casos, cuantifican una estimación de beneficiarios indirectos, referidos a visitantes por turismo. Ningún EIA identificó la zona de flujo, ya que, al estar limitados por el AIP, no logran contemplar completamente dicho movimiento del SE. Profundizando en las zonas de provisión y captura, aunque todos los casos dicen identificar la zona de provisión, se limitan a la correspondiente al AIP, dejando fuera una parte del área.

EsIA 1: especifica que se separa la zona de provisión de la zona de captura, pero existe confusión en la representación espacial de estas áreas, ya que las combinan en un solo mapa como si se tratará de la misma área. Esta superposición podría generar discrepancias en la correcta identificación y evaluación de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua potable, destacando la necesidad de una delimitación más clara y precisa de estas zonas. Además, como se observa en la **Tabla 5-2. Ubicación y área de influencia -AIP de los casos de estudio** *Tabla 5-2* el proyecto delimita la cuenca hasta el punto de captación del agua, sin abarcarla por completo y aunque el proyecto delimita una cuenca no la incluye dentro de AIP, por lo tanto, se excluye la zona de provisión que pertenece a la cuenca a la que el proyecto pertenece.

EsIA 2: aunque no incluyeron ubicaciones de usuarios, se estimó el caudal demandado mediante la dotación neta por habitante y la cantidad de habitantes que requieren el servicio. Se llevó a cabo un análisis comparativo entre la oferta hídrica y la demanda, considerando tanto el caudal demandado por la comunidad como la oferta total sobre la demanda real hasta el año 2019. Además, como se muestra en la *Tabla 5-2*, el proyecto traza los límites de la cuenca solo hasta el punto de captación del agua, sin cubrirla en su totalidad. Aunque se delimite una cuenca, esta no se incluye dentro del AIP, por lo tanto, se excluye la zona de provisión que pertenece a la cuenca a la que el proyecto pertenece.

EsIA3: En relación con el servicio de agua para beber, no identificaron el SE en algún mapa u expresión espacial y además en cuanto a captación y vertimiento tuvieron en cuenta únicamente los del proyecto, dejando por fuera los usuarios. El análisis del EIA dice identificar cuatro unidades de vivienda que hacen uso doméstico del agua captada de vertientes hacia el río, donde las personas utilizan el agua para diversas actividades como cocinar, ducharse, uso sanitario y lavado de ropa, sin embargo, no fueron ubicadas espacialmente en el mapa. Además, como se muestra en la *Tabla 5-2* gran parte del AIP

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

incluye la cuenca delimitada por este, y la cuenca se extiende hasta el punto de descarga, por lo tanto, se excluye gran parte de la zona de provisión que pertenece a la cuenca a la que el proyecto pertenece.

EsIA4: En cuanto al servicio de agua potable para beber, se menciona en la existencia de un mapa de demanda de recursos, pero este se limita únicamente al agua, excluyendo los demás recursos de los cuales hacen mención que se encuentran en AIP. Además, como parte de la identificación de los usuarios reconoce los puntos de captación asociados a los acueductos veredales. Además, como se muestra en la *Tabla 5-2*, al igual que para los EsIA 1 y 2 el proyecto traza los límites de la cuenca hasta el punto de captación del agua, sin embargo, el AIP abarca una pequeña parte de la cuenca delimitada por ellos, por lo tanto, se excluye gran parte de la zona de provisión que pertenece a la cuenca a la que el proyecto pertenece.

EsIA5: A pesar de que el EIA indica que se separa la zona de provisión de la zona de captura, se observa confusión en la localización de estas áreas, ya que se combinan en un solo mapa como si se tratara de la misma zona. La información cartográfica con la que se cuenta limitada, respecto a la *Tabla 5-2* únicamente se cuenta con la infraestructura del proyecto, la cual se encuentra dentro de la cuenca delimitada por el caso de estudio.

EIA6: A pesar de que el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) menciona la separación entre la zona de provisión y la zona de captura, se evidencia confusión en la localización de estas áreas, ya que ambas se combinan en un solo mapa. Además, como se muestra en la *Tabla 5-2* el proyecto delimita la cuenca hasta el punto de captura del agua y el AIP no incluye la cuenca., por lo tanto, se excluye la zona de provisión que pertenece a la cuenca a la que el proyecto pertenece.

Las estaciones de monitoreo pasaron por varios filtros de selección para asegurar que cumplieran con ciertas características esenciales. Se descartaron aquellas que no cumplieran con un mínimo de años de información, necesario para considerar una buena variabilidad de datos. Además, se seleccionaron al menos tres estaciones por cuenca para garantizar que la información abarcara adecuadamente toda la cuenca.

Los resultados muestran que las estaciones están ubicadas en áreas propensas a tormentas intensas y frecuentes, debido a su ubicación geográfica. Sin embargo, algunas estaciones no cumplieron con las condiciones necesarias para clasificar un evento como tormenta.

La variabilidad de los datos, con un $p < 0,5$, refleja la naturaleza cambiante del clima tropical. Esta alta variabilidad se debe a que las estaciones están ubicadas en una zona tropical, caracterizada por cambios climáticos significativos y diferentes patrones de precipitación. Aunque todos los casos de estudio se encuentran en Antioquia, esta región cuenta con diferentes pisos térmicos y climas, lo que hace del departamento una zona con variaciones significativas en precipitación.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

Además, la calidad y confiabilidad de los datos recopilados pueden verse comprometidas porque algunas de estas estaciones son antiguas. Esto podría afectar la precisión de los registros debido al desgaste y la obsolescencia de los equipos, así como a posibles registros incompletos y períodos de intermitencia en la recolección de datos. Esta falta de continuidad en los datos dificulta el análisis robusto y la toma de decisiones informadas. A pesar de la importancia de estos datos para la gestión ambiental, no se tiene certeza sobre la actualización y el mantenimiento adecuado de todas las estaciones de monitoreo.

El SE de agua potable para beber se delimita en la APSE dentro de la cuenca seleccionada. En la representación visual, el color azul oscuro indica las áreas con mayor disponibilidad del SE, identificando las zonas de provisión del SE, las zonas de color más claro se deben a la presencia de un tipo de cobertura del suelo con una capacidad de retención de precipitación muy limitada, lo que resulta en un fomento de la escorrentía superficial (Jullian et al., 2018).

Dentro de los EsIA se plasmó que el área de influencia utilizada para analizar los SE es la misma que el AIP. En la mayoría de los casos, se emplea el área de influencia socioeconómica, esta área asocia únicamente al beneficiario, es decir, a la zona de captura. No obstante, se observa en la figuras: *Figura 5-11*, *Figura 5-12*, *Figura 5-13*, *Figura 5-14*, *Figura 5-16* y *Figura 5-15*, que la zona de provisión capturada en el AIP del EIA es insuficiente, ya que no abarca la zona de provisión, lo que plantea desafíos en la identificación y análisis actual de los SE.

Para las *Figura 5-11* y *Figura 5-12* aunque existen zonas de provisión dentro del AIP, es evidente que la mayor parte se encuentra aguas arriba del AIP. Esto implica que no se considera adecuadamente este criterio para analizar el SE. Además, considerando el indicador Tabla 7-1, muestra un valor menor a cero, lo que confirma que el AIP no captura adecuadamente la APSE. Esta omisión subraya la necesidad de revisar y ajustar los criterios de delimitación de las AIP para garantizar un análisis completo y preciso del SE en futuras evaluaciones.

Tabla 7-1. Indicadores de los casos de estudio 1 y 2

Caso de estudio 1	Caso de estudio 2
$\frac{3805 - 21002(\text{teorica})}{21002(\text{teorica})} = -0,819 \text{ ha}$	$\frac{4673 - 21002(\text{teorica})}{21002(\text{teorica})} = -0,777 \text{ ha}$

Mientras que el indicador para la *Figura 5-13* representa un caso particular, se observa que el resultado es un valor positivo, lo que sugiere que el AIP puede incorporar el APSE. En este caso, el AIP incluye un área considerable que se extiende más allá del APSE. Esta extensión es lo que genera el valor positivo en el indicador. Los AIP suelen considerar municipios o unidades territoriales menores, mientras que el APSE se enfoca en cuencas o microcuencas, especialmente porque se trata de un SE de aprovisionamiento de agua. Aunque

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

el indicador es positivo, esto no significa que el AIP realmente incorpore el APSE de manera efectiva.

$$\frac{1978 - 1726(\text{teórica})}{1726(\text{teórica})} = 0,146\text{ha}$$

Por otro lado, los indicadores para las *Figura 5-14*, *Figura 5-15* y *Figura 5-16* dieron todos negativos indicando que el AIP no captura el APSE. Las AIP dejan fuera la mayor parte de la zona de provisión perteneciente a la cuenca. Respecto a la APSE 6 (*Figura 5-16*) gran parte del AIP queda por fuera del APSE, ya que considera las sociales unidades territoriales.

Tabla 7-2. Indicadores de los casos de estudio 4, 5 y 6

Caso de estudio 4	Caso de estudio 5	Caso de estudio 6
$\frac{8900 - 29757(\text{teórica})}{29757(\text{teórica})}$ = -0,701ha	$\frac{3 - 24586(\text{teórica})}{24586(\text{teórica})}$ = -1,000ha	$\frac{8860 - 21002(\text{teórica})}{21002(\text{teórica})}$ = -0,578ha

Los AIP consideran municipios que la APSE no tuvo en cuenta ya que se enfoca en un SE de agua por lo tanto se excluye a la cuenca o microcuenca, por lo que el indicador debe analizarse a detalle. Por último, dado que se trata de una cuenca, el flujo del SE es direccional, y una gran parte de este flujo queda fuera del AIP, para todos los casos de estudio.

En relación con los resultados de los beneficiarios, es importante considerar que no pudieron evaluarse debido a que el insumo principal estaba incompleto. Para obtener una visión completa, es necesario contar con información sobre la totalidad de los usuarios, incluyendo la intensidad de uso y las bases de datos. Actualmente, los datos solo involucran al dueño o administrador del acueducto veredal, sin proporcionar la cantidad exacta de personas que se benefician de él. Por lo tanto, sería recomendable descartar estos resultados, ya que carecen de consistencia y no ofrecen un panorama significativo. El beneficio real parece limitarse únicamente al potencial.

Los lineamientos que se generan en este estudio son esenciales para una evaluación integral y precisa de los Servicios Ecosistémicos (SE) en los Estudios de Impacto Ambiental (EsIA). La identificación del Área de Propagación del Servicio Ecosistémico (APSE) es crucial para delimitar adecuadamente las áreas de provisión y beneficio de SE, evitando la exclusión de beneficiarios y proporcionando una evaluación justa.

El estudio destaca la necesidad de un enfoque integral en los EsIA, integrando los criterios de propagación espacial de los SE. Las herramientas de mapeo, como ECOSER, han mostrado ser efectivas para visualizar la distribución y los beneficios de los SE, siempre que se disponga de información completa y precisa.

La validación de los datos es fundamental para la fiabilidad de los resultados, asegurando que las conclusiones sean sólidas y basadas en datos verificados. Estos lineamientos proporcionan una estructura clara para la evaluación de SE en los EsIA, mejorando la

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

precisión y la comprensión de los impactos ambientales, beneficiando tanto al medio ambiente como a las comunidades.

8 Conclusiones

Durante la revisión de literatura y la comparación con los casos de estudio, se encontraron coincidencias en algunos impactos ambientales entre la literatura y los Estudios de Impacto Ambiental (EIA). Sin embargo, se identificó un impacto mencionado frecuentemente en la literatura, pero de escasa relevancia en los EIA: el impacto en la población de peces. Este hallazgo sugiere que investigaciones futuras deberían considerar detalladamente este aspecto.

Al hacer uso de la clasificación CICES, se asociaron con precisión actividades e impactos a tipos específicos de SE. Esto fue esencial debido a la falta de detalles en la literatura sobre la afectación de los SE por proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). Los SE más afectados pertenecen a la provisión biótica, incluyendo el SE de animales criados con fines nutricionales, así como el agua superficial para beber y la regulación del ciclo hidrológico.

Los mapas generados a través del protocolo ECOSER resaltan la necesidad de ajustar las AIP delineadas en los EIA. Es importante considerar un Área de Provisión de Servicios Ecosistémicos (APSE) para una gestión informada de los impactos ocasionados por proyectos de desarrollo, especialmente en el caso de PCH.

Los lineamientos desarrollados ofrecen una guía sólida para la consideración y mitigación de impactos en diversos contextos de desarrollo. Además, se debe tener en cuenta la complejidad de los patrones de lluvia en la región al interpretar los resultados y planificar futuras investigaciones y proyectos. También se señala la necesidad de ajustar los criterios de delimitación del AIP para capturar adecuadamente el APSE.

Las conclusiones de este trabajo reflejan la necesidad de mejorar la precisión en la delimitación y evaluación de las áreas de provisión y captación de recursos hídricos en los estudios de impacto ambiental para asegurar una gestión sostenible y efectiva de los servicios ecosistémicos.

9 Recomendaciones

- Realizar trabajo de campo puede reducir incertidumbre en cierto porcentaje y Comprender el contexto social y político puede ayudar a diseñar estrategias más efectivas para la gestión ambiental.
- Las condiciones sociopolíticas en el área de estudio también deben ser consideradas. Esto incluye aspectos como la participación comunitaria, conflictos de intereses y relaciones con las autoridades locales.

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

- Dado que la información sobre los beneficiarios puede estar incompleta, se recomienda recopilar datos precisos. Esto podría incluir encuestas, entrevistas o análisis de registros existentes. La identificación clara de los beneficiarios es fundamental para evaluar los impactos y distribuir los beneficios equitativamente.
- El protocolo ECOSER, actualmente en desarrollo, requiere revisión o espera a la versión final para mayor precisión. Durante este proceso, se pueden ajustar los pasos, incluir más variables o considerar diferentes enfoques. Por ejemplo, en el paso para generar los servicios ecosistémicos (SE), el protocolo exige ingresar 10 funciones, aunque en este estudio solo se identificó una función. Además, el paso para calcular los beneficios solicita el total de usuarios, pero las bases de datos suelen tener información sobre el consumo de agua en volumen por punto. Sería útil incluir una casilla para el volumen (m³) en ECOSER en lugar del total de usuarios o agregar una condición.
- ECOSER podría beneficiarse al permitir la entrada de datos sobre el volumen (m³) en la casilla de beneficio. Esto se alinea con la información disponible en las bases de datos y proporciona una estimación más realista.

10 Bibliografía

- Ala-Hulkko, T., Kotavaara, O., Alahuhta, J., & Hjort, J. (2019). Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe. *Ecological Indicators*, 103(September 2018), 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.049>
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A., Delgado, J., & Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839-2865. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>
- ANLA. Autoridad Nacional De Licencias Ambientales. (2018). Metodología General Para La Elaboración Y Presentación De Estudios Ambientales. En *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (Vol. 1, Número 1). <https://doi.org/10.1109/robot.1994.350900>
- ANLA. (2020). *Jerarquización, Estandarización y Georreferenciación de Impactos Ambientales de Proyectos Licenciados por ANLA*. 40.
- Bagstad, K. J., Johnson, G. W., Voigt, B., & Villa, F. (2013). Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 4, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.012>
- Barral, M. P. (2017). *ECOSER_Módulo 1 - Versión 2.1. 1*, 1-45.
- Braun-Cruz, C. C., Tritico, H. M., Beregula, R. L., Girard, P., Zeilhofer, P., Ribeiro, L. de S., & Fantin-Cruz, I. (2021). Evaluation of hydrological alterations at the sub-daily scale caused by a small hydroelectric facility. *Water (Switzerland)*, 13(2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/w13020206>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied hydrology*.
- Churimo, E. de I. A. (2019). *CAPÍTULO 8*.
- CICES Haines-Young, R., & Potschin, M. (2018). CICES V5. 1. Guidance on the Application of the Revised Structure. *Cices, January*, 53. <https://cices.eu/resources/>
- Conesa, V. (1997). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. En *Na: Vol. No 3* (Número Ediciones Mundi-Prensa). <http://www.sinab.unal.edu.co/?q=node/46>
- Congreso de Colombia. (2014). Decreto 2041 del 2014 . En *Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible* (pp. 1-48). https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/7b-decreto_2041_oct_2014.pdf
- Cuartas Hernandez, V. H. (2020). REVISIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA Y ESTADO DEL POTENCIAL HIDROENERGÉTICO EN ANTIOQUIA. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37872/CuartasHernandezVictorHugo2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duque, E. A., González, J. D., & Restrepo, J. C. (2016). Developing Sustainable Infrastructure for Small Hydro Power Plants through Clean Development Mechanisms in Colombia. *Procedia Engineering*, 145, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.066>
- Duque Grisales, E., & Arango Vásquez, L. (2016). Alternativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia en el mecanismo de desarrollo limpio. *Alternativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia en el mecanismo de desarrollo*

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

- limpio.*, 24(35), 73-100. <https://doi.org/10.18566/rces.v24n35.a5>
- Fisher, B., & Kerry Turner, R. (2008). Ecosystem services: Classification for valuation. *Biological Conservation*, 141(5), 1167-1169. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.02.019>
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643-653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). *Proposal for a Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES) for Integrated Environmental and Economic Accounting (VI) European Environment Agency.*
- Harlan, T. (2018). Rural utility to low-carbon industry: Small hydropower and the industrialization of renewable energy in China. *Geoforum*, 95(May 2017), 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.06.025>
- Harlan, T., Xu, R., & He, J. (2020). Is small hydropower beautiful? Social impacts of river fragmentation in China's Red River Basin. *Ambio*, 1. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01367-z>
- Ibarra, A. A. (2005). Los Peces Como Indicadores de la calidad ecológica del agua. *Revista Digital Universitaria*, 6(8), 1067-6079.
- Instituto Nacional de Vías, M. de transporte. (2009). *Manual de drenaje para carreteras.*
- Jiménez-Segura, L. F., Restrepo-Santamaria, D., García-Melo, L. J., Torres-Velásquez, A. M., & Jaramillo-Villa, Ú. (2018). Peces dentro de túneles de descarga de una central hidroeléctrica del río Porce. *Actualidades Biológicas*, 40(108), 97-102. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v40n108a09>
- Jimenez, D. M. (2022). IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DANIEL. *γ787*, 8.5.2017, 2003-2005.
- Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Assessment of the ecosystem service of water regulation under scenarios of conservation of native vegetation and expansion of forest plantations in south-central Chile. *Bosque*, 39(2), 277-289. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>
- Lam, N., Tarlor, & Francis. (2003). *Geographic information systems and science.*
- Laterra, P., Barra, Ma. paula, Carmona, A., & Nahuelhual, L. (2018). *ECOSER 2.0 (from: Laterra, P., Barral, P., Carmona, A., & Nahuelhual, L. (2016). Focusing conservation efforts on ecosystem service supply may increase vulnerability of socio-ecolo... 0(July), 0-15.*
- Laterra, P., Barral, M., Carmona, A., & Nahuelhual, L. (2017). ECOSER. Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el orde.... *Ecoser, January 2016*, 1-45. https://www.researchgate.net/publication/290964970_ECOSER_Protocolo_colaborativo_de_evaluacion_y_mapeo_de_servicios_ecosistemicos_y_vulnerabilidad_socio-ecologica_para_el_ordenamiento_territorial
- Laterra, P., & ParueLo, esteban G. J. J. M. (2011). *VALORACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial.*
- Los Milagros, E. de I. A. (2019). *Capítulo 8 Evaluación Ambiental.*
- MADS, M. de A., & Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015.*
- Martín-López, B., González, J. A., Díaz, S., Castro, I., & García-Llorente, M. (2007). Vol

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

- 16, No 3 (2007) - Ecosistemas. *Asociación Española de Ecología Terrestre*, 16(3), 69-80.
<http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/issue/view/15%5Cnhttp://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/117/114%5Cnhttp://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/120/117%5Cnhttp://www.rev>
- McManamay, R. A., Samu, N., Kao, S. C., Bevelhimer, M. S., & Hetrick, S. C. (2015). A Multi-scale Spatial Approach to Address Environmental Effects of Small Hydropower Development. *Environmental Management*, 55(1), 217-243.
<https://doi.org/10.1007/s00267-014-0371-2>
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. (2005). ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING. En *World Health Organization* (Vol. 256, Número 6).
<https://doi.org/10.1152/ajpcell.1989.256.6.c1120>
- MinAmbiente, M. de M. ambiente. (2002). Manual de evaluación de estudios ambientales. En *Ministerio del Medio Ambiente Subdirección de Licencias Ambientales. Convenio Andrés Bello Área de Ciencia y Tecnología*.
- MinAmbiente, M. de M. ambiente. (2021). *LISTADO DE IMPACTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (Número 8).
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1932-politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico#documentos-de-interes>
- Osorio, I. (2017). Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia. *Universidad EAFIT*, 56.
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/OsorioLondoño_Iverson_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pantogoras, E. de I. A. (2021). *Capítulo 8 Evaluación Ambiental*.
- Popa, F., Dumitran, G. E., Vuta, L. I., Tica, E. I., Popa, B., & Neagoe, A. (2020). Impact of the ecological flow of some small hydropower plants on their energy production in Romania. *Journal of Physics: Conference Series*, 1426(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012043>
- Schröter, M., Koellner, T., Alkemade, R., Arnhold, S., Bagstad, K. J., Erb, K. H., Frank, K., Kastner, T., Kissinger, M., Liu, J., López-Hoffman, L., Maes, J., Marques, A., Martín-López, B., Meyer, C., Schulp, C. J. E., Thober, J., Wolff, S., & Bonn, A. (2018). Interregional flows of ecosystem services: Concepts, typology and four cases. *Ecosystem Services*, 31(November 2017), 231-241.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.02.003>
- Serna-Chavez, H. M., Schulp, C. J. E., Van Bodegom, P. M., Bouten, W., Verburg, P. H., & Davidson, M. D. (2014). A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 39, 24-33.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.024>
- Toro Calderón, J., & Prada, R. M. (2015). Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, 4(2), 43-53.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/revista1/index.php/riaa/article/view/990>
- Walczak, N. (2018). Operational evaluation of a Small Hydropower Plant in the context of sustainable development. *Water (Switzerland)*, 10(9).

Criterios de propagación espacial de servicios ecosistémicos para la definición del área de influencia en proyectos de desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas-PCH

<https://doi.org/10.3390/w10091114>

Zhang, J., Xu, L., Yu, B., & Li, X. (2014). Environmentally feasible potential for hydropower development regarding environmental constraints. *Energy Policy*, 73, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.040>