

Análisis de la vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia^a

Analysis of the Viability of Hydroelectricity in Colombia

Javier Orlando Bacca-García^b, Javier Toro^{c, d}

RESUMEN

Las hidroeléctricas se han convertido en la principal forma de generación de energía eléctrica en el país, en especial las centrales de embalse, las cuales han sido implementadas teniendo en cuenta las condiciones topográficas e hídricas del territorio nacional, junto con las dinámicas económicas y políticas que promueven el desarrollo de este tipo de infraestructura. Sin embargo, en el país se han presentado condiciones climáticas (ciclo ENOS/Oscilación Sur) que han afectado de manera significativa los niveles de almacenamiento de las represas; adicionalmente la construcción y funcionamiento de este tipo de infraestructuras genera múltiples impactos ambientales en las comunidades cercanas y sus territorios, produciendo inquietudes sobre la pertinencia de depender en un alto porcentaje de este modelo de generación. De acuerdo con lo anterior, se hace un análisis del modelo actual desde un enfoque ambiental, teniendo en cuenta las dinámicas y contextos en las que se instauran este tipo de proyectos. Con este objetivo se analizan los impactos ambientales relacionados con la ejecución y el funcionamiento de las represas, así como la vulnerabilidad en la prestación del servicio en relación con la variabilidad climática y los fenómenos meteorológicos que inciden en el territorio nacional. Lo anterior se hace mediante una revisión exhaustiva de literatura y con la propuesta de un análisis de vulnerabilidad, basado en el volumen útil diario de los embalses que aportan al Sistema Interconectado Nacional (SIN). De este modo se determina la alta dependencia que se tiene en una sola tecnología, haciendo necesario replantearse la complementariedad del sistema mediante la implementación y fortalecimiento de otras fuentes alternativas de energías renovables que generen una canasta energética más diversa y estable.

PALABRAS CLAVE: Central hidroeléctrica; Impacto ambiental; Variabilidad climatológica; Energías alternativas.

ABSTRACT

Hydroelectric plants have become the main form of electricity generation in the country, especially reservoir plants, which have been implemented taking into account the topographic and water conditions of the national territory, the economic and political dynamics that promote the development of this type of infrastructure. However, the country has experienced climatic conditions (ENSO/Southern Oscillation cycle) that have significantly affected reservoir storage levels; additionally the construction and operation of this type of infrastructure generates multiple environmental impacts in the nearby communities and their territories, producing concerns about the relevance of depending on a high percentage of this model. In line with the above, an analysis of the current model is made from an environmental perspective, taking into account the dynamics and contexts in which this type of project is established, for this purpose, environmental impacts that are directly related to the implementation and operation of dams are analysed, as well as vulnerability in the provision of the service in relation to climate variability and meteorological phenomena affecting the national territory. This is done through an exhaustive review of literature and the proposal of a vulnerability analysis based on the daily useful volume of reservoirs that contribute to the National Interconnected System (SIN), so as to determine the high dependency on a single technology, making it necessary to rethink the complementarity of the system through the implementation and strengthening of other alternative sources of renewable energy that generate a more diverse and stable energy bag.

KEY WORDS: Hydroelectric power station; Environmental impact; Climatological variability; Alternative energies.

a Artículo derivado de la tesis de maestría en Medio Ambiente y Desarrollo "Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia (2019)".

b Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales, Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá, Colombia. ORCID Bacca-García, J.O.: 0000-0003-3444-6978

c Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. ORCID Toro, J.: 0000-0001-6675-5148

d Autor de correspondencia: jjtoroca@unal.edu.co

Introducción

El mundo actual presenta una mayor apropiación de los recursos naturales, influenciada por dinámicas sociales y económicas como el consumismo, el capitalismo y la globalización, que sumada al crecimiento exponencial de la demografía global conlleva a una presión alta sobre los ecosistemas. De acuerdo con Londoño (2006, p. 29) “la problemática ambiental es el paradigma de la sociedad de consumo que predomina y cuyo tren de utilización de recursos naturales se viene consolidando casi sin fronteras en todas las naciones, sean desarrolladas o en vía de desarrollo”. Adicionalmente, en Colombia las políticas públicas han posicionado el sector minero-energético como factor importante para el impulso de la economía, propiciando una mayor presión sobre los mismos.

El sector hidroeléctrico es partícipe de esta tendencia y en el país se ha visto reflejada por un aumento en la producción y un estímulo continuo a este tipo de proyectos, consolidándose como la tecnología más importante dentro de la canasta energética, aportando en los últimos años aproximadamente al 70% del total de la generación eléctrica.

Este tipo de generación ha presentado múltiples impactos y oposición pública, especialmente a la construcción y puesta en marcha de grandes centrales, como lo evidenciado en los proyectos de El Quimbo, Hidrosogamoso, Hidroituango, entre otros; debido a las diversas afectaciones en las zonas de influencia, que se suman a un factor agravante como lo es la variabilidad climática, en especial el fenómeno ENOS o El Niño – Oscilación del Sur en su fase cálida y húmeda.

Teniendo en cuenta esta problemática, el objetivo de este trabajo es resaltar, de manera general, la dependencia del país sobre la generación basada en grandes centrales hidroeléctricas, su relación con los impactos ambientales y la variabilidad climática presente en el territorio nacional a partir de un análisis en los embalses para determinar la vulnerabilidad del sistema eléctrico. Primero, se enuncian las generalidades de la generación de energía hidroeléctrica en el país, posteriormente, se abordan los principales impactos ambientales relacionados con este tipo de infraestructura (grandes centrales hidroeléctricas de embalse), seguidos del análisis de la vulnerabilidad

del servicio eléctrico en relación con la variabilidad climática del país, en dos lapsos específicos, y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones sobre el tema.

Generación de energía hidroeléctrica en Colombia

Colombia cuenta con generación eléctrica a partir de las siguientes matrices: hidráulica, térmica de gas, térmica de carbón, líquidos, gas-líquidos, viento y biomasa. De acuerdo con el informe de la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME (2018), la energía eléctrica que se obtiene a partir de tecnología hidráulica ocupa el primer lugar, con una participación del 69,18% de la producción total, seguido de la producción térmica de gas con un 9,61%. Para el año 2016, la generación a partir de la hidroelectricidad se redujo un poco, debido a la presencia del Fenómeno del Niño, con una participación del 67,1% del total comparada a 2015 de 70,39%.

En relación con los países vecinos, Colombia posee el porcentaje más alto de generación hidroeléctrica (Figura 1), sin embargo, Brasil por tradición tiene mayor dependencia con respecto a esta tecnología, mientras Ecuador y Perú presentan una tendencia a la baja con respecto a su uso. Los países miembro de la OCDE presentan una dependencia relativamente baja a la hidroelectricidad, en un rango entre el 10% y el 25%, por el contrario, Colombia presenta una alta dependencia de esta, con un rango de producción entre el 65% y el 80%, por lo tanto, se puede inferir que el país es más susceptible si se presenta fallas en el sector, dado el bajo aporte de las demás tecnologías a la canasta energética.

En el país la generación eléctrica se encuentra integrada mediante dos sistemas, el primero es el Sistema Interconectado Nacional (SIN), que corresponde principalmente a la zona de la región Andina y Caribe, mientras el segundo está compuesto por las Zonas No Interconectadas (ZNI), principalmente en las zonas aisladas del país. Según Toledo (2013), la mayor parte de la generación eléctrica en el SIN se deriva de la hidroelectricidad en un 80% y el restante 20% de centrales térmicas, con una participación pequeña de las pequeñas centrales

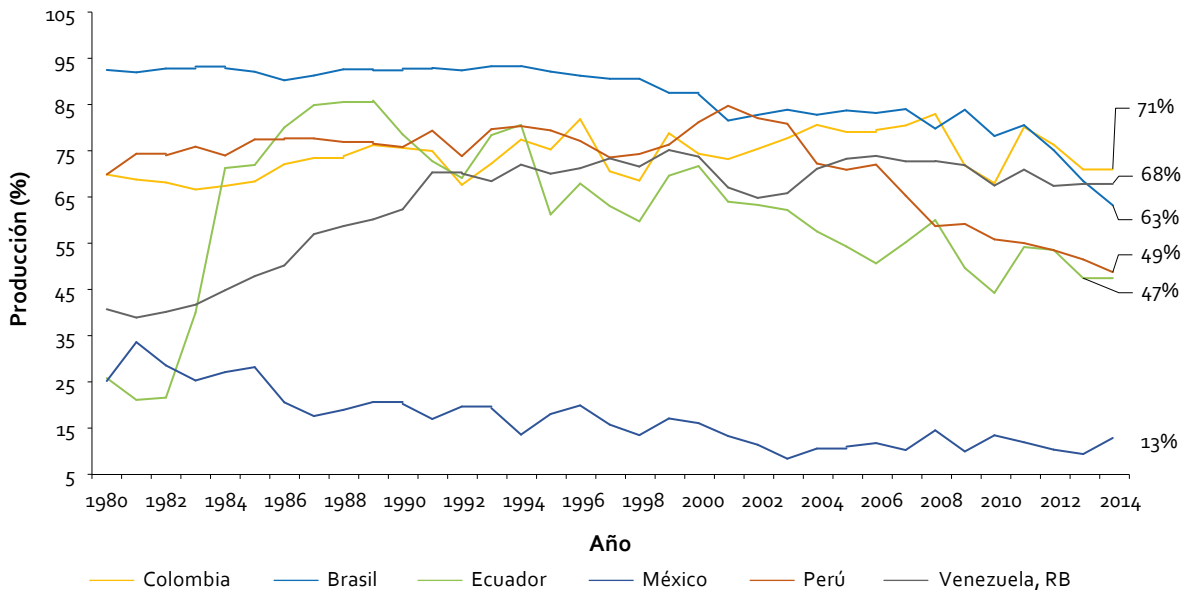


Figura 1. Producción de energía hidroeléctrica de países latinoamericanos.
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (2018)

hidroeléctricas (PCHs), la cogeneración en la agroindustria y un parque eólico¹.

La producción está concentrada principalmente en la región de Antioquia, Centro y Costa Caribe, según un informe realizado por WWF (2013), el cual señala que hacia el año 2012 se contaba con una capacidad instalada de 14.179 MW de los cuales más del 70% corresponde con capacidad hidroeléctrica, 64,88% relacionada con centrales mayores a 20 MW y 4,94% con plantas menores. De acuerdo con el informe, el SIN abarca el 34% del territorio nacional donde habita el 96% de la población, con una cobertura de 95,54% diferenciada en áreas urbanas con 99,35% y áreas rurales con 83,39%.

Clasificación de las fuentes de energía hidroeléctrica

Las hidroeléctricas se catalogan de acuerdo con la forma de generación o su capacidad. Dentro de la primera clasificación se encuentran cuatro tipos de centrales: agua fluente, embalse, acumulación por bombeo y aguas de mar; siendo las segundas las más

¹ La capacidad efectiva neta (%) de producción eólica en el 2018 fue apenas de 0,11%, sin embargo, se adelantan propuestas que han aumentado el interés por el uso de esta tecnología en los últimos años, en regiones específicas como La Guajira.

comunes en la nación, consistentes en la retención del agua mediante presas para generar electricidad mediante la caída de agua.

La categorización según la capacidad de generación es asumida por las instituciones colombianas a partir de la propuesta de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). En esta clasificación aparecen cinco categorías (Tabla 1).

Principales centrales hidroeléctricas

Debido a la geografía de alta montaña y valles profundos presentes en el país, se ha visto como adecuada la construcción de centrales de embalse para aprovechar el potencial de caída del agua, las cuales son de mayor envergadura con respecto a las demás categorías, por ende, su implementación ostenta una alta complejidad en términos técnicos, adicional a la ocupación considerable de territorios y modificaciones sobre los ecosistemas. A continuación, se especifican las más representativas en el país por su capacidad instalada (Tabla 2).

De acuerdo con la contribución esperada, la de mayor importancia es Ituango, en segundo lugar, se encuentra la central de San Carlos, seguida de las hidroeléctricas El Guavio e Hidrosogamoso, constituyéndose como las cuatro más importantes en el país.

Tabla 1. Categorías de hidroeléctricas por capacidad de generación

Características	Pico-centrales	Micro-centrales	Mini-centrales	Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)	Centrales hidroeléctricas (CH)
Capacidad Instalada (kW ó MW)	Entre 0,5 y 5 kW	Entre 5 y 50 kW	Entre 50 y 500 Kw	Entre 500 y 10000 kW	> 20 MW
Tipo de operación	A filo de agua	A filo de agua	A filo de agua	A filo de agua	Embalses
Zona de aplicación	Zonas no Interconectadas	Zonas no Interconectadas	Zonas no Interconectadas	Zonas no Interconectadas/ Zonas Interconectadas	Zonas Interconectadas
Planta típica	Central de 5 kW	Central de 50 kW	Central de 500 kW	Central de 10000kW (10 MW)	Centrales de 20 MW y 600 MW

Fuente: elaboración propia con información de la UPME (2018)

Tabla 2. Principales centrales hidroeléctricas de embalse en Colombia (2018)

Nombre	Localización	Capacidad instalada (MW)	Generación (GWh/año)	Fuente	Embalse (x10 ⁶ m ³)	Área inundada (ha)
Ituango	Antioquia	2.400	8.563	Río Cauca	2.720	3.800
San Carlos	Antioquia	1.240	5.980	Río San Carlos	72	340
Guavio	Cundinamarca	1.840	5.890	Río Guavio	1.043	15.000
Sogamoso	Santander	820	5.056	Río Sogamoso	4.800	7.000
Porce III	Antioquia	660	4.254	Río Porce	170	575
Chivor	Boyacá	1.010	3.626	Río Batá	760	1.300
Guatapé	Antioquia	560	2.730	Río Nare	1.071,7	6.340
Betania	Huila	540	2.304	Río Yaguará	1.971	7.400
El Quimbo	Huila	420	2.216	Río Páez	3.215	8.250
Alto Anchicayá (Alban)	Valle Del Cauca	340	1.590	Río Anchicayá, Río Digua.	45	170
Miel I	Caldas	375	1.460	Río La Miel, desvío Río Guarino, desvío Río Manso	571	1.213
Urrá	Córdoba	340	1.421	Río Sinú	1.890	7.400
Playas	Antioquia	200	1.380	Río Guatapé	77,3	650
Porce II	Antioquia	405	1.294,5	Río Porce	142,7	890
Salvajina	Cauca	270	1.050	Río Cauca	764,7	2.031
Jaguas	Antioquia	170	770	Río San Lorenzo	208	1.060
Prado	Tolima	51	250	Río Prado	966,2	1.254
Troneras	Antioquia	40	242	Río Concepción	1.235	6.400

Fuente: elaboración propia a partir de datos de las empresas operadoras de cada central (2018)

Impactos ambientales de las grandes hidroeléctricas

Según la Comisión Mundial de Represas (2000), las grandes hidroeléctricas causan impactos negativos complejos, variados y profundos donde se alcanzan niveles de pérdida de ecosistemas y especies de una manera irreversible. En ese sentido señala que

se pueden presentar impactos hasta de tercer orden, teniendo en cuenta que: i) los de primer orden implican las consecuencias físicas, químicas y geomorfológicas de bloquear un río y alterar la distribución y periodicidad naturales de su caudal; ii) los de segundo orden implican cambios en la productividad biológica primaria de ecosistemas, incluyendo

efectos en la vida vegetal fluvial y ribereña y en el hábitat río abajo, como humedales; mientras iii) los impactos de tercer orden implican alteraciones en la ictiofauna debido a un efecto de primer orden o a un efecto de segundo orden, producto de los bloqueos en la migración o en la disminución de alimento. Cabe mencionar que el orden de los impactos no se relaciona de manera obligatoria con su significancia, más aún los diferentes niveles interactúan formando un sistema complejo de redes a partir de su simbiosis.

De acuerdo con Glynn y Heinke (1999), entre las formas de producción, la energía hidroeléctrica presenta cambios considerables a nivel regional producto de la inmersión de tierras, la pérdida de hábitat animal, las variaciones en la hidrología y las alteraciones locales en el río que pueden transformar el flujo hasta su desembocadura. Graf (1999) señala que las represas segmentan ríos y fragmentan las cuencas en los sistemas fluviales y ribereños que se encuentran en equilibrio, generando impactos hidrológicos e hidráulicos que se suman a los efectos producto de la variabilidad climática, dado que los reservorios son proyectados con una vida útil de dos o tres décadas.

Las afectaciones físicas, producto de la implementación de las hidroeléctricas, generalmente están asociadas con el reservorio de agua. Según Oscoz *et al.* (2006) los efectos que tienen sobre la comunidad fluvial incluyen cambios en los patrones de caudal, régimen de temperaturas, alteración de los hábitats y variaciones en la disponibilidad de recursos tróficos, lo cual trae como consecuencia que algunos taxones desaparezcan o se reduzca su abundancia, mientras que otros la aumenten debido al cambio de condiciones ambientales.

La calidad del agua se ve afectada, como se observó en el embalse de Betania, localizado en el departamento del Huila-Colombia. De acuerdo con Duque y Donato (1988), este tipo de proyectos genera estratificación en capas por diferencias de densidad, producidas por cambios de temperatura y sólidos disueltos. Esta segregación permite diferenciar hasta tres capas, presentando una intermedia que produce una alta demanda bioquímica de oxígeno, aumento de CO₂ y oxidación de azufre, que contribuyen a la disminución de oxígeno. En ese

orden de ideas, Navarro *et al.* (2010, p. 83) destacan que en las represas de países ubicados en latitudes templadas:

... llega un momento en que se establece una zona que separa las aguas superficiales, menos densas, de las profundas, más densas. Esa capa, la termoclina (línea imaginaria que separa dos masas de agua de temperatura diferente), limita el movimiento vertical de los organismos y la difusión del oxígeno y otras sustancias disueltas. Durante esa época, si las cantidades de biomasa generada (...) es excesiva, el oxígeno acumulado en el hipolimnion será consumido por la descomposición de la biomasa.

Considerando esta, una consecuencia directa del cambio de la calidad de agua relacionada con la disminución en la cantidad de oxígeno disuelto.

De acuerdo con Silva *et al.* (2008), en una evaluación de la calidad del agua para el embalse de Porce III, ubicada entre los municipios de Amalfi, Guadalupe, Gómez Plata y Anorí, departamento de Antioquia-Colombia, a partir de la influencia de la descarga de la hidroeléctrica Porce II, ubicada entre los municipios de Amalfi, Anorí, Yolombó, Gómez Plata, también en Antioquia, determinaron que podría presentarse un grado de eutrofia² con una probabilidad de ocurrencia superior al 50% y de hipereutrofia de 30%, teniendo en cuenta el aumento de nutrientes que fluyen al embalse. Por su parte, García (2007) señala que en el proceso de la construcción de la presa de Aguamilpa, ubicada en México, se detectó que mientras se desarrollaba el proceso de construcción y los primeros años de embalsamiento, las aguas presentaron condiciones polisaprobias³, donde el aumento del nitrógeno generó un ambiente de estrés para los organismos presentes, es decir, se presentaron grandes cantidades de aguas residuales originadas de la construcción y la puesta en marcha de la represa, lo cual repercutió en una disminución de la calidad del agua.

En la hidroeléctrica El Quimbo, ubicada al sur del departamento de Huila-Colombia, Martínez-Silva

2 Es el incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses que provoca un exceso de fitoplancton, en su noción base tomada de la Real Academia Española.

3 Refiere a un ambiente acuático muy contaminado, también tomado de la Real Academia Española.

et al. (2016) advierten que los valores presentados de oxígeno disuelto en el agua presentan una clara tendencia a la eutrofización, debido a la materia orgánica en descomposición que afecta al río Magdalena. Según Ramos (2018), el fenómeno de eutrofización del embalse genera efectos negativos sobre la calidad del agua e incentiva la proliferación de algas y material vegetal flotante, adicionalmente este aumento de material orgánico disuelto produce olores desagradables, cambio de color del agua y falta de oxígeno en el área de contacto del agua con el sedimento, impactos que pueden incidir en la salud de las personas.

Para Brandt (2000), el cambio físico del canal aluvial ocurre por la nueva descarga de agua y sus condiciones de carga de sedimento, que implican cambios en el ancho, la profundidad y el nivel del piso del canal, así como cambios en el tamaño del grano de las partículas transportadas, inclusive la forma de este (geomorfología), lo que trae como consecuencia cambios en la fauna acuática aguas abajo.

Al respecto, Kunz *et al.* (2011) publicaron un estudio realizado en la represa Itezhi-Tezhi, ubicada en Zambia en el río Zambezi, en la que se determinó que la represa produjo cambios abruptos en los perfiles del sedimento, lo cual es un indicador del cambio del régimen de sedimentación de la presa asimilar a un lago donde, a una distancia de diez (10) kilómetros de las entradas principales del río, se produjo un fuerte aumento en la densidad aparente del suelo y un decrecimiento en las concentraciones de carbono orgánico, incremento de nitrógeno, lo cual generó afectaciones sobre los organismos vivos presentes en esta zona.

Entre los proyectos más emblemáticos a gran escala se encuentran aquellos a lo largo del río Mekong en China, frente a los cuales Kummur y Varis (2007), advierte que las presas cambian el flujo natural de los ríos, por ejemplo, en temporadas húmedas es probable el aumento promedio del río inundando ecosistemas importantes, lo cual puede afectar la productividad biológica de las pequeñas llanuras inundables, de igual forma, se pueden producir en temporadas secas retrasos en la llegada de inundaciones o en períodos más cortos afectando a los ecosistemas. Para Dai y Liu (2013), en la represa de las

tres gargantas ubicada en el río Yangtze, China, se comprobó que diez años después de entrar en funcionamiento, la sedimentación y la morfología del canal se modificaron y el nivel de agua a través del río –aguas abajo– disminuyó, al igual que la descarga de sedimentos suspendidos y su contenido de manera notable, por lo cual hace un llamado a evaluar los impactos ambientales producto de las consecuencias generadas en el delta del río y las regiones de estuarios.

De acuerdo con Angarita *et al.* (2017), la construcción de proyectos hidroeléctricos puede presentar impactos de forma no lineal representados por afectaciones aguas abajo, como es el caso de las llanuras aluviales de Mompós (Bolívar-Colombia) donde se presentan pérdidas de conectividad para que los peces migratorios desoven, con una disminución de esta funcionalidad en un 54,8% y del transporte de sedimentos en un 39%.

Dentro de los impactos físicos también se destaca la generación de gases de efecto invernadero (GEI), adicional a los olores ofensivos emitidos por la descomposición de material orgánico. Como lo resaltan Castro-González y Torres-Vladés (2015) en un estudio realizado en el reservorio de Prado, departamento del Tolima-Colombia, donde cuantificaron la concentración de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), llegaron a la conclusión de que la nitrificación del embalse fue responsable de concentraciones moderadamente altas y que la sobresaturación estimada para ambos, sugiere que se están liberando grandes cantidades de gases efecto invernadero a la atmósfera. En relación con el metano (CH_4), indican Paucar y Amancha (2015, p. 4):

... está formado por bacterias que descomponen la materia orgánica de aguas con bajo contenido de oxígeno y de los sedimentos presentes en el fondo del embalse. La capa de agua que se encuentra en la parte más profunda de los embalses tropicales tiene cantidades reducidas de oxígeno. Una porción del metano (CH_4) se oxida convirtiéndose en CO_2 al subir a la superficie de embalse.

Fearnside (2019) agrega que las hidroeléctricas lo emiten, principalmente, durante todo el periodo de generación del proyecto, con un mayor porcentaje en la construcción y el llenado, aunque posteriormente

siguen produciéndolo por lo menos diez años más, lo cual genera un impacto sobre el calentamiento global debido a que el metano perdura cerca de doce años en la atmósfera. Ante lo cual Demarty y Bastien (2011), señala que la hidroelectricidad ha disminuido su calidad de energía renovable dadas sus altas emisiones de CH₄, siendo una variable para tener en cuenta en el ciclo de vida del reservorio, más aún, cuando los estudios de emisiones de metano advierten que éstas son más altas en embalses ubicados en latitudes cálidas, es decir, aquellas más cercanas al Ecuador, como es el caso de Colombia.

Las afectaciones físicas que generan las grandes hidroeléctricas, en muchos de los casos, van encadenadas con afectaciones sobre el medio biótico, en especial sobre la fauna íctica, consideración que tienen en cuenta Jiménez-Segura *et al.* (2014), quienes señalan que la distribución altitudinal de los embalses a lo largo del eje de los cauces en una cuenca y su configuración escalonada generarán impactos acumulativos que afecta a las poblaciones de especies migratorias y aquellas endémicas que se encuentran en cauces arriba de los 1.300 msnm. Este ha sido un impacto evidenciado en varios lugares, por ejemplo, en Francia donde se ha producido un descenso continuo y creciente en las poblaciones de especies diádromos (peces migratorios que se mueven entre el mar y las aguas dulces), atribuido a la construcción de represas que impiden la migración aguas arriba sin obstáculos (Marmulla, 2001).

De acuerdo con Gutiérrez-L. y Pinilla-A. (2016, p. 310), las especies migratorias de peces son afectadas al cambiarse la oferta alimenticia “que no es la misma a lo largo del año, lo que se empieza a reflejar en términos de reproducción”. Por otra parte, el represamiento del río reducirá su caudal, disminuyendo o eliminando “las conexiones menores entre caños, ríos y ciénagas”. Uno de los ejemplos descrito en el libro rojo de los peces dulceacuícolas que afirma que el proyecto hidroeléctrico de Urrá I, ubicado en la cuenca alta del río Sinú (Córdoba-Colombia), “interrumpió completamente la ruta migratoria del bocachico, dejando poblaciones aisladas aguas arriba y abajo del frente de presa” (Mojica *et al.*, 2012, p. 18).

En el río Magdalena, Walschburger *et al.* (2015) advierten que la operación del sector de hidroenergía puede afectar seriamente la composición de

especies sobre el río, en especial en las épocas de sequía cuando las presas retendrán el agua, que al estar condicionadas por los factores climáticos disminuyen sustancialmente los caudales en los ríos durante grandes períodos, afectando principalmente los ecosistemas presentes en las planicies inundables. Lo anterior, puede generar una disminución en la calidad y cantidad de las especies de peces, muchas de estas de clases comerciales que son el sustento de familias de pescadores. Según Baigún *et al.* (2011), una vez terminada la fase de surgimiento trófico, la cual puede ser variable de acuerdo con la morfometría del embalse, el clima y las condiciones de la cuenca, se ingresa en una fase donde la paulatina desaparición de especies migratorias, o bien su desplazamiento hacia los tributarios o áreas fluviales del embalse, deteriora la pesquería.

De acuerdo con Amado y Díaz (2017), la represa El Quimbo afectó de manera importante la ictiofauna, generando una disminución sustancial en las especies comerciales que eran fuente fundamental para la pesca artesanal. Según los autores, el bocachico (*Prochilodus magdalenae*) y el capaz (*Pimelodus grosskopfii*) desaparecieron de la pesca artesanal del municipio del Hobo, dado que son especies que tienen mayor adaptabilidad a sistemas lóticos o de movimiento, y aunque otras especies como la mojarra plateada (*Oreochromis niloticus*) presentaron mayor adaptabilidad a sistemas lénticos, de la misma manera presentaron una reducción considerable hasta del 83%.

También, el represamiento de aguas puede generar demanda de terrenos, que sumada a las afectaciones a la fauna y la pesca, genera discrepancias entre la mirada que tiene la comunidad con las empresas sobre los territorios y las actividades propias de los lugares. Por ejemplo, en Hidrosogamoso, ubicada en el departamento de Santander, se han presentado quejas sobre los problemas socioeconómicos que generó el desarrollo de la obra en su primera fase. Según Roa y Duarte (2013), a los pescadores se les restringieron las áreas de pesca, aparte de la disminución de su oferta. Esta situación ha ocasionado una disminución en su calidad de vida⁴.

4 Las comunidades de pescadores también se encargaban de distribuir y comercializar el pescado.

Al respecto Estrada (2016), señala que las consecuencias para los pescadores no son únicamente de abastecimiento de alimentos, igualmente se extienden a su cultura basada en la relación con el río y en el tipo de interacciones que se establecían, lo que significa que al reubicarlos en otra actividad, como la agrícola y piscícola, se les está cambiando el tejido social y sus visiones del mundo y de la naturaleza; de forma similar, se les modifican los hábitos de vida teniendo en cuenta que cada actividad tiene tiempos y esfuerzos de desarrollo diferentes. Esta situación se agrava por la falta de acciones concretas que generen un sentido de reconocimiento y recuperación de los conocimientos tradicionales de los pescadores artesanales (Andrade y García, 2016).

Para Vélez-Torres y Vélez (2019), las hidroeléctricas acumulan deudas con las comunidades adyacentes porque existe una estrecha relación entre el agua y los ciclos de producción y consumo a escalas comunitarias, como el caso de la represa de la Salvajina, ubicada en el municipio Suárez, departamento del Cauca en el suroccidente de Colombia, en donde las transformaciones desarticulaban las relaciones entre las lógicas de subsistencia y los ciclos de la ecología, presentando un detrimento en la forma de vida local basada en la agricultura familiar con aprovechamiento de los bosques para la obtención de maderas, la pesca y la minería.

En la hidroeléctrica de El Quimbo, departamento del Huila, el estudio de impacto ambiental no evaluó de manera efectiva las modificaciones en las relaciones sociales a las cuales se vieron sometidos los habitantes del área de influencia, lo que trajo como consecuencia importantes impactos a nivel sociocultural. Según Dussán (2017), en el departamento del Huila se presentó un incremento progresivo de la conflictividad por la falta de respuesta y solución a las demandas sociales, toda vez que durante la construcción de la represa El Quimbo fueron 3.000 las personas desplazadas de sus tierras o del territorio donde laboraban.

Mediante un análisis de las problemáticas ambientales de la represa, se determinó que el grado de impacto es alto y significativo, a tal punto que la Corte Constitucional intervino mediante la Sentencia T-135/13 y sentó jurisprudencia al emitir las razones por las cuales consideraba que se vulneraron

los derechos de los habitantes de la región al no incluir a todos los pobladores afectados en los conteos de reparaciones. De esta manera, la Corte Constitucional de Colombia (2013) declaró necesaria la participación de los grupos de población que puedan ser afectados a causa de megaobras de infraestructura, como las hidroeléctricas; teniendo en cuenta que las mismas suponen:

... el surgimiento de una situación extraordinaria para el grupo de personas que se enfrentan a una modificación grande de sus vidas. Ese cambio, que surge por causa de una decisión gubernamental, que tiene que ver con una visión del interés general (con ella se busca satisfacer las necesidades energéticas de todo el país), amenaza por sí misma derechos fundamentales de dichas personas y puede ponerlos en situación de violación (Sentencia T-135/13, Corte Constitucional).

De acuerdo con Torres *et al.* (2014), el proyecto hidroeléctrico Ituango, ubicado entre el municipio de Ituango y el corregimiento de Puerto Valdivia, departamento de Antioquia, puede generar una ruptura en las relaciones que articulan la vida de las comunidades, específicamente las relaciones sociales y económicas desarrolladas de forma ancestral en esta zona. Una situación similar se presenta en la hidroeléctrica de Belo Monte, en Brasil, donde existen planes para implementar una serie de centrales en la Amazonia. De acuerdo con Uharte (2016), lo que se puede presentar con este tipo de proyectos es la migración masiva de miles de personas buscando trabajo, lo cual genera un colapso social de altas proporciones en una zona del país con infraestructuras muy deficientes.

La vulnerabilidad social de las comunidades ante este tipo de proyectos es alta. De acuerdo con Díaz Polanco *et al.* (2015), teniendo en cuenta la complejidad en la restauración de los medios de subsistencia, se pueden presentar graves consecuencias sobre el tejido social de comunidades, como las indígenas, presentes en el área de influencia del proyecto, caso de la represa de El Quimbo. De acuerdo con Naranjo (2014), la hidroeléctrica ha generado una serie de efectos tales como desplazamientos directos de la zona de inundación: propietarios de las predios (al reasentarse), también la cadena productiva de sus trabajadores y comerciantes de la región, lo cual no

fue valorado ni reconocido en el análisis de impacto ambiental, adicional a una fuerte ruptura del tejido social debido a la desigualdad económica de los habitantes de la región.

Otro ejemplo lo plantea Leguizamón (2015), en la construcción de la hidroeléctrica Urrá, Córdoba-Colombia, en la que las comunidades campesinas del Alto Sinú, que fueron reubicadas, se enfrentaron al drama de abandonar sus terruños para ser llevados a lugares carentes de oferta de servicios públicos básicos y expuestos a enfermedades y riesgos, lo cual modifica el sentido de pertenencia y la calidad de vida de las comunidades.

Vulnerabilidad del servicio eléctrico relacionado con la variabilidad climática

El potencial de las centrales hidroeléctricas está relacionado con los niveles de almacenamiento que dependen de forma directa de los eventos meteorológicos. Al respecto, en dos ocasiones se han presentado incertidumbre en el servicio en Colombia a causa de los bajos niveles de represamiento de agua debido a las bajas precipitaciones de lluvia y altas temperaturas, consecuencia directa del fenómeno ENOS o El Niño - Oscilación del Sur.

En el análisis se considera que la vulnerabilidad⁵ está directamente relacionada con el grado de afectación por los fenómenos meteorológicos, la variabilidad climática y la presencia de eventos extremos, los cuales son considerados como una amenaza latente al sistema, dado que este se encuentra en función de la capacidad y los niveles de los embalses. Adicionalmente, se incluye la capacidad adaptativa del sistema, correspondiente con el grado de dependencia hacia una sola tecnología de producción, es decir, cuando se disponen de diversas fuentes de generación, si alguna se encuentra

5 La vulnerabilidad en el contexto de los Estudios de Impacto Ambiental se define como: " La susceptibilidad natural o adquirida de todos los factores ambientales: físicos, bióticos, sociales, económicos y culturales, a los impactos de la construcción, operación o desmantelamiento de proyectos, obras o actividades de origen antrópico. Esta susceptibilidad está directamente relacionada con la resiliencia de los factores ambientales y la naturaleza del disturbio o perturbación." (Toro *et al.*, 2012, p. 108)

en riesgo la otra puede suplir la demanda, por el contrario, cuando se dispone de solo una o esta representa un alto grado de participación en la generación, es posible que las otras no puedan suplir estos riesgos intrínsecos.

Los fenómenos meteorológicos son entendidos a partir de los factores determinantes que definen el clima, que de acuerdo con Montealegre y Pachón (2002, p. 16) refieren a las condiciones físicas y geográficas, las cuales son relativamente constantes en el tiempo y en el espacio en aspectos relacionados con la transferencia de energía y calor. Las de mayor importancia son la latitud, la elevación y la distancia al mar, encontrando dentro de estos factores los vientos marítimos o alisios y el calentamiento de las aguas del mar. Según León *et al.* (2000), la circulación atmosférica a nivel mundial se mueve dentro de un esquema de equilibrio termodinámico, lo cual representa que en estas latitudes se presenten circulaciones confluyentes y concentradoras de masas de aire que se convierten en reguladoras del clima en el país, lo cual significa que en el territorio continental se presenta un aumento o una disminución en las precipitaciones.

La variabilidad climatológica, según Poveda (2004), hace referencia a un amplio rango de escalas espaciales y temporales, donde las escalas espaciales incluyen desde la planetaria a la local y puntual, mientras las temporales abarcan desde la escala paleo-climática, correspondiente a millones de años, hasta la escala diurna. Dentro de la variabilidad climática se presentan fenómenos como el ciclo de ENOS o el Niño - Oscilación del Sur que, según explican Montealegre y Pachón (2000), se produce por un debilitamiento de los vientos alisios, lo cual trae como consecuencia una disminución en la fuerza sobre el agua superficial oceánica, originando un retorno de las aguas cálidas desde Australia hasta las costas sudamericanas (vientos secos). Este fenómeno produce dos efectos en los países cercanos al Ecuador: en Colombia disminuyen sustancialmente las precipitaciones, mientras que en Perú y Ecuador genera un aumento en las mismas, fenómeno que se repite de manera cíclica aproximadamente cada siete o diez años.

Para dichas épocas de sequía, como lo plantea García *et al.* (2012), los efectos en el país no son despreciables: durante el fenómeno del Niño en la cuenca de los ríos Magdalena-Cauca se ha presentado hasta un 26% de disminución en los caudales, mientras en otras regiones se han presentado reducciones hasta de un 40%, lo cual es significativo teniendo en cuenta que sobre esta se ubican la mayoría de las hidroeléctricas.

Vulnerabilidad del sistema ante los desabastecimientos

Uno de los momentos en que el sistema de embalses fue más sensible al fenómeno de El Niño se presentó en los años 90, durante el periodo comprendido entre inicios de 1992 y principios de 1993. De acuerdo con López (2017), el problema presentado en 1992 permite concluir que no se debe depender únicamente de una fuente o tipo de generación, dado que el sistema no puede responder ante una falla y/o ante las complicaciones hidráulicas e hidrológicas que se dieron en el momento y generó un amplio rango de implicaciones negativas en el país, las cuales se manifestaron, por ejemplo, en racionamientos de cerca de nueve horas nocturnas y hasta tres diarias, afectando las pequeñas y medianas empresas y negocios, que redujeron su producción

hasta el 30% solamente en un mes. Razones por las cuales se tomaron medidas de choque, como cambiar en una hora el huso horario para aprovechar en mayor medida la luz solar y economizar energía ante el desabastecimiento.

De acuerdo con Guerrero (2004), a raíz del desabastecimiento y racionamiento entraron en vigor la Ley de servicios públicos 142 de 1994 y la Ley eléctrica 143 de 1994 para establecer las condiciones que permitieran que su desarrollo estuviese determinado bajo la regulación del mercado. Estas leyes no desincentivaron la generación a partir de la hidroelectricidad, por el contrario, se impulsó la creación de más centrales para la expansión del sistema a corto y mediano plazo.

La presencia del Fenómeno de El Niño entre 2016 e inicios de 2017, recordó los impactos sucedidos durante el apagón de 1992. Según Xm (2016), el nivel agregado de los embalses del país llegó a un 28,01%, valor que marcó un hito ya que las plantas nunca habían generado con niveles de agua tan bajos desde que entraran en vigor las leyes regulatorias de la energía eléctrica.

En la Figura 2 se observa que el fenómeno de El Niño tuvo sus mayores efectos en los meses de febrero - marzo del año 2016 y durante siete meses se alcanzaron niveles de almacenamiento por debajo del 50% de la capacidad (febrero - agosto). Pese a

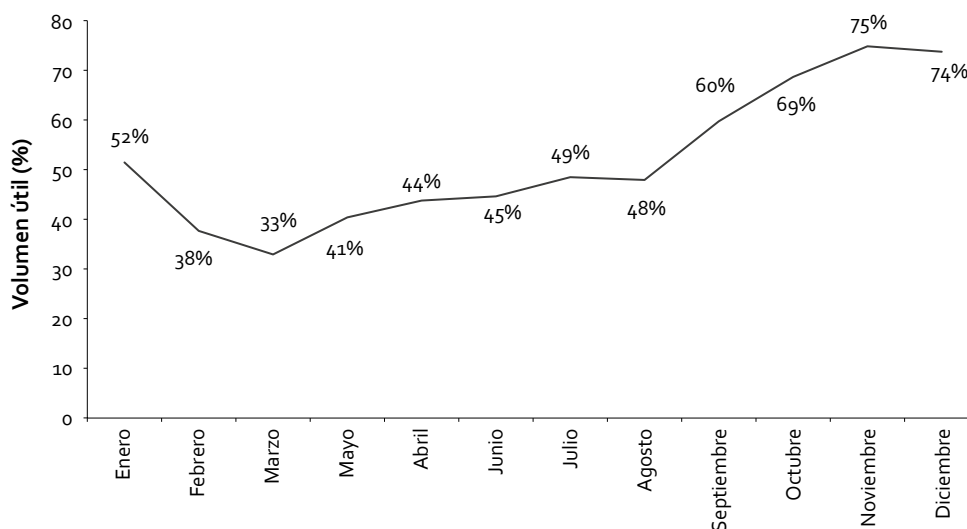


Figura 2. Volúmenes útil agregado en porcentaje por mes año 2016.

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de UPME (2018)

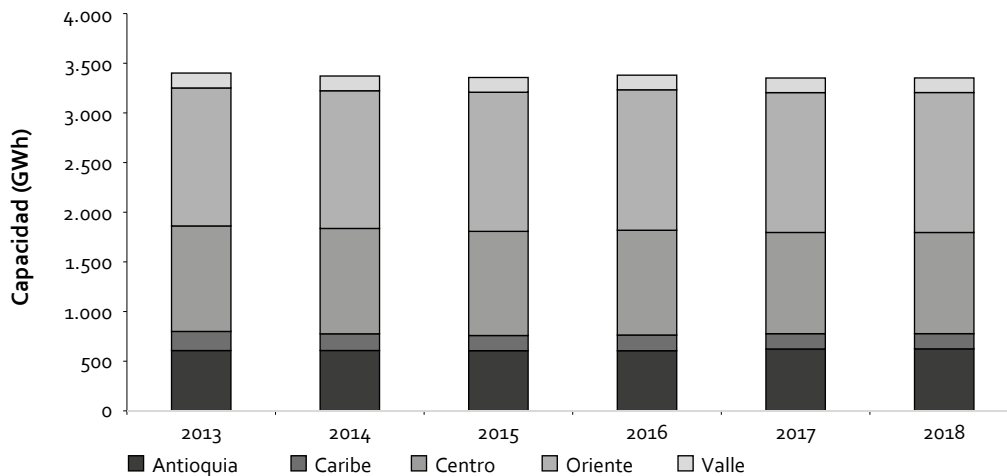


Figura 3. Promedio de capacidad útil de energía GWh (2013-2018).
Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de UPME (2018)

que los embalses no funcionaron con el 100% de la capacidad durante la totalidad del año, mantener niveles inferiores al 50% le redujo eficiencia al sistema.

Vulnerabilidad regional del sistema

En Colombia la generación hidroeléctrica se concentra principalmente en cinco regiones, Antioquia⁶, Caribe⁷, Centro⁸, Oriente⁹ y Valle¹⁰, que aportan entre 3.300 y 3.400 GWh. El primer puesto lo ostenta la región Oriente, la cual aporta el 42%, equivalente a 1.428 GWh, en segunda instancia se encuentra la región Centro con un aporte del 31%, equivalente a 1.054 GWh, Antioquia aporta cerca del 18% de la capacidad, equivalente a 612 GWh (aprox.), la región Caribe apenas el 5%, equivalente a 170 GWh, tal y como puede observarse en la Figura 3.

El análisis de la vulnerabilidad del sistema desde las regiones implica comprender que cada una presenta condiciones climatológicas diferentes, aunque en conjunto generen la energía que se consume en

6 Comprende los embalses Amani, Miraflores, Peñol, Playas, Porce II, Porce III, Punchina, Riogrande, San lorenzo, Troneras.

7 Comprende el embalse de Urrea.

8 Comprende los embalses de El Quimbo, Muña, Prado, Toporoco, Betania, Agregado Bogotá.

9 Comprende los embalses de Chuza, Esmeralda y el Guavio.

10 Comprende los embalses de Alto Anchicaya, Calima y la Salvajina.

el país en el SIN. Teniendo en cuenta esto, se realizó una valoración de su vulnerabilidad siguiendo el enfoque de la metodología propuesta por Toro *et al.*, 2012 para los estudios de impacto ambiental (Tabla 3), asociando el porcentaje de los niveles de los embalses. Para esto se tomó como referencia que entre 80-100% es el nivel óptimo y menos de 20% es crítico, usando como año de referencia la Fase El Niño de 2016, año normal 2017 y año promedio entre 2013 y 2018.

Tabla 3. Valores para el cálculo de la vulnerabilidad

Valoración cualitativa	Sigla	Valoración cuantitativa vulnerabilidad	Rango de volumen útil diario (%)
Vulnerabilidad baja	VB	1	100-80
Vulnerabilidad moderada baja	VMB	2	79-60
Vulnerabilidad moderada alta	VMA	4	59-40
Vulnerabilidad alta	VA	5	39-20
Vulnerabilidad crítica	VC	7	19-0

Fuente: Adaptación a partir de Toro *et al.*, (2012)

Conforme con la metodología, se analizaron dos periodos diferentes. El primero corresponde con un periodo de fenómeno de ENOS, que es 2016, y el

segundo con un periodo sin la influencia de éste, año 2017. Se resalta que en la mayoría de las regiones se tiene un comportamiento bimodal de las precipitaciones, es decir, existen dos temporadas de lluvias, la primera se presenta generalmente entre abril - junio y la segunda entre septiembre - noviembre.

A partir de los resultados obtenidos (Figuras 4 y 5), fue posible observar que en el SIN los embalses sostuvieron niveles bajos en cuatro de las cinco regiones (Valle, Antioquía, Oriente, Caribe) durante la fase de El Niño, donde el promedio del año presentó una tendencia de la vulnerabilidad moderadamente alta. En contraste, la región centro, que es la segunda más importante, presentó una vulnerabilidad moderadamente baja, es decir, el fenómeno no afectó de manera significativa al interior del país como sí lo hace en las zonas periféricas, como la región Valle, que presentó mes a mes las menores tasas de niveles en sus embalses, por lo tanto, se considera que esta fue la más impactada. Esta región comprende represas como Alto Anchicaya, Calima y la Salvajina, siendo la zona que debe implementar de manera más inmediata otras tecnologías a su canasta energética para diversificar su generación y de este modo disminuir su vulnerabilidad.

Asimismo, de los resultados se deduce que en febrero, marzo, abril y mayo se presentan los menores volúmenes útiles diarios en los embalses, es decir, el inicio de año son épocas de condiciones más extremas e intensas para el sistema, teniendo en cuenta que los tres primeros meses del año son de bajas precipitaciones, y aunque abril y mayo son típicamente lluviosos, en estos el sistema empieza a recuperarse para tener niveles de embalse más adecuados con su funcionamiento. Cuando se presenta el fenómeno ENOS la disminución en la precipitación es drástica, en especial en el mes de marzo, que presentó el nivel de volumen útil diario más bajo en todas las regiones, lo cual genera que la recuperación de los niveles de embalsamiento sea más lenta.

El año en que no se presentó el fenómeno de El Niño, considerado normal, la región Antioquia presentó el volumen óptimo, con una vulnerabilidad baja en ocho meses y una vulnerabilidad moderadamente baja en los cuatro restantes. Por el contrario, si bien la región Valle presenta una condición moderadamente mejor que el año con fase El Niño, en los últimos meses presentó una vulnerabilidad moderadamente alta, lo cual indica que esta es la región con porcentajes más bajos de eficiencia del país. Por su parte, la región Centro es la que presenta menor

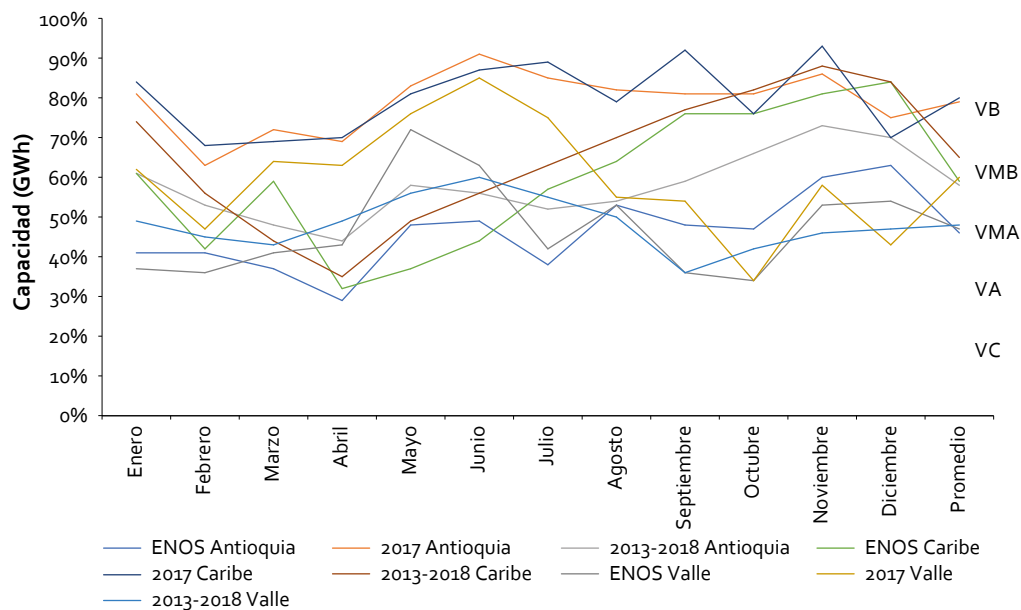


Figura 4. Valoración de la vulnerabilidad a partir del promedio de volumen útil diario (%) en las regiones de Antioquia, Caribe y Valle (2016 fenómeno ENOS – Fase El Niño, 2017 año normal, 2013-2018 año promedio). Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de UPME (2018). VB, vulnerabilidad baja; VMB, vulnerabilidad moderada baja; VMA, vulnerabilidad moderada alta; VA, vulnerabilidad alta; VC, vulnerabilidad crítica

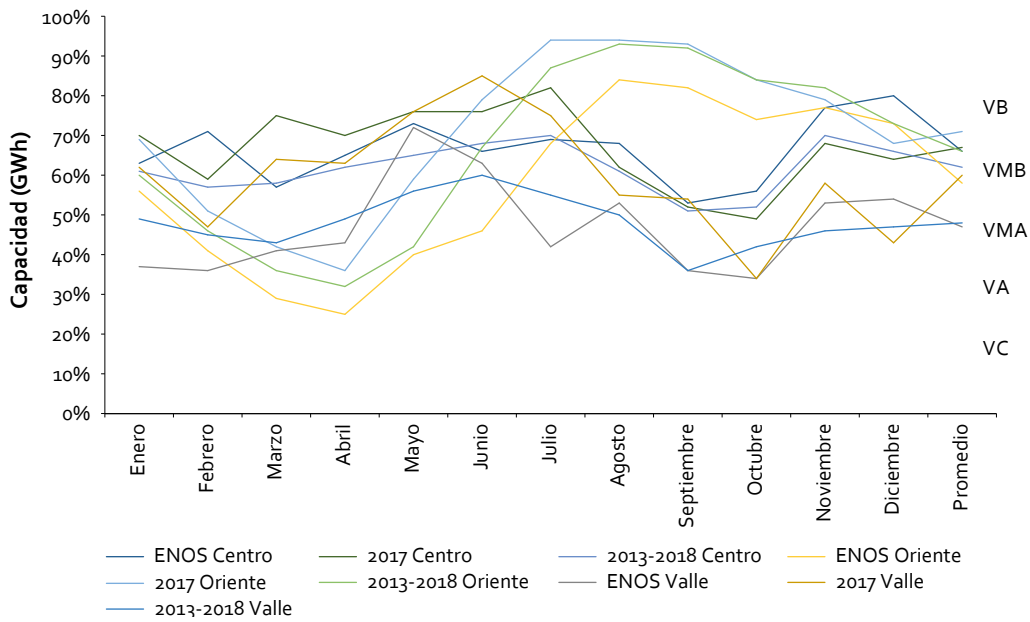


Figura 5. Valoración de la vulnerabilidad a partir del promedio de volumen útil diario (%) en las regiones de Centro, Oriente y Valle (2016 fenómeno ENOS – Fase El Niño, 2017 año normal, 2013-2018 año promedio).
 Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de UPME (2018). VB, vulnerabilidad baja; VMB, vulnerabilidad moderada baja; VMA, vulnerabilidad moderada alta; VA, vulnerabilidad alta; VC, vulnerabilidad crítica

variación en el porcentaje de sus embalses, entre los años con y sin fenómeno de El Niño, como se puede observar en la Figura 5.

De otro lado, en condiciones promedio es posible identificar que los meses más vulnerables para el sistema son febrero, marzo y abril, los dos primeros son periodos típicamente secos en la mayoría del territorio nacional y en el tercero, aunque es un mes lluvioso, hasta ahora se empiezan a subsanar los efectos de los periodos anteriores, por lo tanto, son los momentos donde se presenta una vulnerabilidad moderadamente alta o alta. Considerando las cinco regiones, la región del Valle es la que presenta mayor vulnerabilidad, con un promedio anual de 48%, asimismo, la región de Antioquía presenta una vulnerabilidad moderadamente alta la mayoría del año. Por el contrario, la región centro y la región Oriente presenta vulnerabilidades moderadamente bajas, aunque con porcentajes cercanos a los límites inferiores.

Los resultados obtenidos corresponden con el estudio de dos periodos, en los cuales se consideraron dos condiciones: la primera sin fenómeno ENOS; la segunda con fenómeno ENOS Fase El Niño (condiciones deficitarias de agua para Colombia).

Sin embargo, en estudios posteriores es necesario considerar un análisis multitemporal más amplio para analizar las diferentes variables que afectaron el volumen de los embalses en otros periodos. En la década de 1990 el volumen de los embalses presentó un rango más amplio (mayor variabilidad) que el presentado para los años 2000, el cual fue mucho más homogéneo. Los datos fuente de la vulnerabilidad evaluada, junto con las gráficas de los volúmenes agregados en los embalses para las décadas de 1990 y 2000 pueden ser consultados en el Anexo 1.

Conclusiones

De acuerdo con la definición considerada de vulnerabilidad, se concluye que el sistema de abastecimiento de energía mediante centrales hidroeléctricas de gran escala presenta una vulnerabilidad moderadamente alta, cuando ocurren alteraciones climatológicas como el Fenómeno de El Niño (ciclo ENOS/Oscilación Sur), lo cual representa un escenario desfavorable para el sistema eléctrico, dado el alto grado de dependencia de este tipo de tecnología (70% del sistema eléctrico) como ya se evidenció en diversos periodos donde el racionamiento fue

eminente o los embalses estuvieron generando a niveles mínimos.

Teniendo en cuenta la vulnerabilidad moderadamente alta del sistema durante fluctuaciones climáticas naturales, como el fenómeno ENOS, es recomendable aumentar la participación en la canasta energética de otros tipos de energías renovables, como la solar, la eólica, entre otras, para disminuir la dependencia en una sola tecnología y garantizar el abastecimiento de las diferentes zonas del país. Del mismo modo, al diversificarse las opciones tecnológicas, también se genera una menor presión sobre un ecosistema específico, para este caso en el componente hídrico, dado que al tener una escala menor de implementación disminuye el grado de alteración de los mismos, de modo que se generara una disminución sobre los impactos sobre los ecosistemas y de las comunidades que habitan y subsisten alrededor de los mismos. Del mismo modo, es necesario tener en cuenta los periodos de lluvias intensas, fenómeno ENOS fase de La Niña, las cuales han generado impactos considerables en las comunidades aguas abajo de las hidroeléctricas, en su mayoría por la apertura de las compuertas y la inundación de los territorios.

Un análisis al tema energético, desde un punto de vista ambiental, reitera la necesidad de explorar otras tecnologías menos invasivas y adicionalmente reflexionar sobre la escala de implantación de los proyectos con la finalidad de dar soluciones a las necesidades que presentan las comunidades, tanto a nivel regional como a nivel local, dado que el modelo a partir de grandes centrales hidroeléctricas ha producido en el país una cantidad significativa de impactos ambientales, en especial para las poblaciones del área de influencia, los cuales son magnificados por la presencia de fenómenos naturales que repercuten de manera directa sobre los ecosistemas aguas abajo del represamiento.

Igualmente, se ha estudiado poco, de manera global, la implementación de varias hidroeléctricas localizadas sobre una misma cuenca, aun cuando sean independientes, dado que generalmente los estudios de impacto solo se ciñen a su entorno más inmediato. Más aún, es necesario plantearse desde la academia la construcción de estudios multitemporales y multidisciplinarios en los cuales se analicen no solo las afectaciones físicas del entorno, sino que

involucren de manera más activa a los componentes sociales y culturales, estudiando la simbiosis entre ellos y las implicaciones que las represas tienen sobre las comunidades aguas abajo de cada proyecto.

De acuerdo con lo anterior, el caso de Hidroituango es un ejemplo de esta situación, el cual constituye un tema álgido en el país, dado que puso en vilo a muchas comunidades aledañas a la represa, formando un ambiente de zozobra e incertidumbre ante un posible desbordamiento o colapso de la represa a causa de las fallas en el componente técnico del proyecto. A lo que se suman las múltiples contradicciones políticas en cada una de sus fases, lo que representa un claro reflejo que los estudios no están incluyendo la complejidad de los sistemas sociales y culturales ubicados en el territorio y muchas veces se presenta una nulidad en escuchar las peticiones y reclamos de las comunidades.

Referencias

- Amado, A., Díaz, D., 2017. Determinación de la afectación aguas abajo de la represa del Quimbo sobre la ictiofauna de importancia económica. Trabajo de grado. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, DC.
- Andrade Pérez, M., García Cháves, C., 2016. Tiempo de vidrio y de abundancia. Saberes y oficios de la cultura fluvial en el Alto Magdalena, Colombia. *Rev. Estud. Soc.* 55, 73-87.
- Angarita, H., Wickel, A., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J., Herrera-R, G., Delgado, J., Purkey, D., 2017. Large-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* DOI: 10.5194/hess-2017-544
- Baigún, C., Oldani, N., Van Damme, P., Baigun, C., Oldani, N., Van Damme, P., 2011. Represas hidroeléctricas en América Latina y su impacto sobre la ictiofauna: lecciones aprendidas. En: Van Damme, P., Carvajal-Vallejos, F., Molina Carpio, J. (Eds.), *Los peces y delfines de la amazonia boliviana: hábitats, potencialidades y amenazas*. INIA, Cochabamba, Bolivia. pp. 397-416.
- Brandt, S., 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40(4), 375-401. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00093-X
- Castro-González, M., Torres-Valdés, V., 2015. Gases invernadero en aguas con bajo oxígeno en el reservorio eutrófico de Prado (Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 39(152), 399-407. DOI: 10.18257/raccefyn.228

- Corte Constitucional de Colombia, 2013. Sentencia T-135/13, Obras de desarrollo y progreso frente a la protección de derechos fundamentales de las personas. MP J.I. Palacio Palacio. Bogotá, DC.
- Dai, Z., Liu, J., 2013. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). *J. Hydrol.* 480, 10-18. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.003
- Demarty, M., Bastien, J., 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy* 39(7), 4197-4206. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.04.033
- Díaz Polanco, F., Trujillo-Quintero, J., Pérez-Bonilla, L., 2015. Proyecto Hidroeléctrica El Quimbo: un análisis frente al derecho a la propiedad en el Sistema Interamericano de Derechos Humanos. *Memorias* 13(23), 21. DOI: 10.16925/me.v13i23.1077
- Duque, S., Donato, J., 1988. Estudio del fitoplancton durante las primeras etapas de llenado del embalse de la central hidroeléctrica de Betania, Huila-Colombia. *Rev. Fac. Cien. Univ. Jav.* 1(2), 29-52.
- Dussán Calderón, M. A. 2017. El Quimbo: extractivismo, despojo, ecocidio y resistencia. CDPАЗ; Planeta Paz; ASOQUINBO, Bogotá, DC.
- Estrada Martínez, Z., 2016. Transformación de los medios de vida de los pescadores artesanales, por la puesta en marcha de la central hidroeléctrica Sogamoso. El caso de los pescadores ubicados aguas abajo del río Sogamoso en el departamento de Santander. Tesis de maestría. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, DC.
- Fearnside, M., 2019. Represas hidroeléctricas en la Amazonia brasileña: impactos ambientales y sociales. *Rev. Estud. Bras.* 6(11), 123-138. DOI: 10.14201/reb2019611123138
- García Cabrera, J. 2007. Plancton como indicador de calidad del agua en la presa Aguamilpa. *Tecnol. Cienc. Agua* 22, 103-116.
- García, M., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F., Ardila Robles, E., 2012. Variabilidad climática y el cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Rev. Ing.* (36), 60-64. DOI: 10.16924/revinge.36.11
- Glynn, H., Heinke, G. 1999. *Ingeniería ambiental*. 2a ed. Prentice Hall, México, DF.
- Graf, W., 1999. Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resour. Res.* 35(4), 1305-1311. DOI: 10.1029/1999WR900016
- Guerrero, B., 2004. La globalización y su efecto en el sector eléctrico latinoamericano- caso interconexión eléctrica S.A. - Isa. Tesis de maestría. Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, DC.
- Gutiérrez-C., Á., Pinilla-A., G., 2016. Efectos de la conectividad local sobre los ensambles de peces en una planicie de inundación tropical. *Caldasia* 38(2), 300-313. DOI: 10.15446/caldasia.v38n2.60920
- Jiménez-Segura, L. F., Restrepo-Santamaría, D., López-Casas, S., Delgado, J., Valderrama, M., Álvarez, J., Gómez, D., 2014. Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia. *Biota Colomb.* 15(2), 3-25.
- Kummu, M., Varis, O., 2007. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River. *Geomorphology* 85(3-4), 275-293. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.03.024
- Kunz, M., Wüest, A., Wehrli, B., Landert, J., Senn, D., 2011. Impact of a large tropical reservoir on riverine transport of sediment, carbon, and nutrients to downstream wetlands. *Water Resour. Res.* 47(12), W12531. DOI: 10.1029/2011WR010996
- Leguizamón Castillo, Y., 2015. Conflictos ambientales y movimientos sociales: el caso del movimiento Emberá Katío en respuesta a la construcción de la represa Urrá (1994-2008). *Mem. Soc.* 19(39), 94-105. DOI: 10.11144/Javeriana.mys19-39.cams
- León Aristizábal, G., Zea Mazo, J., Eslava Ramírez, J., 2000. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb.* (1), 31-38.
- Londoño, C., 2006. Los recursos naturales y el medio ambiente en la economía de mercado. *Rev. Cient. Guillermo Ockham* 4(1), 25-42.
- López Díez, J., 2017. 1992: el año en que se nos fueron las luces. *Rev. Gest. Reg.* (23), 9-23.
- Marmulla, G. (Ed.), 2001. Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution. FAO Fisheries Technical Paper 419. Roma.
- Martínez-Silva, P., Delgado-Fonseca, J., Muñoz-Yustres, J., 2016. Diversidad de géneros del fitoplancton del embalse de Betania-Huila y su importancia como bioindicadores. *Rev. Cient.* 25(2), 241-251. DOI: 10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a8
- Mojica, J., Usma, J., Álvarez-León, R., Lasso, C. (Eds.), 2012. Libro rojo de peces dulceacuicolas de Colombia 2012. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia; WWF Colombia; Universidad de Manizales, Bogotá, DC.
- Montealegre Bocanegra, J., Pabón Caicedo, J., 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb.* (2), 7-21.
- Montealegre Bocanegra, J., Pabón Caicedo, J., 2002. Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. *Meteorol. Colomb.* 5, 59-65.
- Naranjo Aristizábal, S., 2014. Conflictos territoriales generados por las macropolíticas y sus respectivos impactos, en relación con los pobladores del territorio donde

- éstas se materializan: estudio de caso del megaproyecto de la hidroeléctrica el Quimbo. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC.
- Navarro, E., García-Berthou, E., Armengol, J., 2010. La calidad ecológica de los embalses. *Prensa científica Investigación y Ciencia* 401, 80-88.
- Oscoz, J., Campos, F., Escala, M., 2006. Variación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en relación con la calidad de las aguas. *Limnetica* 25(3), 683-692. DOI: 10.23818/limn.25.46
- Paucar Samaniego, M., Amancha Proaño, P., 2015. Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador. En: *Memorias 12º congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Guayaquil. pp. 34-35. DOI: 10.1016/0040-1951(91)90236-L
- Poveda, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Fis. Nat.* 28(107), 201-222.
- Ramos Moreno, A., 2018. Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo-Huila. *Logos Cienc. Tecnol.* 10(2), 172-192. DOI: 10.22335/rlct.v10i2.461
- Roa A., T., Duarte, B., 2013. Desarrollo hidroeléctrico, despojo y transformación territorial: El caso de Hidrosogamoso, Santander, Colombia. En: Arroyo, A., Boelens, R. (Eds.), *Aguas robadas despojo hídrico y movilización social. Serie Agua y Sociedad 19. Justicia Hídrica-Paraguas*; Ediciones Abya-Yala; Instituto de Estudios Peruanos (IEP), Quito.
- Silva Arroyave, S., 2008. Evaluación de la calidad del agua del futuro Embalse Porce III por la influencia de la descarga del Embalse Porce II: Modelo de simulación de calidad del agua del futuro embalse Porce III. *Rev. Ing. Univ. Medellín* 7(13), 21-37.
- Toledo Arias, C., 2013. Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.
- Toro, J., Duarte, O., Requena, I., & Zamorano, M. (2012). Determining Vulnerability Importance in Environmental Impact Assessment. The case of Colombia. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.005>
- Torres, M., Caballero, H., Awad, G., 2014. Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidro Ituango. *Energética* 44, 75-83.
- Uharte, L., 2016. El megaproyecto hidroeléctrico de Belo Monte en Brasil: Impactos múltiples. *Rev. Antropol. Exp.* (16), 91-107.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2018. Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano. Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá, DC.
- Vélez-Torres, I., Vélez Galeano, H., 2019. Plexos conflictivos: una visión territorial e histórica de los conflictos ambientales en la cuenca alta del río Cauca. *Rev. Colomb. Sociol.* 42(1), 177-206. DOI: 10.15446/rsc.v42n1.73181
- Walschburger, T., Angarita, H., Delgado, J., 2015. Hacia una gestión integral de las planicies inundables en la cuenca Magdalena-Cauca. En: Rodríguez Becerra, M. (Ed.), *¿Para dónde va el río Magdalena? Riesgos sociales, ambientales y económicos del proyecto de navegabilidad*. Fescol; Foro Nacional Ambiental, Bogotá, DC. pp. 145-168.
- WWF, 2013. Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. Fedesarrollo, Bogotá, DC.
- XM, 2016. Nivel agregado de los embalses permanece estable. Disponible en: <https://www.xm.com.co/corporativo/Paginas/nivel-agregado-de-los-embalses-permanece-estable.aspx>; consultado: marzo de 2020.

ANEXO 1

Tabla 1 Valoración de la vulnerabilidad a partir del promedio de volumen útil diario % (2016)

Mes/Región	Antioquia	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Caribe	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Centro	Val, cuantitativa	Valor Cuantitativa	Oriente	Valor Cuantitativa	Valor cuantitativa	Valle	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa
Enero	41%	VMA	4	61%	VMB	2	63%	VMB	2	56%	VMA	4	37%	VA	5
Febrero	41%	VMA	4	42%	VMA	4	71%	VMB	2	41%	VMA	4	36%	VA	5
Marzo	37%	VA	5	59%	VMA	4	57%	VMA	4	29%	VA	5	41%	VMA	4
Abril	29%	VA	5	32%	VA	5	65%	VMB	2	25%	VA	5	43%	VMA	4
Mayo	48%	VMA	4	37%	VA	5	73%	VMB	2	40%	VMA	4	72%	VMB	2
Junio	49%	VMA	4	44%	VMA	4	66%	VMB	2	46%	VMA	4	63%	VMB	2
Julio	38%	VA	5	57%	VMA	4	69%	VMB	2	68%	VMB	2	42%	VMA	4
Agosto	53%	VMA	4	64%	VMB	2	68%	VMB	2	84%	VB	1	53%	VMA	4
Septiembre	48%	VMA	4	76%	VMB	2	53%	VMA	4	82%	VB	1	36%	VA	5
Octubre	47%	VMA	4	76%	VMB	2	56%	VMA	4	74%	VMB	2	34%	VA	5
Noviembre	60%	VMB	2	81%	VB	1	77%	VMB	2	77%	VMB	2	53%	VMA	4
Diciembre	63%	VMB	2	84%	VB	1	80%	VB	1	73%	VMB	2	54%	VMA	4
Promedio	46%	VMA	4	59%	VMA	4	66%	VMB	2	58%	VMA	4	47%	VMA	4

VB, vulnerabilidad baja; VMB, vulnerabilidad moderada baja; VMA, vulnerabilidad moderada alta; VA, vulnerabilidad alta; VC, vulnerabilidad crítica.

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de XM (2018).

Tabla 2. Valoración de la vulnerabilidad a partir del promedio de volumen útil diario % año 2017

Mes/Región	Antioquia	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Caribe	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Centro	Valor cuantitativa	Valor Cuantitativa	Oriente	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Valle	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa
Enero	81%	VB	1	84%	VB	1	70%	VMB	2	69%	VMB	2	62%	VMB	2
Febrero	63%	VMB	2	68%	VMB	2	59%	VMA	4	51%	VMA	4	47%	VMA	4
Marzo	72%	VMB	2	69%	VMB	2	75%	VMB	2	42%	VMA	4	64%	VMB	2
Abril	69%	VMB	2	70%	VMB	2	70%	VMB	2	36%	VA	5	63%	VMB	2
Mayo	83%	VB	1	81%	VB	1	76%	VMB	2	59%	VMA	4	76%	VMB	2
Junio	91%	VB	1	87%	VB	1	76%	VMB	2	79%	VMB	2	85%	VB	1
Julio	85%	VB	1	89%	VB	1	82%	VB	1	94%	VB	1	75%	VMB	2
Agosto	82%	VB	1	79%	VMB	2	62%	VMB	2	94%	VB	1	55%	VMA	4
Septiembre	81%	VB	1	92%	VB	1	52%	VMA	4	93%	VB	1	54%	VMA	4
Octubre	81%	VB	1	76%	VMB	2	49%	VMA	4	84%	VB	1	34%	VA	5
Noviembre	86%	VB	1	93%	VB	1	68%	VMB	2	79%	VMB	2	58%	VMA	4
Diciembre	75%	VMB	2	70%	VMB	2	64%	VMB	2	68%	VMB	2	43%	VMA	4
Promedio	79%	VMB	2	80%	VMB	2	67%	VMB	2	71%	VMB	2	60%	VMA	4

VB, vulnerabilidad baja; VMB, vulnerabilidad moderada baja; VMA, vulnerabilidad moderada alta; VA, vulnerabilidad alta; VC, vulnerabilidad crítica.

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de XM (2018).

Tabla 3. Valoración de la vulnerabilidad a partir del promedio de volumen útil diario % (2013-2018)

Mes/Región	Antioquia	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Caribe	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa	Centro	Valor cuantitativa	Valor Cuantitativa	Oriente	Valor Cuantitativa	Valor cuantitativa	Valle	Valor cuantitativa	Valor cuantitativa
Enero	61%	VMB	2	74%	VMB	2	61%	VMB	2	60%	VMA	4	49%	VMA	4
Febrero	53%	VMA	4	56%	VMA	4	57%	VMA	4	46%	VMA	4	45%	VMA	4
Marzo	48%	VMA	4	44%	VMA	4	58%	VMA	4	36%	VA	5	43%	VMA	4
Abril	44%	VMA	4	35%	VA	5	62%	VMB	2	32%	VA	5	49%	VMA	4
Mayo	58%	VMA	4	49%	VMA	4	65%	VMB	2	42%	VMA	4	56%	VMA	4
Junio	56%	VMA	4	56%	VMA	4	68%	VMB	2	67%	VMB	2	60%	VMB	2
Julio	52%	VMA	4	63%	VMB	2	70%	VMB	2	87%	VB	1	55%	VMA	4
Agosto	54%	VMA	4	70%	VMB	2	61%	VMB	2	93%	VB	1	50%	VMA	4
Septiembre	59%	VMA	4	77%	VMB	2	51%	VMA	4	92%	VB	1	36%	VA	5
Octubre	66%	VMB	2	82%	VB	1	52%	VMA	4	84%	VB	1	42%	VMA	4
Noviembre	73%	VMB	2	88%	VB	1	70%	VMB	2	82%	VB	1	46%	VMA	4
Diciembre	70%	VMB	2	84%	VB	1	66%	VMB	2	73%	VMB	2	47%	VMA	4
Promedio	58%	VMA	4	65%	VMB	2	62%	VMB	2	66%	VMB	2	48%	VMA	4

VB, vulnerabilidad baja; VMB, vulnerabilidad moderada baja; VMA, vulnerabilidad moderada alta; VA, vulnerabilidad alta; VC, vulnerabilidad crítica.

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de XM (2018).

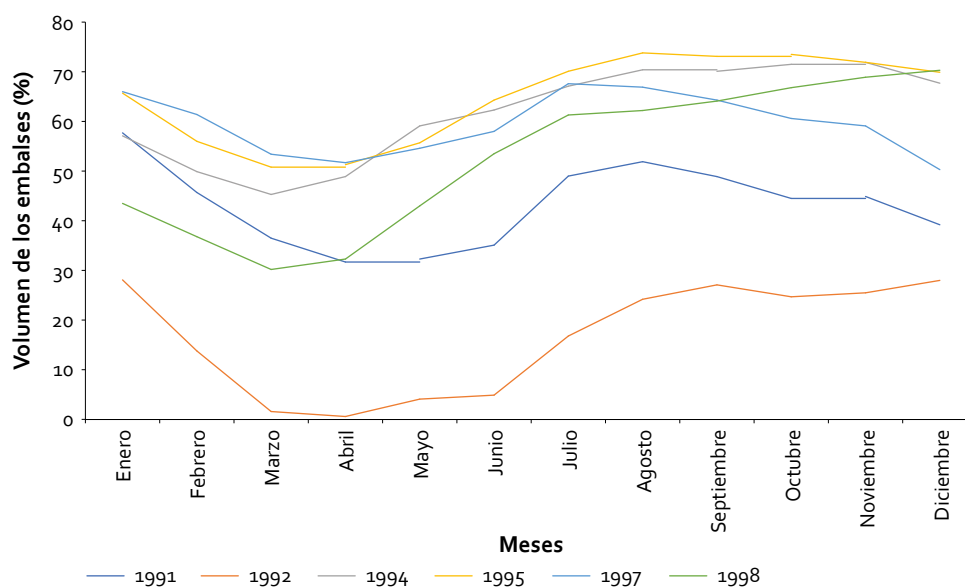


Figura 1. Volúmenes agregados de embalses en % (Años 1991 al 1998).

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de XM (2018).

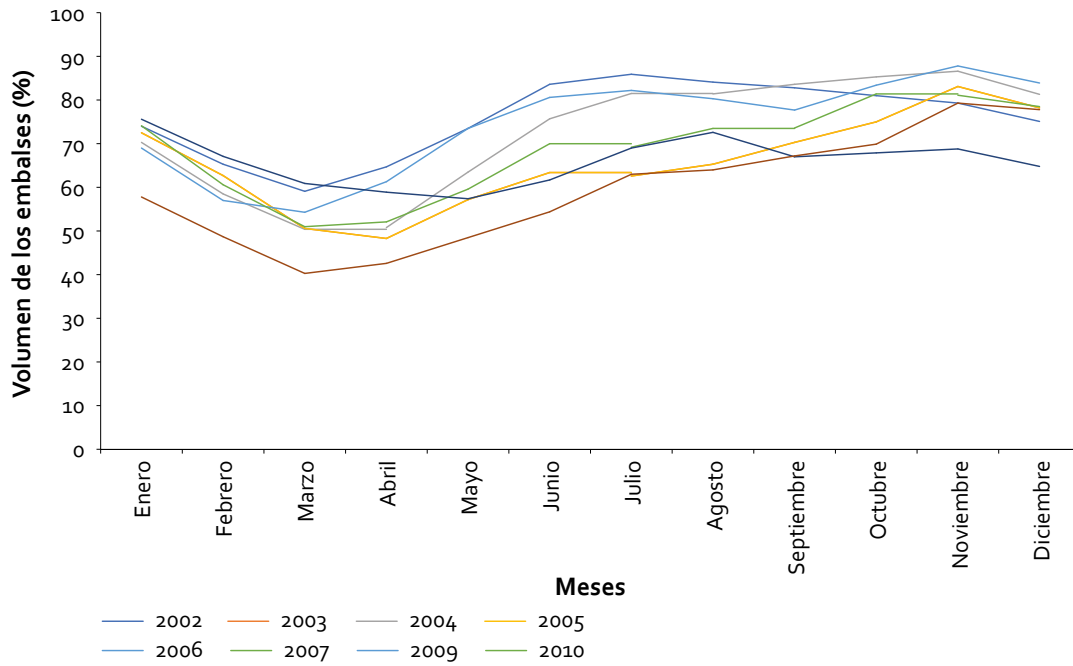


Figura 2. Volúmenes agregados de embalses en % (Años 2002 al 2010).
Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados de XM (2018).