



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Identificación de estrategias para el restablecimiento  
de la funcionalidad ecológica en zonas intervenidas con  
pequeñas centrales hidroeléctricas**

**Wilmar Mauricio Yepes Robledo**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de Ingeniería**

**Medellín, Colombia**



Identificación de estrategias para el restablecimiento de la funcionalidad ecológica en  
zonas intervenidas con pequeñas centrales hidroeléctricas

Wilmar Mauricio Yepes Robledo

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Especialización en gestión ambiental

Asesora:

Lina María Berrouet Cadavid, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2019

## CONTENIDO

1. Introducción .....	2
2. Marco conceptual .....	4
2.1 Integralidad, Funcionalidad y servicios del ecosistema .....	4
2.2 Centrales hidroeléctricas y las pequeñas centrales hidroeléctricas .....	6
3. Diseño metodológico .....	9
3.1 Estudio de caso 1: PCH el Retiro .....	11
3.2 Estudio de caso 2: PCH la Chorrera de Puerto Rico .....	12
3.3 Estudio de caso 3: Central hidroeléctrica Palagua .....	12
4. Resultados y discusión .....	14
4.1 Acciones y obras que causan deterioro de los ecosistemas en la construcción y operación de PCH .....	14
4.2 Efecto sobre la funcionalidad ecológica en la construcción y operación de PCH .....	17
4.2.1 Desplazamiento de población, adecuación del terreno y su efecto en la función de ecosistemas terrestres .....	18
4.2.2 Generación de contaminación en las actividades constructivas .....	20
4.2.3 Intervenciones en el cauce del río, operación de la PCH y su efecto en la función de ecosistemas hídricos .....	22
4.3 Funciones y servicios ecosistémicos afectados .....	24
4.4 Manejo de impactos en estudios de caso .....	26
4.4.1 Estudio de caso 1: PCH el Retiro .....	27
4.4.2 Estudio de caso 2: PCH la Chorrera .....	29
4.4.3 Estudio de caso 3: Central hidroeléctrica Palagua .....	30
4.5 Análisis de impactos y medidas de manejo .....	33
5. Conclusiones y recomendaciones .....	38
6. Referencias bibliográficas .....	43

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Resumen de proyectos, etapas y obras necesarias para la operación de una PCH....	14
---	----

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Esquema de las partes de una PCH y el sistema del sistema de desviación, conducción, generación y descarga .....	7
Figura 2. Ubicación de los proyectos analizados .....	11

## RESUMEN

En Colombia, la principal fuente de energía eléctrica es generada a partir de hidroeléctricas dado el gran potencial que ofrece las condiciones climáticas y geográficas. La tendencia es a incrementar la capacidad instalada de generación de energía mediante la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas, que por el área a intervenir, se considera que su construcción y operación no generan impactos críticos o de magnitud significativos. Sin embargo, nueva evidencia sugiere que algunos impactos como la pérdida de biodiversidad, contaminación, pérdida de cobertura vegetal, erosión, pérdida de calidad del agua, fragmentación de los ecosistemas terrestres e hídricos, pueden ser de magnitud y/o criticidad igual o incluso mayor que a los derivados de las grandes centrales hidroeléctricas. Adicionalmente, estas transformaciones pueden repercutir en la conservación de la biodiversidad y la integridad ecológica, por lo que es pertinente revisar si el criterio de funcionalidad ecológica es incorporado en las estrategias de manejo de los procesos de construcción de las pequeñas centrales hidroeléctricas, y se garantice por tanto el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que benefician a las poblaciones asentadas en el área de influencia de estos proyectos. En línea con esta necesidad, en este trabajo se propone identificar estrategias de manejo exitosas para la restauración de la funcionalidad ecológica afectada por las pequeñas centrales hidroeléctricas contextualizado en algunos casos de estudio en Colombia, a partir de una revisión sistemática de literatura en el tema de PCH, evaluación de impactos y funcionalidad ecológica. Se determinó que la mayoría de impactos que afectan la funcionalidad y los servicios ecosistémicos se generan en las actividades de remoción de la vegetación, por la contaminación en las actividades constructivas y de la generación de energía donde se desvía la mayor parte del caudal y que deja un tramo semi seco que fragmenta el río en tres partes. También se determinó que existen medidas de manejo como la restitución de la cobertura vegetal y la conectividad, la restauración de los ecosistemas degradados, el control de la contaminación, los pasos para peces, entre otras, que pueden ayudar a gestionar la mayoría de los impactos, pero estas no son explícitamente exigidas en el licenciamiento ambiental o no se cumplen rigurosamente.

**Palabras clave:** Hidroenergía, Impacto ambiental, Funcionalidad, Servicios ecosistémicos

## ABSTRACT

The main source of electricity in Colombia comes from hydroelectric plants, due to the great potential offered by the climatic, topographic and geographical conditions of the territory. It is expected that in the future the installed capacity to generate energy will be increased, from the construction of small hydroelectric plants, which require a smaller area of intervention for their construction and operation. This type of hydroelectric plants would not generate critical or significant magnitude impacts. However, new evidence suggests that some environmental impacts such as loss of biodiversity, pollution, loss of vegetation cover, erosion, loss of water quality, fragmentation of terrestrial and water ecosystems, could be of magnitude or criticality equal to or greater than to the environmental impacts derived from the construction of large hydroelectric plants. Additionally, the construction of small hydroelectric plants could have an impact on the conservation of biodiversity and ecological integrity, so it is pertinent to review whether the criterion of ecological functionality is incorporated into environmental management strategies, during the construction and operation stage, to guarantee the maintenance of the ecosystem services that could benefit the populations settled in the area of influence of these projects. In this sense, this work proposes to identify successful management strategies that allow the restoration of ecological functionality, which has been affected during the construction of small hydroelectric plants, contextualized in some case studies in Colombia, based on a systematic review of the subject's literature, also the evaluation of impacts and ecological functionality. We found that the majority of impacts that affect the functionality and ecosystem services, occur during the activities of vegetation removal, the generation of pollution in construction activities and the generation of energy, where most of the flow of the watercourse It is diverted, leaving a semi-dry section that fragments the river into three parts. We also found that there are management measures such as the rehabilitation of vegetation cover and connectivity, the restoration of degraded ecosystems, pollution control, fish passages, among other measures, which can help minimize and control most of the negative impacts, but these are not explicitly required during the environmental licensing process, or are not strictly enforced.

**Keywords:** Hydropower, Environmental impact, Ecosystem Functions, Ecosystem services

## 1. Introducción

Actualmente se experimenta una transición en la generación de energía del uso de combustibles fósiles hacia las fuentes de energía renovables, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El aporte de las hidroeléctricas a la generación de energía en el mundo es del 16% (Morales et al, 2015). Colombia, al contrario del comportamiento mundial, tiene porcentajes dependencia de esta fuente energética del orden del 65% (UPME, 2013), esto principalmente potenciado por un intrincado sistema cordillerano y las altas precipitaciones que le confieren un alto potencial hidroenergético (UPME. 2015, Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014).

La tendencia en el desarrollo energético del país es al incremento en 796 MW<sup>1</sup> en plantas menores, principalmente mediante la producción en pequeñas centrales hidroeléctricas (en adelante PCH), las cuales se consideran de bajo impacto (Sierra, Sierra, & Guerrero, 2011). Aunque esto último no es muy claro dado que existen pocos estudios que determinen los efectos de su implementación, principalmente sobre la integridad ecológica y los servicios ecosistémicos que son fundamentales para las comunidades que se encuentran asentadas en el área de influencia de las PCH.

En el país, el marco normativo para el desarrollo de proyectos obliga a la elaboración de un estudio de impacto ambiental y la obtención de una licencia. Para esto, el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS) a través de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) elaboraron unos términos de referencia específicos para los proyectos de generación hidroeléctrica en los que a partir de una caracterización de los componentes físico, biótico y social, se evalúan los impactos y se deben implementar medidas de manejo de los impactos identificados sobre los componentes del ecosistema (MADS, 2017).

---

<sup>1</sup> Según la UPME (2015) se espera una proyección de crecimiento de la capacidad instalada de plantas menores (capacidad instalada  $\leq$  20 MW), aunque no se especifica la fuente, apunta a “*la optimización de las microcuencas*” (UPME, 2019).

En el caso de las PCH, así como en general en todos los proyectos de desarrollo, es imperativo conocer cuáles acciones o actividades son las de mayor impacto sobre los ecosistemas y cómo, consecuentemente, se afecta la diversidad y la prestación de servicios ecosistémicos. Adicionalmente, es importante conocer cómo es incorporado o no el criterio de funcionalidad en los procesos de restauración asociadas a las estrategias de manejo de impactos sobre la ecosistema en la construcción de las PCH, cuáles de dichas estrategias de manejo pueden rehabilitar la funcionalidad de los ecosistemas en las zonas afectadas por la construcción y operación de este tipo de proyectos.

Este trabajo pretendió identificar las estrategias de manejo exitosas para la restauración de la funcionalidad ecológica afectada por las PCH en Colombia. Esto se abordó a través del entendimiento de las fases y actividades de las PCH que inciden en la transformación o alteración de la integridad ecológica a través de la modificación de atributos o propiedades claves en la funcionalidad de los ecosistema, de la identificación de los bienes y servicios ecosistémicos susceptibles de ser transformados por la afectación de la integridad ecológica derivada de las actividades constructivas y operacionales de PCH y finalmente, revisando las estrategias para el manejo de impactos sobre la funcionalidad de los ecosistemas en PCH y su incidencia en la recuperación de la integridad ecológica, con base en la revisión sistemática de literatura, y casos de estudio para el caso Colombiano.

Las actividades de remoción de la vegetación y las relacionadas con generación de elementos contaminantes, son las que vinculan procesos de transformación de la funcionalidad ecológica, puesto que la fragmentación y la contaminación pueden afectar la integridad y la capacidad de resiliencia de los ecosistemas. Si bien algunas medidas de manejo permitirían procesos de mitigación y/o corrección de estos impactos, es posible que en el contexto colombiano estas no se adopten a cabalidad. Por tanto es recomendable que se mejoren los términos de referencia del sector hidroeléctrico integrando medidas específicas para PCH, que incorporen de forma explícita las estrategias de manejo que permitan rehabilitar la integridad del ecosistema.



## **2. Marco conceptual**

En el auge de las energías renovables, la factibilidad de construir una PCH depende de las restricciones y potencialidades ambientales que ofrece el área a intervenir. Es por esto que los estudios ambientales deben ser rigurosos con el fin de dimensionar los impactos generados y la internalización de estos a través de estrategias de manejo. Por esto resulta de interés conocer algunos enfoques con respecto a los efectos de los impactos sobre los ecosistemas y la biodiversidad, sobre la afectación a la funcionalidad y las estrategias de manejo en el área de intervención.

### **2.1 Integralidad, Funcionalidad y servicios del ecosistema**

Los procesos como transferencia de materia y energía, productividad, descomposición, respiración, evapotranspiración y ciclaje de nutrientes, resultan de la interacción de los organismos con las propiedades físicas, químicas y biológicas del ecosistema, consecuencia de estos procesos se derivan las funciones ecosistémicas, las cuales están reguladas por los factores bióticos y abióticos, donde la diversidad juega un rol clave al complementarse en la utilización de todos los nichos del ecosistema (Rojas, Bocanegra, & Mariño, 2014). El hombre depende de los sistemas naturales o ecosistemas, desde las formas de subsistencia básicas primitivas hasta las economías actuales a través del empleo de materias primas y energía que proviene de la naturaleza para los sistemas de producción, así mismo, el medio ambiente se utiliza como sumidero de los residuos que se generan, por lo que del mantenimiento de la integralidad ecológica y de su resiliencia depende el bienestar humano (Gómez-Baggethun & de Groot, 2007).

Se trata de una relación delicada y sensible ya que los cambios que experimenten el funcionamiento de los ecosistemas afectan el bienestar humano (Hofstede, 2011). La biodiversidad entendida como la variabilidad de organismos, posee una estructura, composición y funcionamiento, resultante de su interacción con factores externos como la energía solar, los

ciclos del agua y los ciclos biogeoquímicos, de allí se generan múltiples beneficios que son percibidos como servicios ecosistémicos por el sistema humano (Mendoza, et al., 2012). Así, la biodiversidad se constituye como un eslabón clave pues cumple múltiples funciones y generan servicios ecosistémicos, por lo que su pérdida afecta la estabilidad y la funcionalidad del ecosistema (Ratcliffe, Ruiz, Kändler, & Zavala, 2016),

Los servicios ecosistémicos se pueden clasificar en servicios de provisión, de regulación y culturales, los primeros son bienes, productos y materias primas como alimentos, agua, energía, fibras, resinas, gomas, etc. Los servicios de regulación resultan de la autorregulación del ecosistema tales como la del control de la erosión, purificación del agua y la regulación climática; mientras los servicios culturales se asocian al componente inmaterial del bienestar (aspectos cognitivos, de desarrollo espiritual y de relacionamiento) como la recreación, la educación, la belleza escénica y las experiencias espirituales (Rincón-Ruíz, et al., 2014; UNESCO, 2010).

Basada en la teoría de sistemas y en la termodinámica, el concepto de integridad ecológica se refiere a la conservación de un estado óptimo de funcionamiento del ecosistema que pueda garantizar los procesos naturales (Equihua, et al., 2014), mediante el mantenimiento de sus características fundamentales como composición, estructura y función; en rangos aceptables para que sean capaces de resistir el efecto de disturbios de origen natural o antrópico (SINAC<sup>2</sup>, 2016). Por otra parte, se considera que la integralidad ecológica es difícil de observar directamente, pero puede diagnosticarse por la interpretación de síntomas y signos observables sobre sus componentes, subyace entonces que al afectar la estructura y función del ecosistema, se afectan los servicios que estos proveen (Equihua, et al., 2015).

Dicha integridad y resiliencia, se ven afectados por el aumento de la actividad económica, debido a la pérdida, transformación y degradación de la biodiversidad y los servicios que proveen (Andrade & Castro, 2012), estas actividades llevan a los ecosistemas a un estado de

---

<sup>2</sup> Sistema Nacional de Áreas de Conservación de Costa Rica

cambio en la composición, estructura y funcionamiento, liberando materia y energía. Esto se manifiesta con la pérdida de biomasa, pérdida de conectividad, incremento en la susceptibilidad a los factores ambientales; estados en los que es oportuno revertir estos efectos mediante medidas de manejo y gestión (Mendoza, et al., 2012).

Entre los factores directos que promueven la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos están los cambios en el uso y la cobertura del suelo, la introducción y eliminación de especies, el uso de la tecnología, la utilización de insumo agrícolas, el cambio climático así como otros factores naturales (UNESCO,2010). Mientras que se identifican actividades que contribuyen a la degradación y pérdida de servicios ecosistémicos como son la agroindustria, la minería, la generación hidroeléctrica, la urbanización, la sobrepesca, las invasiones biológicas, la contaminación y la toxificación del agua (MADS & PNUD, 2014).

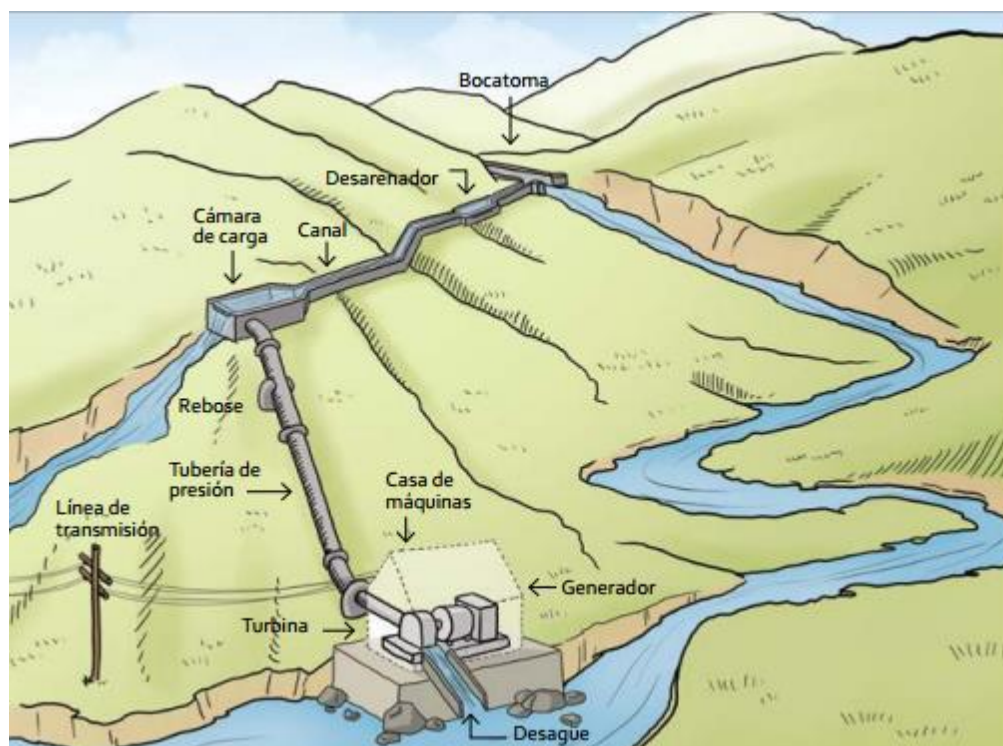
Así como estos aspectos causan pérdida de servicios ecosistémicos y por ende afectan el bienestar social, también existen actividades para la recuperación y conservación de estos mediante procesos de restauración (MADS & PNUD, 2014). De hecho el objetivo de la restauración ecológica es la recuperación de la funcionalidad del ecosistema afectado para la prestación de los bienes y servicios ecosistémicos, esto se hace mediante la eliminación del disturbio y la adopción de técnicas de manejo del suelo, de cuerpos de agua, de la eliminación de especies invasoras y la revegetalización con especies nativas que faciliten la sucesión vegetal, para lo cual es indispensable el conocimiento de las comunidades asentadas en el área de interés (Vargas et al., 2012).

## **2.2 Centrales hidroeléctricas y las pequeñas centrales hidroeléctricas**

El agua de los ríos posee la capacidad de realizar un trabajo pues a mayor pendiente y mayor caudal, mayor será su energía hidráulica, en cursos de agua naturales esta se consume principalmente en fricción. El trabajo realizado por un río se manifiesta en la erosión del cauce,

el transporte de sedimentos, arrastre de la carga de disuelta y la carga de fondo; esta dinámica determina la morfología del cauce (Sandoval, 2018).

Las centrales hidroeléctricas son proyectos de infraestructura para la generación de energía a partir del aprovechamiento de los cuerpos de agua de montaña a través de una captación y la caída del agua entre gradientes altitudinales. El agua que cae pasa por turbinas, estas convierten la energía cinética en energía mecánica, las turbinas acopladas a un generador transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Según la Unidad de planeación minero energética (UPME, 2015), las centrales hidroeléctricas se clasifican según su capacidad en picocentrales (entre 0,5 y 5 kW), microcentrales (entre 5 y 50 kW), minicentrales (entre 50 y 500 kW), pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) (entre 500 y 20.000 kW) y centrales hidroeléctricas (mayor a 20.000 kW). En la **Figura 1** se observa un esquema de un sistema de PCH.



**Figura 1. Esquema de las partes de una PCH y el sistema del sistema de desviación, conducción, generación y descarga**

Fuente: Messa, Polo, & Gómez (2014).

Para las centrales hidroeléctricas es necesario embalsar el agua mediante la construcción de una o varias presas (UPME, 2015), mientras las centrales de menor capacidad se pueden clasificar en varios tipos. Las centrales filo de agua constan de una derivación, captación, conducción y zona de turbinado y descarga, generalmente no poseen embalse pues dependen de la oferta hídrica, por lo que para asegurar la disponibilidad de agua se implementan presas de tamaño pequeño. Las centrales a pie de presa necesitan embalse de regulación para tener disponibilidad constante de agua y no perder capacidad instalada, las centrales de bombeo permiten el trasvase de agua entre un par de presas a diferentes altitudes y las Centrales hidroeléctricas mareomotrices dependen de la energía de las mareas para la generación (Gallego, 2015).

En general, la zona andina del país posee alto potencial hidroeléctrico dado que la transición entre la zona montañosa hacia los cañones y valles es abrupta (Arias, 2016), esto propicia los dos elementos que componen el potencial hidroenergético, por una parte a mayor diferencia altitudinal y mayor pendiente mayor potencial hidráulica, lo que define la caída hidráulica, por otra parte el volumen de agua por unidad de tiempo disponible para la generación hidroeléctrica es el caudal aprovechable, lo cual depende de la precipitación y la regulación de este recurso (UPME, 2015).

### 3. Diseño metodológico

El desarrollo de este trabajo se realizó en tres fases. En primer lugar, se identificaron todas las acciones susceptibles de generar impacto sobre el componente biótico en la construcción de las PCH, mediante la revisión de libros especializados en el tema y estudios de impacto ambiental. Paralelamente se realizó la revisión de 27 artículos en revistas indexadas, de los cuales se seleccionaron 12 que trataban sobre los impactos que causan la construcción y operación de las centrales hidroeléctricas sobre los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos, la bibliografía acerca de impactos de las PCH es limitada por lo que se incluyeron algunos análisis de centrales hidroeléctricas que pese a la diferencia en escala, pueden causar impactos similares. Debido a la gran cantidad de impactos encontrados, se homologaron en impactos generales que tuvieron como base los encontrados en los textos de Conesa (2010), Canter (1998) y Arboleda (2008), de manera que se pudieran relacionar causalmente con grupos de actividades capaces de generarlos.

A partir de esto se generaron dos bases de datos, en la primera se identificaron las actividades constructivas que afectan la funcionalidad ecológica basados en las reportadas en los estudios de impacto ambiental (en adelante EIA) consultados y la literatura indexada. La construcción de las PCH implica tres grandes tipos de obras o proyectos, las obras civiles e hidráulicas para la construcción de la PCH (GENMAS, 2018; SEA 2012; INEA 1997), las vías temporales y permanentes (Devimar, 2017), la línea de transmisión eléctrica y subestaciones asociadas (ISA, 2015). Aunque en Colombia, las líneas se licencian por separado, se incluyó en el análisis sin profundizar en estas con el fin de hacer notable la acumulación de impactos que se pueden excluir en algunos procesos de licenciamiento. Las actividades identificadas, se confrontaron con los impactos homologados y agrupados según su origen, es decir, se evaluó la interacción entre las actividades constructivas u operacionales con los impactos agrupados como se observa en el Anexo 1, dado que no se encontraron trabajos donde se asocien impactos a

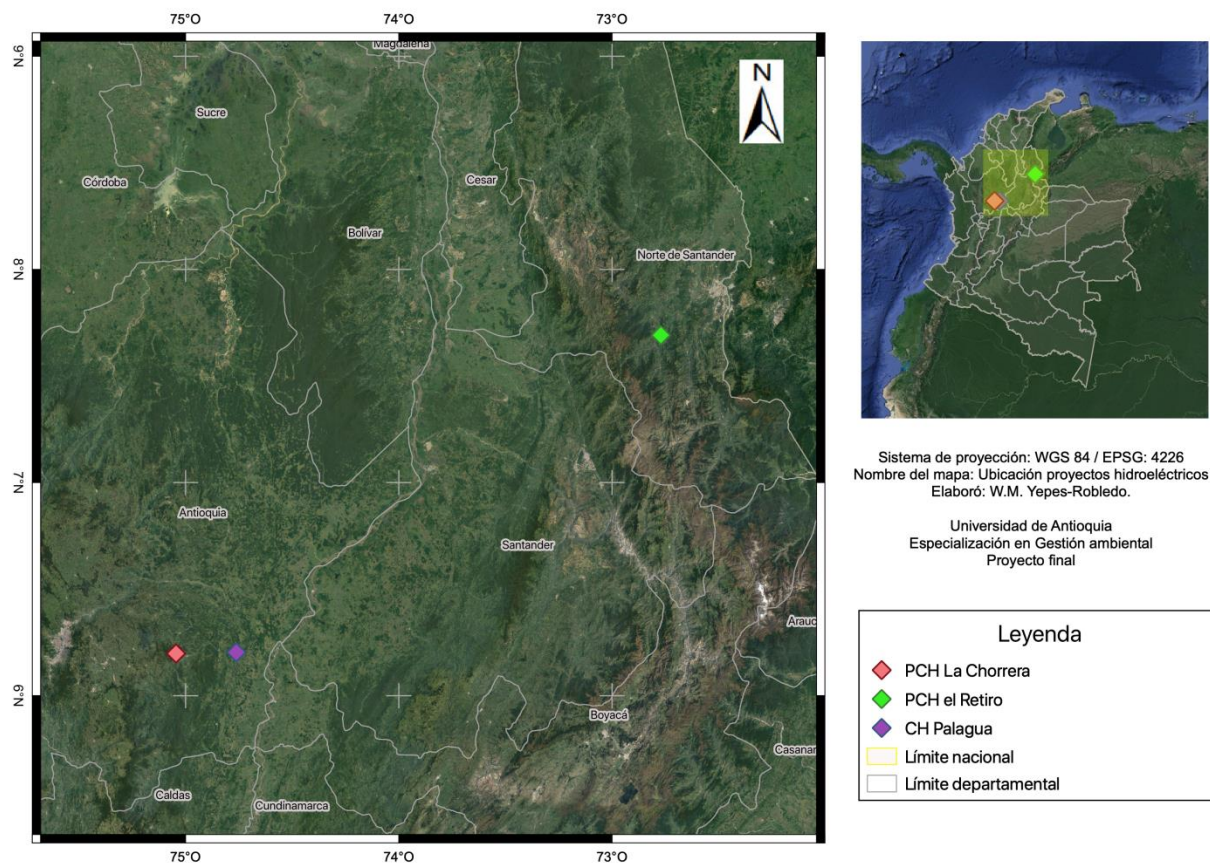
ejecución de obras o actividades de forma detallada, se establecieron relaciones de causalidad entre estos.

En la segunda base de datos construida, se identificaron y homologaron los impactos según las fuentes consultadas, estos se confrontaron con la funcionalidad ecológica y los servicios ecosistémicos acorde con la clasificación CISES<sup>3</sup> (2019), se complementaron con los de Costanza et al., (1997), Gómez-Baggethun & de Groot, (2007) y los de Balvanera & Cotler, (2009). Esto se evaluó mediante un proceso de interacción matricial (causa-efecto), donde se pretendió constatar si el impacto afecta (-), contribuye (+) o si era inocuo (0), con respecto a la funcionalidad, el resultado de esta evaluación se presenta en el Anexo 2. Aunque el método de calificación de las interacciones posee algún grado de subjetividad, este se trató de superar teniendo trazabilidad entre los impactos homologados y la fuente citada, de esta manera se construyó una línea causal entre obras, impactos, función y servicio ecosistémico.

Por último, se revisaron las estrategias de manejo de los estudios de impacto ambiental con el fin de establecer si los hallazgos, en cuanto impactos sobre la funcionalidad; son tenidos en cuenta en los EIA de los proyectos y si las medidas de manejo incorporan la restauración de la funcionalidad del ecosistema para el mantenimientos de los servicios ecosistémicos. Para este trabajo se seleccionaron tres estudios de impacto ambiental, dada su disponibilidad, su actualidad (de 2012 en adelante, por cuanto a partir de este año se hace de forma explícita la exigencia de compensación por pérdida de biodiversidad) y que fueran elaborados por distintas empresas consultoras. Con base en estos requerimientos, se eligieron los EIA de la PCH El Retiro (Departamento de Norte de Santander), PCH la Chorrera de Puerto Rico (Departamento de Antioquia) y La Central hidroeléctrica Palagua (Departamento de Antioquia). En la Figura 2, se observa la ubicación de los estudios de caso utilizados. Seguido se realiza una breve descripción de cada proyecto.

---

<sup>3</sup> The Common International Classification of the Ecosystem Services



**Figura 2. Ubicación de los proyectos analizados**

### 3.1 Estudio de caso 1: PCH el Retiro

El EIA del proyecto PCH el Retiro (DEO, 2018), realizado por Plyma para desarrollos energéticos de oriente se encuentra en los municipios de Salazar de las palmas y Arboledas en el departamento de Norte de Santander, pretende aprovechar el Río Zulia en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental CORPONOR. Este proyecto consta de dos pequeñas centrales hidroeléctricas en cascada denominadas PCH El Retiro I y PCH El Retiro II, cada una generará 19,9 MW, la primera a filo de agua, se aprovecha la descarga de esta y mediante una conducción a flujo libre en canal de concreto se lleva el agua hasta la segunda unidad de generación, las dimensiones del canal son de 3,0 m x 4,9-7,0 m (bxh), una longitud aproximada de 1.135 m y una pendiente de 0,30%. El caudal ecológico de diseño de esta PCH es de 7,9 m<sup>3</sup>/s, que corresponde al 21,35% del caudal total, el área de intervención del proyecto es



de 43 ha, entre los cuales se interviene coberturas vegetales como bosques ripario (9,4 ha), bosques fragmentados (2,56 ha), y vegetación secundaria (2,4 ha), en las que se intervienen 5.861 árboles que poseen un volumen total de 2.889,17 m<sup>3</sup>, sin que se precise una extrapolación del volumen y cantidad de individuos en regeneración a afectar.

### **3.2 Estudio de caso 2: PCH la Chorrera de Puerto Rico**

La PCH la chorrera fue elaborado LHC Consultores ambientales y no se identifica a la empresa promotora (LHC, 2012), este proyecto se encuentra en la cuenca de la quebrada La Chorrera de Puerto Rico en el municipio de San Carlos, en la subregión Oriente del Departamento de Antioquia en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de los rio Negro y Nare CORNARE. Se trata de una PCH a filo de agua con una capacidad instalada de 1,66 MW. Desde la captación hasta el tanque de carga se plantea una conducción través de una tubería en GRP de 145 m de longitud, con diámetro de 0,8 m, localizada sobre la margen derecha de la quebrada y desde allí hasta la casa de máquinas una conducción por tubería de 850 m. el caudal promedio de la quebrada es de 0.49 m<sup>3</sup>/s y el caudal ecológico será de 0,1 m<sup>3</sup>/s calculado con base en el 25% del mínimo de los caudales medios mensuales multianuales.

### **3.3 Estudio de caso 3: Central hidroeléctrica Palagua**

El proyecto hidroeléctrico Palagua (ISAGEN, 2017) fue elaborado por Ingetec para ISAGEN S.A. E.S.P., se localiza en los municipios de San Carlos y Puerto Nare, al oriente del departamento de Antioquia jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de los rio Negro y Nare CORNARE. Se encuentra en el río Samaná Norte, en el sitio denominado Puente Narices, adyacente al corregimiento de Puerto Garza, donde también se encuentra el proyecto hidroeléctrico Porvenir II. El proyecto hidroeléctrico Palagua es una planta de generación eléctrica a filo de agua con una presa de concreto de 38 m de altura que permitiría generar 98 MW, la casa de máquinas de este proyecto se ubica en el sitio de presa, por lo que las aguas retornarían al cauce inmediatamente después de este sin que se presente un tramo de aguas

reducidas. El área de intervención del proyecto es de 81,49 ha, principalmente en coberturas como bosque ripario (11,09 ha), otros tipos de bosque (25,07 ha) y vegetación secundaria (5,5 ha). El estudio no precisa el número de individuos a talar pues los censos no abarcaron la totalidad del área por tratarse de zonas de difícil acceso, sin embargo reporta un volumen total de 5.775,01 m<sup>3</sup>

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Acciones y obras que causan deterioro de los ecosistemas en la construcción y operación de PCH

El desarrollo de una PCH abarca tres conjuntos de obras que pueden considerarse como proyectos independientes, estos juegan un papel clave en su construcción y puesta en operación, por lo que generan impactos adicionales sobre la diversidad o agudizan aquellos considerados como significativos en la implementación de las obras principales. En general, se considera un conjunto de obras concentradas asociadas a la infraestructura hidráulica de la PCH y obras lineales para la infraestructura vial y la línea de transmisión eléctrica, en la Tabla 1 se observan los proyectos, etapas y obras para las PCH.

Las acciones y obras para la construcción son muchas con potencial de promover, de forma directa o indirecta, el deterioro de la funcionalidad ecosistémico, en esta revisión se redujeron a 40 acciones y obras distribuidas en las fases previas, construcción y operación de las PCH e infraestructura asociada. Además, en el Anexo 1 se presentan las interacciones entre actividades y obras con los impactos, donde se hace énfasis en la construcción de las obras hidráulicas y la operación del proyecto hidroeléctrico.

**Tabla 1. Resumen de proyectos, etapas y obras necesarias para la operación de una PCH**

Proyecto	Etapa	Actividad
PCH	Pre-Construcción	Diseño, planeación y estudios preliminares
		Adquisición de predios y servidumbre
	Construcción	Remoción de la vegetación
		Descapote
		Excavaciones

Proyecto	Etapa	Actividad
		Adecuación y Construcción de instalaciones temporales
		Transporte de materiales y equipos
		Vaciado de concretos
		Adecuación y llenado de Zodmes
		Construcción de plazoleta de operaciones
		Desvío del rio para construcción de azud o captación (Ataguía, contrataguía y jarillón en ambas márgenes)
		Instalación y operación plantas de mezclas
		Construcción de subestación de generación
		Construcción portales de entrada y salida túnel
		Construcción Conducción subterránea
		Construcción Canal de aducción
		Construcción Canal de descarga
		Construcción Captación
		Construcción Casa de máquinas
		Construcción Conducción expuesta
		Construcción Desarenador
		Construcción Tanque de Carga
		Construcción Tubería de carga
		Desmantelamiento de instalaciones
		Operación y mantenimiento
Podas en servidumbre		
Vertimientos		
Línea de transmisión eléctrica	Pre-Construcción	Diseño, planeación y estudios preliminares
		Adquisición de predios y servidumbre
	Construcción	Remoción de la vegetación
		Descapote
		Excavaciones
		Adecuación y Construcción de instalaciones temporales
		Transporte de materiales y equipos
		Adecuación de accesos Mulares
		Cimentación, relleno y compactación de torres
		Despeje de servidumbre
		Montaje de torres
		Tendido e izado del conductor
		Desmantelamiento de instalaciones temporales

Proyecto	Etapa	Actividad
	Operación y mantenimiento	Control de estabilidad de sitios de torre
		Mantenimiento de zona de servidumbre
Vías (Temporales y permanentes)	Pre-Construcción	Diseño, planeación y estudios preliminares
		Adquisición de predios y servidumbre
	Construcción	Remoción de la vegetación
		Descapote
		Excavaciones
		Adecuación y Construcción de instalaciones temporales
		Transporte de materiales y equipos
		Conformación y pavimentación la vía
		Construcción de puentes y box culvert
		Construcción de obras de drenaje
		Construcción de Andenes
		Obras de estabilización y protección de taludes y vías
		Retiro de infraestructura, reconfiguración del terreno y revegetalización

Fuente: Construcción propia a partir de GENMAS (2018), SEA (2012), INEA (1997), Devimar (2017), ISA (2015)

Las actividades y obras donde se concentran los impactos sobre los ecosistemas y la biodiversidad se presentan en la etapa de construcción de las PCH e infraestructura asociada, principalmente en la preparación del terreno donde se desarrollan actividades como remoción de la vegetación en los sitios de obra y servidumbres, descapote, excavaciones, y el desvío del río para la conformación de la ataguía, contrataguía y jarillón en ambas márgenes (Moscoso & Montealegre, 2013; Moscoso-Marín & Montealegre, 2013; Ollero, 1995). También se identificaron impactos por la desviación del caudal para generación de energía en la etapa de operación lo que supone la disminución del caudal en el tramo comprendido entre la captación y la descarga (Diez & Olmeda, 2008; Ollero, 1995; Oviedo, 2018; Pang et al., 2015).

En las actividades relacionadas con la construcción de la infraestructura asociada a las obras hidráulicas, viales y de cimentación de torres de la línea de transmisión, que implica la operación de maquinaria, transporte de materiales y equipos, preparación de mezclas, vaciado de concreto, se generan residuos sólidos, contaminación del agua, suelos y aire, además de emanación de gases de efecto invernadero (Ciric, 2019; Li, Zhang, Xu, 2015; Ollero, 1995). En

la etapa previa se encontró como actividad impactante, la adquisición de predios o negociación de servidumbres, los impactos que esta genera son indirectos al promover el desplazamiento de las comunidades hacia zonas boscosas y ecosistemas no intervenidos para implementar o desarrollar actividades económicas o de subsistencia (Abbasi & Abbasi, 2011; Oviedo, 2018). Se perciben impactos positivos en la última etapa de construcción por el desmantelamiento de instalaciones de uso temporal como campamentos, depósitos, patios de tendido, cierre de vías y zonas de uso temporal; estas deben ser reconvertidas, revegetalizadas, lo que devolvería en parte la funcionalidad ecológica dependiendo de la efectividad de la medida de manejo (GENMAS, 2018; ISAGEN, 2017).

En general, se ha encontrado que las actividades que promueven los impactos más fuertes en la construcción de las PCH se pueden dividir en tres grupos, las que acarrear los impactos más en la adecuación del terreno que puede afectar los ecosistemas terrestres y acuáticos. Las derivadas de las actividades constructivas que generan contaminación y en operación donde se capta parte del caudal lo cual promueve impactos severos sobre el río, el cauce, las comunidades ribereñas y acuáticas, como se verá a continuación.

#### **4.2 Efecto sobre la funcionalidad ecológica en la construcción y operación de PCH**

Los artículos consultados consideran gran variedad de impactos que difieren en su denominación, por lo que para facilitar el análisis se agruparon según su tipo, actividad que los origina y componente afectado resultando un total de 40 impactos homologados, estos impactos tienen incidencia directa o indirecta sobre la función ecológica, estas interacciones se presentan en el Anexo 2.

Los resultados muestran que los impactos con más potencial de deteriorar la función ecológica y los servicios ecosistémicos en las zonas rurales donde se desarrollan PCH son los que se presentan sobre ecosistemas terrestres y acuáticos (Briones et al, 2019, Abbasi & Abbasi, 2011; Curtean et al, 2015, Li, Zhang, & Xu, 2015, Moscoso & Montealegre, 2013), para mayor

detalle sobre los impactos véase el Anexo 1. Desde el diseño y los análisis de prefactibilidad del proyecto se pueden intuir una serie de impactos que pueden evitarse con un lectura acertada de los atributos naturales, las coberturas y estado de conservación del sitio a intervenir, dependiendo de lo anterior los impactos sobre la función y la prestación de servicios ecosistémicos, pueden ser prevenidos casi en su totalidad (Li, Zhang, & Xu, 2015; Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014) o bien facilitaría la gestión ambiental mediante medidas de mitigación y corrección adecuadas. A continuación, se describen los impactos más significativos sobre la biodiversidad y los ecosistemas asociados a las PCH dado que son los de mayor potencial de afectar la funcionalidad y sobre los cuales se deben enfocar las medidas de manejo

#### 4.2.1 Desplazamiento de población, adecuación del terreno y su efecto en la función de ecosistemas terrestres

En etapa de pre-construcción, la elección del lugar del proyecto, los diseños, y estudios previos, indican las restricciones en cuanto a áreas protegidas, rondas hídricas, usos del suelo, comunidades, caudal disponible y tipo de ecosistemas a impactar. A partir de esto se adelanta la adquisición de predios y servidumbres, que dependiendo de la magnitud del proyecto genera un cambio en el uso del suelo de forma directa en el área del proyecto, o de forma indirecta con el desplazamiento de la población humana hacia otras zonas y aumento de la actividad en áreas adyacentes o en la misma cuenca para el establecimiento de zonas de cultivos y así sustituir la unidad agrícola vendida (Li, Zhang, & Xu, 2015; Premalatha, Abbasi, Abbasi, & Abbasi, 2014; Moscoso & Montealegre, 2013; Abbasi & Abbasi, 2011), el principal efecto se genera con el aumento de la deforestación y por ende cambios en la capacidad de infiltración del agua, aumento de la escorrentía, liberación y transporte de sedimentos (Curtean et al, 2015), entre otros impactos sobre las funciones ecológicas como se verá a continuación.

Once de las doce fuentes utilizadas, consideran las actividades constructivas previas como la remoción de la vegetación, descapote y excavaciones para la adecuación del terrenos, ocasiona graves impactos sobre la vegetación y los ecosistemas terrestres (Abbasi & Abbasi, 2011;

Briones et al, 2019; Ciric, 2019; Li, Zhang, Xu, 2015; Curtean et al, 2015; Montiel, et al., 2017; Moscoso & Montealegre, 2013; Ollero, 1995; Oviedo, 2018; Pang et al., 2015; Premalatha et al., 2014). Entre estas se encuentran impactos directos por la tala de árboles y rocería que afecta las masas forestales en diferentes estados sucesionales, principalmente asociados a los bosques de ribera, además de árboles aislados y rastrojos, lo que generalmente se denomina en los estudios ambientales pérdida de cobertura vegetal.

La pérdida de cobertura vegetal, el descapote y excavaciones, tiene consecuencias sobre la biodiversidad y procesos fundamentales del ecosistema por lo que se afecta la función de amortiguación de perturbaciones y la resiliencia del ecosistema (Manson & Jardel, 2009). Esto genera procesos erosivos debido a que al impacto directo de las gotas de lluvia y la falta de cubierta que actúa como agente que atenúa, capta y regula el recurso hídrico; de esta manera el agua no se infiltra y se genera escorrentía que con el tiempo promueve fenómenos de remoción en masa, también se afecta el balance hídrico (Restrepo, 2015; Oyarzún, Nahuelhua, & Núñez, 2005). Otras funciones como las de regulación hídrica, la protección y formación de suelo que prestan los bosques y coberturas vegetales (Doornbos, 2015) también se ven afectadas por ausencia de vegetación protectora.

Adicionalmente, por la pérdida de función de regulación de nutrientes, las partículas, nutrientes y materia orgánica llega a los ríos y quebradas cambiando la calidad del agua, generando sedimentación y eutrofización, además cambios en la dinámica del río (Poveda & Mesa, 1995). Por otra parte, la remoción de la cubierta vegetal implica cambios en la dinámica del ciclo del carbono por pérdida de fijación y liberación de los depósitos en la biomasa aérea y el suelo, con lo que se afecta la función de regulación atmosférica y climática con la liberación de gases de efecto invernadero, cambios en el albedo lo que influye en el balance energético de la luz solar incidente (Poveda & Mesa, 1995).

En el componente biótico, la remoción de la cobertura vegetal en los bosques ribereños genera fragmentación y pérdida de hábitat, asunto de particular relevancia pues estos bosques



suelen cumplir un papel importante como corredores biológicos, la reducción del tamaño de los fragmentos boscosos genera mayor efecto de borde, aumento de la distancia entre fragmentos, aislamiento de poblaciones, pérdida de conectividad (Cayuela, 2006). Estos cambios, se manifiestan con la modificación de la composición y estructura de la vegetación y de la fauna por desaparición o desplazamiento de ésta, por ende se causa pérdida de biodiversidad, en particular, son sensibles las especies amenazadas, vedadas o de importancia económica, ecológica o cultural, pues se pierde la variabilidad genética lo que conduce a la endogamia y a la deriva genética (Otavo & Echeverría, 2017). Se generan además impactos de tipo social con el cambio del paisaje y la afectación de actividades recreativas, turísticas y de sitios de interés cultural.

Así mismo, la transformación de las coberturas vegetales naturales y la fragmentación implican pérdida de función de hábitat, esta es una de las principales causas de extinción y pérdida de biodiversidad (Álvarez-Hincapié, 2010), con efectos sobre la función de polinización (Sosenski & Domínguez, 2018), de dispersión y propagación de plantas, y de control biológico (Rebollo, y otros, 2019), por pérdidas de grupos faunísticos como insectos y avifauna. Según Brown, et al (2001), la macrofauna en el suelo también se ve afectada por las actividades de adecuación del terreno, generando impactos como erosión, compactación, sedimentación y pérdida de nutrientes; la macrofauna edáfica poseen funciones fundamentales en la formación y estructuración del suelo, el mantenimiento de la fertilidad, la descomposición de la hojarasca, transformación de nutrientes, control de plagas, entre otras, allí de dan una serie de procesos fundamentales para el ciclaje de nutrientes (Brown, y otros, 2001) y el mantenimiento de la función de la regulación hídrica (Poveda & Mesa, 1995).

#### 4.2.2 Generación de contaminación en las actividades constructivas

Una vez realizadas las adecuaciones del terreno tanto para la PCH como para las vías y la línea de transmisión, le sigue la construcción de las obras hidráulicas para la toma y conducción del agua. En éstas, inicialmente es necesario la puesta en operación de las vías temporales y

definitivas para el transporte de materiales y sobrantes de excavación a los depósitos, la operación de maquinaria y equipos, la instalación y operación plantas de mezclas, y el vaciado de concretos. Estas actividades generan principalmente residuos sólidos y líquidos, emisión de gases, contaminación acústica lo que deriva en procesos de contaminación del aire y el agua (Abbasi & Abbasi, 2011; Briones et al, 2019; Ciric, 2019; Diez & Olmeda, 2008; Li, Zhang, Xu, 2015; Curtean et al, 2015; Ollero, 1995; Oviedo, 2018; Premalatha et al., 2014).

Estos impactos pueden verse exacerbados en contextos de cambio climático. Según Manson & Jardel (2009) una de las principales causas de pérdida de biodiversidad es el calentamiento global. Bajo este escenario, las poblaciones de árboles y en general los bosques tienden a la homogenización vía termofilización por pérdida de especies de crecimiento lento y requerimientos de hábitat específicos que no se adaptan a las condiciones cambiantes (Peña, Feeley, & Duque, 2018), también puede favorecer el establecimiento de especies invasoras por lo que se causa pérdida de especies de fauna y de flora, lo que promueve efectos negativos sobre la función de los ecosistemas pues cambia procesos y funciones básicas como el balance nutrientes y el ciclo del carbono en el suelo, cambio en las comunidades de macro y microinvertebrados en el suelo y en el agua, y alteraciones del ciclo hidrológico (Medina-Villar, 2016), por lo cual considerar estas restricciones en zonas de alta vulnerabilidad al cambio climático es necesario en el desarrollo de proyectos de desarrollo como el de las PCH.

Con los procesos de contaminación se afecta la función de regulación atmosférica y la función de amortiguación de perturbaciones pues las poblaciones estarán más expuestas a eventos climáticos extremos, esto también tendrá efectos sobre la función de provisión de alimentos (Equihua, et al, 2015) y de productos del bosque por cambios de las comunidades de plantas que tradicionalmente proveen estos servicios. La generación de humo, elementos contaminantes, tóxicos y material particulado por fuentes fijas y móviles afecta la salud humana, causa daños en la vegetación y altera el equilibrio ecológico (Romero, Olite, & Álvarez, 2006). Por otro lado la contaminación hídrica incide en la función de regulación de la calidad del agua y del mantenimiento de hábitat (Escalada, 2010) para invertebrados y peces que según el grado de

contaminación, cambian la estructura y composición de sus poblaciones (Aguilar, 2005; Alonso, 2006).

#### 4.2.3 Intervenciones en el cauce del río, operación de la PCH y su efecto en la función de ecosistemas hídricos

En este apartado, se consideran dos obras principales de la etapa constructiva como son la construcción del azud o estructura de para la captación de agua y la descarga y la generación de energía en etapa de operación de la PCH pues, en este punto los impactos son notorios principalmente por el cambio del caudal (Abbasi & Abbasi, 2011; Briones et al, 2019; Ciric, 2019; Diez & Olmeda, 2008; Li, Zhang, Xu, 2015; Curtean et al, 2015; Montiel, et al., 2017; Moscoso & Montealegre, 2013; Ollero, 1995; Oviedo, 2018; Pang et al., 2015; Premalatha et al., 2014).

Aunque las actividades constructivas se realizan en un tiempo relativamente corto, supone el un cambio negativo de las funciones del ecosistema hídrico dado que en adelante las barreras y la disminución del caudal en el tramo cortocircuitado serán permanentes, incluso aguas debajo de la descarga se presentarán impactos con los picos de generación de energía (Diez & Olmeda, 2008; Ciric, 2019; Curtean et al, 2015; Oviedo, 2018). Tanto la erosión del cauce como los cambios en la calidad del agua serán permanentes, por lo que la intervención del cauce determina un punto que marca el deterioro paulatino de las funciones del ecosistema hídrico (Oviedo, 2018; Ollero, 1995).

Los cambios en la calidad del agua se presentan de diversas formas siendo el impacto más nombrado en la totalidad de las fuentes consultadas, el río resulta ser una fuente de recursos y sumidero a donde llegan residuos y contaminantes derivados o no de las actividades constructivas (Cañedo-Villareal, Barragán, Branly, & Juárez, 2015). Además de sedimentos producto de la erosión del suelo, nutrientes y biomasa liberada en la remoción de la vegetación, contribuyen al cambio de las condiciones físico-químicas del agua. Esto incide en la diversidad,

distribución o cantidad de individuos de especies con requerimientos o condiciones limitados de hábitat sea por afectación de las tasas de mortalidad, o por recambio de especies acuáticas, debido a la proliferación de aquellas con estrategias generalistas (Aguilar, 2005; Alonso, 2006).

Las barreras permanentes que suponen las obras mencionadas fragmentan el hábitat acuático en tres partes, aguas arriba de la estructura de captación donde los impactos son mínimos aunque las poblaciones de organismos se encuentran aisladas, aguas abajo de la descarga que posee un buen estado por el aporte de agua de la descarga y los tributarios, y un tramo intermedio entre estas dos donde se reduce el caudal drásticamente y no existe capacidad de dilución de contaminantes (Curtean et al, 2015). Estas barreras en el río representan una obstrucción a la movilidad de organismos, no se limita a las especies migratorias que por naturaleza son las más sensibles, sino que se extiende a todas las especies (Premalatha et al., 2014; Li, Zhang, Xu, 2015; Diez & Olmeda, 2008; Curtean et al, 2015; Briones et al, 2019; Oviedo, 2018; Ciric, 2019, Abbasi & Abbasi, 2011)

Mientras el tramo superior experimentará pérdida de variabilidad genética por aislamiento de las poblaciones, el tramo bajo tendrá un cambio en la composición y estructura debido al cambios en los parámetros fisicoquímicos del agua y los cambios de caudal que profundizan el cauce afectando el hábitat; el tramo intermedio experimenta los cambios más drásticos con la disminución significativa del caudal y la pérdida de hábitat acuático, afectación a los ciclos reproductivos y de desove (Curtean et al, 2015). Esta serie de impactos afecta en particular las especies vulnerables cuya tendencia sería a la desaparición de las poblaciones locales con la subsecuente pérdida de variabilidad genética y en general contribuiría a la pérdida de biodiversidad (Li, Zhang, Xu, 2015; Pang et al., 2015; Curtean et al, 2015; Briones et al, 2019; Moscoso & Montealegre, 2013; Oviedo, 2018; Ollero, 1995). Otros efectos como la modificación del régimen hidrológico y morfológico del río se perciben por la disminución del caudal en el tramo intermedio y aguas abajo de la descarga con los cambios repentinos del caudal derivado de la oferta hídrica en las épocas de año y la demanda en la generación de energía (Diez & Olmeda, 2008; Curtean et al, 2015; Oviedo, 2018).

El tramo intermedio experimenta un déficit hídrico lo que produce a un descenso del nivel freático, pérdida de infiltración del agua y alteración de las aguas subterráneas, esto puede promover la invasión del lecho del río por vegetación ribereña e invasoras (Montiel, et al, 2017; Diez & Olmeda, 2008). Aguas abajo se puede experimentar profundización del lecho, desestabilización de las márgenes y por lo tanto cambios en la geomorfología del río (Curtean et al, 2015; Ciric, 2019; Abbasi & Abbasi, 2011). Las principales funciones afectadas tienen que ver con la regulación hídrica, la sujeción de suelo, la regulación de nutrientes y de mediación de residuos, amortiguación de perturbaciones, control biológico, funciones de provisión de refugio, de provisión de alimento y materias primas, y culturales y de recreación.

### **4.3 Funciones y servicios ecosistémicos afectados**

El análisis de los impactos por actividades y obras constructivas de las PCH e infraestructura asociada y su efecto sobre las funciones ecológicas, mostró que el deterioro en las funciones es paulatino y de efecto en cadena, en estos proyectos las adecuaciones del terreno y las intervenciones en el cauce del río pueden causar afectaciones tan profundas que comprometerían la integridad ecosistémica al afectar los procesos y modificar su funcionamiento y por lo tanto los servicios que provee (Equihua, y otros, 2014).

Especie et al (2019), a partir de una revisión sistemática de literatura sobre proyectos de intervención hidroenergética, encontraron que el deterioro de los servicios ecosistémicos eran causados por impactos generados en etapa de operación, principalmente sobre los servicios de regulación de la erosión, seguida por la provisión de agua dulce y la provisión de alimentos, en particular la disminución en la pesca. Por otra parte, estos mismos autores, mencionan que las dinámicas de intervención de los ecosistemas de la zona afectan la generación de energía por disponibilidad de agua y generación de sedimentos, por lo que se precisa que los proyectos deben realizar la conservación y restauración de los ecosistemas de la cuenca para aumentar su vida útil, disminuir costos de mantenimiento y evitar daños, por lo que el sistema hidroeléctrico se constituye en beneficiario de los servicios ecosistémicos.

Los servicios de aprovisionamiento afectados (empleando la clasificación CICES, 2019) tienen que ver con el levante de animales de granja y la provisión de animales silvestres y peces por la intervención de zonas de pastoreo, de los bosques y ríos. Otros tipos de servicios de aprovisionamiento con potencial de ser modificados, tiene que ver con el material y acervo genético de los organismo terrestres y acuáticos necesarios para la viabilidad de las poblaciones de plantas y animales que proveen de alimento y materiales, o con potencial de ser utilizados en la zootecnia y silvicultura. Lo anterior se relaciona con algunos procesos donde la diversidad juega un papel clave dado que a mayor riqueza de especies en los bosques aumenta la capacidad del almacenamiento de carbono en la biomasa arbórea, tanto aérea como de en el suelo, también beneficia la producción de frutos del bosque y la presencia de animales de caza (Ratcliffe, Ruiz, Kändler, & Zavala, 2016).

El aprovisionamiento de alimento, minerales y de materias primas está bien documentado, la provisión de alimentos cultivados y en particular los productos no maderables del bosque son unos de los servicios más valorados en las zonas rurales y urbanas, entre estos se encuentran los materiales de construcción, medicinas, plantas ornamentales, mascotas, plaguicidas, leña, resinas, aceites esenciales, entre otras (Balvanera, 2012), los cuales pueden ver comprometidos al alterarse las funciones de provisión de biomasa por las acciones de remoción de la vegetación y la generación de energía en las fases de construcción y operación de las PCH.

El aprovisionamiento de agua, tanto superficial como subterránea, es uno de los servicios más importantes ya que es un recurso vital para las poblaciones humanas, y para el mismo proyecto hidroeléctrico, pues los servicios ecosistémicos hídricos son indispensables para la generación de este tipo de energía (Leguía, Locatelli, Imbach, Pérez, & Vignola, 2008). Igualmente, el deterioro de la función de amortiguación de perturbaciones por remoción de la cobertura vegetal genera afectación de los servicios de regulación tales control de la erosión, la amortiguación y la atenuación de los fenómenos de remoción en masas, regulación del ciclo hidrológico y regulación del flujo de agua que mantiene el control de inundaciones (Balvanera, 2012). Adicionalmente, la fragmentación y alteración de los ecosistemas debido a la remoción de

cobertura vegetal, puede incidir también en la dispersión y polinización de plantas y el control de plagas (Rebollo et al, 2019).

Las intervenciones del suelo y la capa orgánica afecta coleópteros y lombrices que prestan funciones como la dispersión de semillas, el ciclaje de nutrientes y la supresión de parásitos que permiten la fertilidad natural, el mantenimiento de la estructura del suelo y el control de enfermedades. La presencia de bacterias y hongos en el suelo contribuye a la fijación de nitrógeno, a la liberación de nutrientes y a la descomposición de la materia orgánica (Crespo, 2013). El funcionamiento del parque automotor y otras actividades derivadas de la construcción, además de la generar contaminantes, liberan nitrógeno que se deposita en todos los componentes del ecosistema afectando los organismos y la fertilidad del suelo, la regulación climática, secuestro de carbono, la purificación del agua, del aire y la polinización (Ochoa-Hueso, 2017).

Con respecto a este último, la polinización es una función del ecosistema del que dependen gran cantidad de plantas y animales, más importante aún es el papel que juegan en la producción agrícola mundial, uno de los factores que afecta a los polinizadores es la destrucción y modificación del hábitat que se realiza en la adecuación de los terrenos, lo que causa la muerte de sus poblaciones o produce la pérdida de recursos florales que hace que los polinizadores se desplacen a otras zonas con mayor disponibilidad, por otra parte se sabe que con el calentamiento global afecta los polinizadores de forma indirecta pues estos produce un traumatismo en cuanto a la sincronización entre sus ciclos de vida y las épocas de floración (Sosenski & Domínguez, 2018). Por lo que las actividades con mayor potencial de afectar la polinización en la construcción de los proyectos hidroeléctricos son la remoción de la vegetación y la generación de contaminación y gases de efecto invernadero.

#### **4.4 Manejo de impactos en estudios de caso**

#### 4.4.1 Estudio de caso 1: PCH el Retiro

Aunque los términos de referencia para la elaboración de estudios ambientales del sector hidroeléctrico en Colombia obligan a realizar un análisis de servicios ecosistémicos afectados por el proyecto, en ninguna parte del EIA se trata este aspecto, solo se menciona en el capítulo 5 que el servicio ecosistémico comprometido es el de regulación de la calidad del aire y el mantenimiento del aire limpio como consecuencia del cambio en la concentración de gases contaminantes y material particulado, lo que permite inferir una deficiencia en la identificación de impactos como los mencionados en secciones previas y el no dimensionamiento del efecto sobre la integridad ecosistémica.

El manejo de los impactos (plan de manejo ambiental) es débil al no incluir estrategias para la mitigación o corrección de efectos relacionados con la remoción de la vegetación y la afectación de ecosistemas acuáticos de manera contrastante, en el componente físico se hace énfasis al manejo de residuos, suelos y sobrantes de excavación así como a la contaminación. Muestra de esto es el plan de manejo de este estudio, que le da gran despliegue al manejo de los impactos abióticos, este componente posee 12 planes, entre estos el del uso eficiente del agua de consumo humano e industrial, manejo y tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales producto de actividades constructivas y del funcionamiento de talleres, frentes de obra e instalaciones de apoyo, captación y conducción de aguas de escorrentía, superficiales y cruces de quebradas. Otras estrategias de manejo abordan el tema de contaminación del aire orientado a la prevención mediante el control vehicular, carpado y humectación de vías, también se adoptan medidas para el manejo de residuos sólidos en la fuente y su adecuada disposición. Además se contemplan el manejo de combustibles, aceites, parque automotor y equipos.

Este proyecto posee diez zonas de depósito con propuestas de manejo como la preparación del terreno, manejo de las aguas de escorrentía y de infiltración, de los sedimentos; casi todos los depósitos se encuentran muy cercanos e incluso algunos invaden la ronda hídrica y los retiros del río Zulia así como de quebradas y drenajes intermitentes con vegetación natural, esto podría



constituir un error de diseño que se justifica explícitamente por la cercanía a los sitios de obra que pueden disminuir el transporte de sobrantes excavación y por ende la contaminación y emisión de gases. Adicional a estos hallazgos, el plan de manejo del componente abiótico posee un plan para la reutilización del descapote y parte de los residuos orgánicos en la revegetalización, el plan especifica los sitios y considera técnicas de revegetalización y empradización con especies herbáceas, más orientadas al control de fenómenos erosivos, lo que poco contribuye a la restitución de las coberturas vegetales originales y la conectividad.

Se incluye acá una propuesta para el manejo de los caudales en el tramo “semi seco”, esto es entre la captación y la descarga en etapa de operación, se trata del manejo de sedimentos que retornarían al río mediante la apertura parcial de las compuertas del desarenador durante dos horas diarias en temporada invernal, lo que contribuiría a acelerar la sedimentación en este tramo que posee poca capacidad de arrastre por la reducción en casi el 80% del caudal natural, afectando no solo el lecho y la geomorfología del río, sino a las comunidades de organismos acuáticos. Otra propuesta consiste en la compra de 20 ha para la siembra de especies arbóreas y cerramientos para evitar el ingreso de ganado, con el fin de restaurar quebradas y bosques en el tramo intermedio para aumentar la oferta hídrica. Aunque la intención es buena, la restauración necesita la lectura de los objetos de conservación a potenciar y así enfocarse en la recuperación integral del ecosistema, de otra manera estas iniciativas se considerarían acciones aisladas que poco contribuyen a recuperar la funcionalidad de los ecosistemas.

Lo anterior muestra que las medidas de manejo poseen una marcada desarticulación entre los distintos componentes, muestra de esto es la notable desproporción con respecto a las medidas de manejo del componente biótico. Compuesto por cinco planes, solo se proponen medidas clásicas de aprovechamiento forestal como tala, aserrado y disposición de residuos vegetales, se propone un plan básico para rescate, manejo y reubicación de epifitas vasculares, enriquecimiento de 2 ha con hospederos de epifitas no vasculares mediante núcleos de vegetación, un plan para ahuyentamiento, rescate y reubicación de fauna y por último contempla un plan básico para el rescate de peces durante el desvío del río Zulia para la construcción de la captación. Según lo anterior, este plan es fuerte en el mantenimiento de la calidad del agua y para

la atención de impactos relacionados con la contaminación del agua, aire y suelo. Los impactos más severos que se presentan en la preparación del terreno, en la construcción de la captación y la operación no son atendidos, además existe desarticulación, no se propone medidas para restaurar el ecosistema ribereño, ni manejo de especies amenazadas, ni para mantener los recursos genéticos, tampoco incorpora medidas para la atención de las comunidades hidrobiológicas.

#### 4.4.2 Estudio de caso 2: PCH la Chorrera

El estudio de impacto ambiental de este proyecto es muy básico y no ofrece información clara en ningún capítulo. No incorpora el concepto de funcionalidad para mantener los servicios ecosistémicos ni la integralidad, la evaluación de impactos es muy somera. El plan de manejo contempla 14 programas en los componentes bióticos y abióticos, al igual que el resto de capítulos, el nivel de detalle y de medidas para el manejo de impactos es muy básico, sin embargo no difiere mucho en cuanto al alcance observado en los otros estudios, es decir, contempla programas de manejo de remoción de coberturas vegetales y suelos, revegetalización, paisajismo, de aguas de escorrentía, programa de manejo de la generación de material particulado y ruido, manejo de aguas residuales domésticas y de manejo de desechos sólidos, entre otros de interés.

No posee estrategias de manejo de fauna acuática ni terrestre, el presupuesto total para su implementación del plan de manejo fue de \$98.000.000 lo cual es irrisorio para atender impactos en una zona de interés cultural y ambiental, esta PCH se proyectó en una zona con coberturas boscosas bien conservadas, aunque se le otorgó licencia, esta fue revocada por CORNARE en el 2014 por presiones de la comunidad, por lo que valdría la pena revisar las consideraciones de dicha corporación en este caso, pues los estudios carecen de rigor sin embargo se adiciona un factor al análisis y es el criterio de los evaluadores a la hora de otorgar licencias.

#### 4.4.3 Estudio de caso 3: Central hidroeléctrica Palagua

Este EIA realiza un buen análisis de servicios ecosistémicos afectados aunque se observa algunas deficiencias en el enlace con funcionalidad y la integridad ecológica. La evaluación de impactos es adecuada aunque no contempla muchos de los impactos encontrados en este trabajo. Los planes de manejo de este estudio se encuentran bien estructurados, cada plan se divide en proyectos. Para el componente abiótico se plantean el manejo y almacenamiento del suelo producto del descapote y su posterior reincorporación en la recuperación de distintas zonas afectadas.

Para el control de las zonas inestables o con tendencia a la erosión, se tiene un programa para la estabilidad geotécnica, donde además de las medidas clásicas de prevención, refuerzo y protección procedentes de la ingeniería civil e hidráulica, se implementa la empradización barreras vivas, arborización y el uso de agromantos, allí se describe cada una de las técnicas y se detalla el ámbito de aplicación. El programa de manejo de materiales contiene las fuentes de materiales y los detalles de la deposición de los sobrantes de excavación, en particular se observa que se proyectan cinco Zodmes (zonas de depósito de materiales sobrantes de excavación) que aprovechan depresiones naturales, por lo que se requieren 18 ocupaciones de cauce y la intervención de su cobertura natural protectora.

En este proyecto el manejo del recurso hídrico se hace forma similar a los otros planes analizados, se detallan de forma adecuada los sitios generadores de aguas residuales domésticas e industriales y los tratamientos previos al vertimiento, también el manejo del recurso hídrico de consumo humano e industrial. Dado que esta es una central hidroeléctrica pequeña, se necesita la construcción de túneles de desvío para la intervención del cauce en la zona de obras principales lo que puede afectar las aguas subterráneas, genera un tramo seco y potencia la generación de contaminación, sin embargo el trabajo en seco garantiza de alguna manera el manejo de contaminantes o el arrastre de sedimentos aguas abajo.

Además incorporan medidas como barreras, trinchos y se establece un programa de manejo de residuos de construcción y demolición como grandes generadores, por lo que los residuos generados se separan y disponen según su tipo, el manejo de los residuos orgánicos se hace mediante el compostaje o reutilización en obra. El manejo de la calidad del aire y el ruido también se hace de forma similar, por medio del mantenimiento en buen estado del parque automotor, de humectación de vías para el control del material particulado y la implementación de filtros para la planta de concretos, entre otros. Finalmente, en el componente abiótico se incluye una ficha de manejo paisajístico que aborda el tema a través de otros planes sin que se proponga una medida concreta para atender los impactos de modificación del paisaje o pérdida de cobertura vegetal y hábitats terrestres, entre otros mencionados.

En el componente biótico, el programa de manejo florístico propone el rescate de semillas, plántulas e individuos de especies según su estatus de veda, amenaza, abundancia o importancia, bajo unos criterios definidos, incluyendo las orquídeas y bromélias cuya veda es permanente en todo el territorio nacional. Se plantea además la recolección del mantillo o la capa superficial del suelo reconocido por su funcionamiento como banco de germoplasma, se propone su utilización en los procesos de revegetalización, el programa se complementa de manera con la creación de viveros para el manejo del material rescatado.

El programa de conservación y restauración de la cobertura vegetal articula algunos programas de los dos componentes, se incluye el uso de especies según sus características y potencial para su inclusión en los distintos programas, entre estas las especies amenazadas, vedadas o de importancia, identificadas en la caracterización. El programa se enfoca en revegetalizar las zonas intervenidas, establecer una franja protectora del embalse y algunos tributarios del río Samaná así como el enriquecimiento y restauración de algunas zonas, bajo este concepto se enuncian los pasos para lograr los objetivos basados en la recuperación de los procesos ecológicos afectados lo que conlleva a la restitución de la funcionalidad y los servicios ecosistémicos.

En cuanto a fauna terrestre, el programa para su manejo contiene las estrategias típicas como son el ahuyentamiento, rescate y reubicación hacia áreas receptoras, el control de la accidentalidad mediante señalización y pasos de fauna. En este plan es recurrente el tema de la conectividad mediante la protección y establecimiento de coberturas boscosas por cuanto son los corredores naturales de especies de fauna, de esta manera se minimizan traumatismos y contactos con poblaciones humanas. Por su parte el programa de manejo de ecosistemas acuáticos que obedece a los impactos de cambio en la estructura y composición de las comunidades hidrobiológicas y la interrupción de la ruta migratoria de las especies ícticas por actividades como la construcción de la presa, el desvío del río por medio de túneles que genera un tramo seco y el embalse mismo, posee una estrategia de manejo al respecto.

Esta consiste en el rescate y manejo de peces en el tramo seco de 174 m durante la construcción de las obras hidráulicas principales en el sitio de presa. Otra línea de acción es el traslado de peces migratorios para permitir el intercambio genético y disponibilidad de estas poblaciones aguas arriba del sitio de presa, este durará 4 años a partir de la entrada en operación, también se menciona el repoblamiento y monitoreo de poblaciones de peces aguas abajo, zona donde las poblaciones migrantes de importancia económica no serán tan impactadas, también se propone monitoreos en la zona embalsada de los parámetros fisicoquímicos y de la calidad del agua, de las comunidades hidrobiológicas, de macrófitas y de remoción de acumulaciones de material vegetal y todo tipo de residuos en operación. Por último, los programas de conservación y compensación se articulan con las demás estrategias del componente biótico al promover la restauración y conectividad de zonas aledañas.

Aunque este EIA asocia los impactos generados por el proyecto y su efecto sobre la prestación de servicios ecosistémicos en los escenarios con y sin proyecto, se centra principalmente en los servicios de aprovisionamiento que son los directamente percibidos por las poblaciones humanas, solo se tiene en cuenta el servicio de regulación de la erosión asociada a la obra civil y en el contexto de las obras de geotecnia para la estabilidad de taludes y obras. Aunque en el plan de manejo se observó un conjunto de estrategias que pueden prevenir, mitigar y corregir los impactos sobre los componentes bióticos y abióticos, no procuran la recuperación

de la función y la integralidad, principalmente del ecosistema acuático, donde existe un límite en cuanto esfuerzo, tiempo y efectividad de las medidas para permitir el flujo de peces en un río que presenta una alta dinámica de poblaciones ícticas de importancia comercial, de particular incidencia aguas arriba del sitio de presa. Es de anotar que este proyecto se encuentra contiguo al sitio donde se proyecta la Central Hidroeléctrica Porvenir II, sin embargo, tanto la delimitación del área de influencia como la evaluación de impactos acumulativos y sinérgicos suscitaron tensiones entre los dos proyectos. Resultando de esto, CORNARE<sup>4</sup>, mediante la solución de un recurso de reposición, ordeno modificar los planes de manejo, la individualización de impactos y modificación de algunas concesiones y permisos, entre otras decisiones. Esto muestra que, aunque los EIA posean análisis adecuados, se hallan vacíos de fondo que se pasan por alto.

#### **4.5 Análisis de impactos y medidas de manejo**

Algunos artículos revisados consideran que las PCH son una alternativa sostenible para la producción de energía (Moscoso & Montealegre, 2013) y que los países como Colombia deben explotar este potencial y para esto es necesario superar barreras legales, institucionales y económicas; lo que sugiere incluso flexibilizar la normatividad para su implementación en zonas aisladas con el fin del autoabastecimiento (Morales, et al., 2015). Según Pang, et al. (2015), faltan análisis rigurosos de los efectos de las PCH lo que limita la posibilidad de reconocer sus verdaderos impactos para revertir su desarrollo desordenado, *“además, los estudios aislados y fragmentados disponibles parecen contribuir a actitudes optimistas hacia el desarrollo de PCH”*.

Aunque se piensa que en la construcción y operación de las PCH los impactos son menores con respecto a las centrales hidroeléctricas y pueden haber técnicas para mantener los caudales ecológicos y así mantener un estado ecológico aceptable (Diez & Olmeda, 2008), ambos proyectos acarrearán impactos negativos principalmente en los organismos acuáticos y terrestres, se dan cambios en el régimen hidrológico, en el microclima local, generación de gases de efecto

---

<sup>4</sup> Corporación autónoma regional de los ríos Negro y Nare

invernadero, erosión de suelos y desestabilización de riberas, desplazamiento y desaparición de especies de fauna y flora, cambio en el uso del suelo y de las actividades socioeconómicas de los pobladores, entre otros (Tchkhaidze & Ortiz, 1995).

Para Li, et al, (2015), los impactos ecológicos de las hidroeléctricas se manifiestan a nivel de las instalaciones o facilidades, a nivel de cuenca y nivel de río. Estos valoraron las pérdidas de servicios ambientales y las llevaron en términos de potencia generada (kW/h), el resultado mostro que en las PCH de desvío, las pérdidas del ecosistema fueron mayores en la construcción de las instalaciones donde se genera degradación de la vegetación, la valoración mostró que el costo de estas pérdidas disminuye a medida que aumenta la capacidad instalada y que esta debe ser mayor a 5 MW para que los costos de la perdida ecológica sea menor (Li, et al., 2015), lo anterior se confirma con lo encontrado por Bakken, et al, (2014), para los que a menor capacidad instalada mayor fragmentación y perdida de hábitat por kW producido.

Los proyectos hidroeléctricos pueden causar reducción de la biodiversidad y la pérdida de hábitat y especies, en particular las pequeñas centrales hidroeléctricas. En un estudio de comparación de la fragmentación causada por proyectos eólicos, pequeñas y grandes hidroeléctricas, con respecto al área ocupada y producción de energía, se encontró que para producir la misma cantidad de energía se necesita gran cantidad de PCH lo que implica mayor invasión de áreas pequeñas y mayor fragmentación del paisaje y por ende la afectación a especies, donde las amenazadas son las más sensible, otra desventaja de las PCH es que la mayor parte de su infraestructura está expuesta, lo que implica mayor fragmentación y reducción de hábitats (Bakken, et al., 2014).

Los proyectos hidroeléctricos con presa afectan la vegetación de ribera pues con las subidas y bajas del nivel del agua se afecta la composición y estructura de la flora original, con la transformación a comunidades vegetales de zonas inundables y pantanos, la invasión de especies exóticas como gramíneas (Montiel, et al., 2016). En general los reservorios crean barreras en la conectividad del río, cambian el régimen hidrológico e induce a cambios físicos, químicos y

biológicos que trascienden a la parte baja del río, la alteración en la calidad del agua se refleja en los cambios en los procesos de sedimentación de partículas y nutrientes, transformaciones geoquímicas y estratificación química en el reservorio (Fantin-Cruz, et al., 2016).

Los proyectos hidroeléctricos acarrearán impactos negativos en la vegetación pues los ríos como corredores naturales propician un flujo de materia y energía para el mantenimiento de la biodiversidad donde la vegetación de ribera es particularmente sensible (Jansson, et al., 2000), los efectos de las hidroeléctricas con represa en la vegetación se manifiestan en dos plazos. A corto plazo con las obras y la inundación la vegetación de ribera desaparece y se pueden dar invasiones de plantas exóticas. En el largo plazo se presenta un aumento de la humedad, incremento de los procesos erosivos y de remoción en masa, variación del nivel freático, lo que afecta el establecimiento de la regeneración, la sucesión vegetal y provoca pérdida y recambio de especies (Li, et al., 2012).

Los efectos son más acentuados cuando se construye varios proyectos hidroeléctricos en la misma cuenca pues se afecta la hidrología, hidráulica, la topografía de la cuenca, la ecología acuática y terrestre. En la vegetación el efecto se manifiesta con el cambio en la distribución de las especies de vegetación de ribera, cambiaron en la composición y estructura florística debido a la alta fragmentación y pérdida de hábitat, en especial la pérdida de vegetación de sucesiones avanzadas (Li, et al., 2012). Las barreras de los proyectos hidroeléctricos fragmentan los ecosistemas rivereños lo que impide la dispersión de semillas, en especial las que poseen mecanismos específicos como la flotación, por lo que en el tiempo se puede dar un recambio por especies de otros ecosistemas o generalistas, desarrollando diferentes floras en los distintos tramos del río fragmentado (Jansson, et al., 2000).

Uno de los problemas relacionados con las PCH tiene que ver con los caudales ecológicos y que la capacidad instalada debe ser acorde con la oferta hídrica. Para que los ecosistemas acuáticos y terrestres sean funcionales en la etapa de operación es necesario que se garantice el mantenimiento de un caudal aguas abajo para no generar impactos negativos, principalmente



sobre los organismos acuáticos, aun así, en la China es común encontrar que se sacrifican los servicios ecosistémicos para maximizar los beneficios económicos (Pang, et al., 2015).

La legislación colombiana contempla el mantenimiento de un caudal ecológico, al respecto se han propuesto metodologías evaluadas en diferentes partes del mundo con el fin de hacer compatible el desarrollo hidroeléctrico de las PCH con el mantenimiento aceptable de las condiciones ecológicas de las cuencas (Diez & Olmeda, 2008). Una de las herramientas para la aprobación de los proyectos hidroeléctricos en el país es la metodología para evaluar el caudal ambiental (Anla, 2013, Grecco & Salazar, 2012), esta depende de unos índices muy elaborados en varios componentes en los que se deben calificar las especies según su dependencia o requerimientos de agua. Sin embargo para el caso de Colombia existe poca información sobre los requerimientos hídricos de las especies dado principalmente por su alta biodiversidad (Diez & Olmeda, 2008), lo que limita esta metodología.

Algunas estrategias para la restauración de los ecosistemas en proyectos hidroeléctricos deben consistir, en primera medida, con la prevención implementando técnicas constructivas respetuosas con el ambiente y el control de las fuentes contaminantes, la implementación de barreras vivas como aislante así como el control de la eutrofización, revegetalizar las zonas intervenidas, el fortalecimiento de la vegetación de ribera e incluir sistemas para la movilidad de los peces (Ollero, 1995). Se debe realizar una la investigación de los patrones de dispersión de plantas, además el uso de modelos puede aportar como estrategia para la conservación de las especies de plantas más vulnerables con el fin de implementar acciones tales como proporcionar hábitats escalonados que aseguren la recolonización de las áreas en procesos de restauración (Fink & Scheidegger, 2018).

Las compensaciones de los proyectos hidroeléctricos pueden estar enfocadas en la recuperación de la funcionalidad del ecosistema y de sus servicios. Mediante el uso de herramientas digitales, Vogl, et al., (2016), identificaron la necesidad de la gestión de medidas de manejo complementarias en proyectos hidroeléctricos, para el adecuado manejo y mantenimiento

de los servicios ecosistémicos para la provisión de agua y la retención de sedimentos, por lo que mediante el uso de software RIO e InVest, se identificaron las mejores alternativas y sitios a priorizar en la misma cuenca para la implementación de estrategias encaminadas a mejorar los servicios del ecosistema.

En general, las herramientas y los modelos demostraron que es posible enfocar los esfuerzos en acciones que son importantes para dirigir las inversiones de conservación para obtener servicios ambientales fortaleciendo la producción de energía hidroeléctrica, además la metodología utilizada se puede usar para identificar y espacializar los impactos de los proyectos hidroeléctricos. Se concluyó que los proyectos hidroeléctricos pueden obtener beneficios del buen manejo de los territorios mediante la mejora de los servicios ecosistémicos en la captación adoptando estrategias de manejo de coberturas y suelos (Vogl, et al., 2016).

Entre las estrategias propuestas para el manejo de ecosistemas acuáticos, se cuenta con las escaleras o pasos para que los peces puedan superar la barrera que impone la estructura de captación o desviación del caudal de una central hidroeléctrica parece viable (Ronda, et al, 2013), para otros autores es cuestionable pues estas estructuras se convierten en trampas para peces debido a que no se analizan las particularidades y hábitos migratorios de las especies (Pelicice & Agostinho, 2008). Aunque en Colombia no se tiene documentación de la implementación de esta estrategia, sería válido implementarla en las PCH pero basándose en estudios serios que ajuste el diseño de esta estructura a las especies afectadas y que además sean extensivas a otros organismos acuáticos.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La fase previa de la construcción de una PCH, donde se diseña el proyecto es fundamental si se quieren prevenir los impactos generados por las actividades constructivas. En la construcción de estos proyectos, se presentan impactos sobre los ecosistemas por el desplazamiento de población humana del área del proyecto hacia otras zonas con coberturas naturales en la misma cuenca, para el establecimiento de actividades económicas en las que generalmente se afectan zonas boscosas. Aunque las PCH se consideran proyecto de bajo impacto, se estableció que posee gran número de obras y actividades, concentradas en la construcción de la infraestructura hidráulica y otras obras complementarias con el potencial de generar cambios en la funcionalidad ecológica y los bienes y servicios ecosistémicos.

La adecuación del terreno es la actividad más impactante de la construcción de las PCH, en esta se hace remoción de la vegetación mediante tala rasa, se remueve la capa superficial del suelo y se hacen excavaciones, esta secuencia de trabajo promueve una serie de impactos que remontan de forma sinérgica a otros de orden superior. De esta manera, la remoción de la cobertura vegetal implica la pérdida y liberación de biomasa, la desprotección del suelo y por ende efectos sobre la infiltración, erosión, fenómenos de remoción en masa, pérdida de la calidad del agua y por ende efectos en el agua superficial y subterránea. En el componente biótico los impactos se generan por la afectación a las masas boscosas, es usual que las PCH sean diseñadas en sitios aislados y bien conservados lo que implica un mayor impacto incluso en áreas protegidas, entre estos se encuentran pérdida de cobertura vegetal, fragmentación y pérdida de conectividad con repercusiones en la movilidad de especies, pérdida de especies de interés y pérdida de variabilidad genética.

La circulación de vehículos y el funcionamiento de maquinaria y equipo en la construcción de PCH generan contaminación del aire por emanación de gases y material particulado que puede tener efectos en la salud de las comunidades a nivel local. También la contaminación del

agua es un problema ya que los ríos actúan como sumidero a donde van a parar todos los residuos y contaminantes no tratados afectando las comunidades hidrobiológicas y las poblaciones humanas asentadas aguas abajo del proyecto que se aprovisionan de biomasa y agua de estos sistemas. En la fase de operación de la PCH se perciben impactos principalmente sobre los ecosistemas acuáticos por la fragmentación del río, el cambio de la geomorfología y la calidad del agua, lo que genera que las poblaciones de organismos se fragmenten en tres partes y experimenten cambios en su composición y estructura por cuenta de los cambios en el caudal y la calidad del agua, por las barreras físicas y la pérdida del hábitat.

Dado el enfoque sistémico e integral asociado a los ecosistemas; la funcionalidad y la pérdida de resiliencia tiene consecuencias marcadas que se manifiestan secuencialmente desde la remoción de la vegetación y efectos colaterales sobre la diversidad y su interacción con los demás componentes de los ecosistemas. Esto se hace palpable con la pérdida progresiva de funciones y servicios ecosistémicos de provisión de peces, agua y recursos del bosque o los culturales como la recreación y esparcimiento con la pérdida de espacios naturales y sitios culturales. A su vez se perciben deterioro de funciones de amortiguación de perturbaciones, de polinización, de regulación hídrica, regulación de nutrientes, función de hábitat, formación de suelos, ya que la pérdida de cobertura boscosa promueve el deterioro de la integridad ecológica y resiliencia por afectación a los procesos básicos como la producción primaria, el mantenimiento de la biodiversidad y especies clave.

En la revisión de EIA de proyectos se pudo evidenciar que si consideran, así sean de manera general, los principales impactos, dejando de lado u otorgando calificaciones moderadas o irrelevantes a otras que deben ser tratadas de forma central lo cual deriva de forma conexas en la viabilización ambiental de los proyectos. Por otra parte, los planes de manejo se enfocan al control de impactos del componente abiótico con medidas clásicas de prevención y mitigación de la contaminación, las cuales tienen gran despliegue pues se pueden adoptar de forma general entre proyectos. Las estrategias de manejo del componente biótico también parecen orientarse a medidas clásicas y poco articuladas entre sí, dejando de lado las particularidades y especificidad

necesaria para la gestión de los impactos, más aún bajo los altos niveles de diversidad de ecosistemas y organismo que posee el país

Aunque los términos de referencia del sector y las guías para la presentación de estudios ambientales exigen la inclusión de numerales dedicados a discernir sobre los servicios ecosistémicos afectados, al parecer no es claro el alcance ni el propósito, así mismo, aunque en este trabajo se ha mostrado una línea de correlación entre resiliencia, integridad, funciones y servicios; la adopción de estos criterios para el adecuado análisis de beneficios o servicios ecosistémicos afectados, es ambiguo, Esto en adición de una evaluación de impactos deficientes que ocultan aquellos impactos realmente significativos, no permiten que las medidas de manejo resulten eficientes para reducir el deterioro causado. Con respecto a lo anterior, Calderón, Martínez, & Arrieta (2013), consideran que las metodologías para la evaluación de impacto en los procesos de licenciamiento en Colombia poseen alto grado de incertidumbre y sesgo, además no existe relación entre la complejidad de los impactos y las medidas de manejo, lo que genera impactos no gestionados y pasivos ambientales que siguen deteriorando los ecosistemas incluso después del desmantelamiento de este.

La intervención de las zonas boscosas causan el mayor deterioro de las funciones y la integridad ecológica, afectando la prestación de servicios ecosistémicos en las zonas donde se construyen PCH, por lo que es indispensable que estos proyectos sean diseñados y pensados en zonas donde las estrategias de manejo y compensación contribuyan a la restauración del ecosistema afectado por otras actividades económicas. En concordancia con el gran potencial hidroenergético del país, estos proyectos no se deberían ubicar en zonas boscosas, sino en áreas intervenidas para disminuir los impactos, para que mediante las medidas de manejo se restaure los bosque ribereños y junto con las estrategias de compensación se aumente la adicionalidad y la no perdida neta de biodiversidad en la cuenca de manera que se recuperen los servicios ecosistémicos en favor de la generación hidroeléctrica y las comunidades del área del proyecto.

Las estrategias exitosas para devolver la funcionalidad a los ecosistemas afectados por las PCH consisten en formular estrategias pensadas en las lecturas de los atributos de los ecosistemas intervenidos y su potenciación en procesos de restauración basado en los trece pasos que contempla Vargas (2011) para la recuperación de ecosistemas según su grado de intervención, este método se incorporó para la central hidroeléctrica Palagua, donde su éxito dependerá en buena parte de la financiación y la voluntad para llevar a cabo el plan. Otras estrategias deben incluir la bioingeniería en función de la recuperación de la función ecológica, entre estas se debe conformar bancos de suelo para la su reincorporación de suelos en la recuperación de las zonas afectadas y la estabilidad geotécnica de taludes, revegetalización de zonas de depósito y obras hidráulicas, entre otras.

Algunas de las técnicas de bioingeniería consisten en la utilización de agromantos y lanzado de lodos, en los que se tienen que incorporar semillas de especies herbáceas nativas y de ser necesario exóticas como pastos o la recolección del mantillo o capa superficial del suelo que funciona como banco de semillas para la reincorporación en la recuperación de zonas intervenidas. También la utilización de trinchos con especies de árboles o guadua propagados asexualmente, revegetalización por técnicas de nucleación, franjas protectoras, arreglos agrosilvopastoriles, cercas vivas; además de otras estrategias para la atracción y conservación de fauna como la instalación de postes y perchas, madrigueras artificiales, incorporación de árboles de especies nativas con flores y frutos atractores de fauna dispersora y polinizadora. El rescate de semillas y plántulas es fundamental, también la implementación de viveros ya que cumple con varios propósitos atendiendo impactos importantes como la conservación de la variabilidad genética de las poblaciones de flora afectadas, también rebaja costos y reduce la contaminación generada por el proyecto siempre y cuando los viveros queden cerca de la zona de obras.

En el proceso constructivo se debe conservar la mayor cantidad posible de vegetación, especialmente en la ribera del río, una vez se construyan las obras se debe restablecer la conectividad entre los corredores afectados, reconectando los fragmentos mediante franjas de conectividad que rodeen las obras, siempre utilizando especies nativas de rápido crecimiento e introduciendo paulatinamente otras esciófitas que actúan como especie sombrilla, en aquellas

zonas donde se interrumpen la conectividad como vías, se pueden utilizar estrategias como los pasos de fauna y paso a dosel con arboles de copa ancha y perchas, puentes o túneles para fauna, allí la sensibilización es fundamental para que trabajadores y pobladores sean los veedores de la conservación. Los planes y estrategias deben estar articulados entre si, de manera que los programas de manejo sean complementarios entre ellos y con los planes de compensación por pérdida de biodiversidad, el de manejo de especies leñosas vedadas y el de enriquecimiento para la compensación de epifitas vasculares y no vasculares.

Existen estrategias para la recuperación de los ecosistemas terrestres, pero para el ecosistema hídrico fragmentado por las barreras y por la generación de energía que deja un tramo seco del río, no es tan claro. Dado que la fragmentación del río es uno de los impactos mas severos, menos gestionados y que afecta de forma grave la funcionalidad ecológica haciendo que el recurso íctico se afecte sensiblemente, se debe investigar las alternativas para que las poblaciones de peces no se vean deterioradas y permitir la conectividad entre los distintos tramos fragmentados. Así mismo se debe profundizar sobre las metodologías para el cálculo del caudal ecológico y así generar una metodología que sea aplicable al trópico, por lo pronto, los proyectos deben asegurar la circulación del caudal ecológico en todas las temporadas del año y no comprometerlo en temporadas secas para asegurar la generación de energía. Se debe investigar e implementar estrategias de paso de peces entre las zonas fragmentadas, para ayudar al movimiento migratorio o transito de peces y organismos acuáticos.

## 6. Referencias bibliográficas

Abbasi, T., & Abbasi, S. (2011). Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2134–2143.

Aguilar, A. (agosto de 2005). Los peces como indicadores de la calidad ecológica del agua. *Revista Digital Universitaria*, 6 (8).

Alonso, A. (Mayo de 2006). Valoración del efecto de la degradación ambiental sobre los macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. *Ecosistemas*, 15(2), 101-105.

Álvarez-Hincapié, F. (Julio-diciembre de 2010). Capital natural crítico y función de hábitat como aproximación a la complejidad ambiental. *Revista Lasallista de Investigación*, 7(2), 132-149.

Andrade, G. I., & Castro, L. G. (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia, invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*, 16(30), 53-71.

Anla. (2013). Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Bogotá, D.C.: Ministerio del medio ambiente, Autoridad nacional de licencias ambientales.

Arboleda, J. (2008). Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Medellín.

Arias, L. (2016). Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. *Revista Facultad de Ingeniería*, 12(13), 84-96.

Bakken, T., Aase, A., Hagen, D., Sundt, H., Barton, D., & Lujala, P. (2014). Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and



large-scale hydropower and wind power projects. *Journal of Environmental Management*, 140, 93-101.

Balvanera, P., & Cotler, H. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. México: Conabio.

Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 21(1-2), 136-147.

Briones, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2019). Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 233, 33-42.

Brown, g., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P., Patrón, J., Bueno, J., . . . Rodriguez, C. (2001). Diversidad y Rol Funcional de la Macrofauna Edáfica en los Ecosistemas Tropicales Mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana (n.s.) Número especial*, 1, 79-110.

Calderón, J., Martinez, R., & Arrieta, G. (2013). Métodos de evaluación de impacto ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 43-54.

Canter, L. (1998). *Manual de evaluación del impacto ambiental: Tecnicas para la elaboración de estudios de impacto*. McGraw-Hill, Segunda edición.

Cañedo-Villareal, R., Barragán, M., Branly, S., & Juárez, O. (Enero-junio de 2015). Calidad de vida y medio ambiente: residuos sólidos y bienestar en tres escuelas de la cuenca alta del río La Sabana, Acapulco, Guerrero, México. *Población y Salud en Mesoamérica*, 12(2), 1-26.

Cayuela, L. (Septiembre de 2006). Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas*, 15(3), 192-198. .

CICES. (2019). *The Common International Classification of the Ecosystem Services*, V 5.1. Recuperado el 15 de 9 de 2019, de <http://cices.eu>

Ciric, R. (2019). Review of techno-economic and environmental aspects of building small hydroelectric plants - A case study in Serbia. *Renewable Energy*, 140, 715-721.

Conesa, V. (2010). *Guía metodologica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, Cuarta edición.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., . . . van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital . *Nature*, 387, 253-260.

Crespo, G. (2013). Funciones de los organismos del suelo en el ecosistema de pastizal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(4), 329-334.

Curtean, A., Pauli, S., Banaduc, D., Didenko, A., Sender, J., Mari'c, S.,.....Zakeyyudin, S. (2015). Environmental aspects of implementation of micro hydro power plants-A short review. *Transylvanian review of sistematical and ecological research*. 17 (2), 179-198.

Devimar. (2017). Estudio de impacto ambiental para la construcción de la segunda calzada túnel - San Jerónimo UF 3 y 1 del Proyecto autopista al mar 1. Antioquia, Medellín.

Diez, J., & Olmeda, S. (2008). Diseño ecohidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos. *Revista Energética*, 39, 65-76.

DEO. (2018). Estudio de impacto ambiental para la pequeña central hidroeléctrica PCH el Retito. Plyma, planes y manejos ambientales. Desarrollos Energéticos de Oriente S.A.S. E.S.P.

Doornbos, B. (2015). El valor de los bosques andinos en asegurar agua y suelo en un contexto de creciente riesgo climático:¿(re) conocemos lo imperdible? *Bosques Andinos*, 3, 1-13.

Equihua, M., García, N., Pérez-Maqueo, O., Beñítez, G., Kolb, M., Schmidt, M., y otros. (2014). Integridad ecológica como indicador de la calidad ambiental. CONABIO, INECOL.

Equihua, M., Pérez, O., Beñítez, G., Huerta, A., García, N., Kolb, M., y otros. (2015). Integridad ecológica para la gestión de la sustentabilidad ambiental frente al cambio climático.

Escalada, A. (2010). Funciones ecosistémicas y diversidad de los ríos: Reflexiones sobre el concepto de caudal ecológico y su aplicación en el Ecuador. *Polemika*, 2(5), 41-47.

Especie, M., Carvalho, P., Bacile, M., Mesquita, V., Ferreira, L., Rodriguez, M., . . . Ganança, F. (2019). Ecosystem services and renewable power generation: A preliminary literature review. *Renewable Energy*, 140, 39-51.

Fantin-Cruz, I., Pedrollo, O., Girard, P., Zeilhofer, P., & Hamilton, S. (2016). Changes in river water quality caused by a diversion hydropower dam bordering the Pantanal floodplain. *Hydrobiologia*, 768, 223–238.

Fink, S., & Scheidegger, C. (2018). Effects of barriers on functional connectivity of riparian plant habitats under climate change. *Ecological Engineering*, 115, 75-90.

Gallego, J. (2015). Políticas para el aprovechamiento del potencial hidroenergético en Colombia mediante pequeñas centrales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Grecco, A., & Salazar, L. (2012). Metodología para la determinación de los caudales de garantía ambiental. Medellín: Empresas públicas de Medellín.

Hofstede, R. (2011). Los servicios del ecosistema páramo: una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

INEA. (1997). Guía para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía. Instituto de ciencias nucleares y energías alternativas (INEA).

ISA S.A. (2015). Estudio de impacto ambiental línea de transmisión eléctrica Chinú-Montería y subestaciones asociadas. Antioquia, Medellín.

ISAGEN. (2017). Proyecto Hidroeléctrico Palagua. ISAGEN S.A. E.S.P.

Jansson, R., Nilsson, C., & Renofalt, B. (2000). Fragmentation Of Riparian Floras In Rivers With Multiple Dams. *Ecology*, 81(4), 899-903.

Leguía, E., Locatelli, B., Imbach, P., Pérez, C., & Vignola, R. (Enero de 2008). Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica. *Ecosistemas*, 17(1), 16-23.

LHC. (2012). Estudio de impacto ambiental PCH la Chorrera-San Carlos, Antioquia. LHC Consultores Ambientales.

Li, X., Zhang, J., & Xu, L. (2015). An evaluation of ecological losses from hydropower development in Tibet. *Ecological Engineering*, 76, 178–185.

MADS. (2017). Resolución 1519 del 26 de julio de 2017. Terminos de referencia - EIA - Proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. Bogotá D.C.: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Autoridad nacional de licencias ambientales.

MADS, & PNUD. (2014). Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Colombia ante el Convenio de Diversidad Biológica. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Bogotá, D.C., Colombia.

Manson, R., & Jardel, E. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. En CONABIO, *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (págs. 131-184.). Mexico.

Mendoza, J., Amaya, J., Terán, P., Ramos, A., Vargas, N., Cediell, M., . . . Palacios, M. (2012). Política Nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos–PNGIBSE. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible.

Medina-Villar, S. (Septiembre-Diciembre de 2016). Impactos ecológicos de los árboles exóticos invasores en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales y de ribera. *Ecosistemas*, 25(3), 116-120.

Messa, M., Polo, N., & Gómez, J. (2014). Evaluación de la viabilidad del montaje de una pequeña central hidroléctrica - PCH - para EMCALI con una herramienta tecnico-económica-ambiental. Santiago de Cali: Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Especialista en Economía Ambiental y Desarrollo sostenible. Universidad de San Buenaventura.

Montiel, M., Gatti, M., Fontana, J., Zanone, I., & Zaninovich, S. (2017). Caracterización de las Comunidades Vegetales de la Reserva Natural Rincon de Santa Maria (Ituzaingó, Ctes) y el impacto de la represa hidroeléctrica Yacyretá sobre ellas. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica - claves para el desarrollo*, 3, 243-250.

Morales, S., Álvarez, C., Acevedo, C., Diaz, C., Rodriguez, M., & Pacheco, L. (2015). An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1650-1657.

Moscoso, L., & Montealegre, J. (2013). Identificación y valoración de impactos sobre la flora por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas (Sonsón-Antioquia). *Journal of Engineering and Technology*, 2(2), 68-81.

Moscoso-Marín, L., & Montealegre, J. (Julio-Diciembre de 2013). Impactos sobre la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia. *Producción + Limpia*, 8(2), 85-93.

Ochoa-Hueso, R. (enero-abril de 2017). Consecuencias de la deposición de nitrógeno sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: Una aproximación general desde la ecología de ecosistemas. *Ecosistemas*, 26(1), 25-36.

Ollero, J. (1995). Restauración ambiental, social y territorial frente a los impactos generados por los embalses. *Geographicalia*, 32, 139-153.

Otavo, S., & Echeverría, C. (2017). Fragmentación progresiva y pérdida de hábitat de bosques naturales en uno de los hotspot mundiales de biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 924–935.

Oviedo-Ocaña, E. (2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. *Revista de la Universidad Industrial de Santander*, 50(3).

Oyarzún, C., Nahuelhua, L., & Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(3) - 21(1), 88-95.

Pang, M., Zhang, L., Ulgiati, S., & Wang, C. (2015). Ecological impacts of small hydropower in China: Insights from an emergy analysis of a case plant. *Energy Policy*, 76, 112–122.

Pelicice, F. M., & Agostinho, A. A. (2008). Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers. *Conservation biology*, 22(1), 180-188.

Peña, M., Feeley, K., & Duque, A. (2018). Effects of endogenous and exogenous processes on aboveground biomass stocks and dynamics in Andean forest. *Plant Ecology*, 219, 1481-1492.

Poveda, G., & Mesa, Ó. (1995). Efectos hidrológicos de la deforestación. *Energética*, 16, 91-102.

Premalatha, M., Abbasi, T., Abbasi, S., & Abbasi, T. (2014). A critical view on the eco-friendliness of small hydroelectric installations. *Science of the Total Environment*, 481, 638–643.

Ratcliffe, S., Ruiz, P., Kändler, G., & Zavala, M. (2016). Retos y oportunidades en el uso de Inventarios Forestales Nacionales para el estudio de la relación entre la diversidad y el aprovisionamiento de servicios ecosistémicos en bosques. *Ecosistemas*, 25(3), 60-69.

Rebollo, S., Rey-Benayas, J., Villar-Salvador, P., Pérez-Camacho, L., Castro, J., Molina-Morales, M., . . . Ballesteros, L. (2019). Servicios de la avifauna (high-mobile link species) en mosaicos agroforestales: regeneración forestal y regulación de plagas. *Ecosistemas*, 28(2), 32-41.

Restrepo, J. (Abril-junio de 2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Revista de la academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 39(151), 250-267.

Rincón-Ruíz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A., Tapia, C., David, A., Arias-Arévalo, P., & y Zuluaga, P. (2014). Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).

Rojas, C., Bocanegra, J., & Mariño, J. (2014). Biodiversidad y servicios ecosistémicos en la gestión del suelo-subsuel. *Opera*, 14, 9-26.

Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Rev Cubana Hig Epidemiol*, 44(2).

Ronda, F. J. S., Córdoba, F. J. B., Pérez, J. F. F., Legazpi, J. R., Vega, A. G., González, N. R., ... & de Azagra Paredes, A. M. (2013). Pasos para peces: escalas y otros dispositivos de paso. *Notas técnicas del CIREF*, 7, 17.

Sandoval, W. (2018). Capítulo 6: Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas. En *Diseño de Obras Hidrotécnicas* (págs. 247-277).

SEA. (2012). Guía para la evaluación de impacto ambiental de centrales de generación de energía hidroeléctrica de potencia menor a 20 MW. Servicio de Evaluación Ambiental. Chile.

Sierra, F., Sierra, A., & Guerrero, C. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico (Colombia)*, Edición 75 Enero - Diciembre, 73 - 85.

SINAC. (2016). Marco conceptual y guía metodológica para la Integridad ecológica en Áreas Silvestres Protegidas de Costa Rica. San José-Costa Rica: Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

Sosenski, P., & Domínguez, C. (2018). El valor de la polinización y los riesgos que enfrenta como servicio ecosistémico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 89(3), 961-970.

Tchkhaidze, K., & Ortiz, R. (1995). Impacto ambiental de la producción de energía eléctrica. *Energía y computación*, IV (2-segundo semestre, edición 10).

UNESCO. (2010). *Servicios de los ecosistemas y el bienestar humano*. Bilbao, España.

UPME. (2015). *Plan de expansión de referencia generación – transmisión 2015 – 2029*. Bogotá D.C.: Unidad de planeación minero energética.

UPME. (2019). Unidad de planeación minero energética. Recuperado el 01 de 12 de 2019, de Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2015 - 2029: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Expansion-2015-2029.aspx>

UPME. (2015). Atlas: Potencial Hidroenergético de Colombia.

UPME. (2013). Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. Bogotá D.C.: Unidad de planeación minero energética. Unión Temporal ACON – OPTIM.

Vargas, O., Díaz, J., Reyes, S., & Gómez, P. (2012). Guías Técnicas Para La Restauración Ecológica De Los Ecosistemas de Colombia. Guía técnica, Grupo de Restauración Ecológica GREUNAL. Convenio de Asociación No. 22 entre Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), Bogotá D.C.

Vargas, O. (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta biológica Colombiana*, 16(2), 221 - 246.

Vogl, A., Denny, J., Wolny, S., Johnson, J., Hamel, P., Narain, U., & Vaidya, A. (2016). Managing forest ecosystem services for hydropower production. *Environmental Science & Policy*, 61, 221–229.