

ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA DETERMINAR LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL Y EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO CAUCA PRODUCIDO POR EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO, EN LOS AÑOS 2009 Y 2019, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES.



**Presentado por:
Omar Fernando Velandia Guerrero
Biólogo
3101434**

**Artículo presentado como requisito para obtener
el título de Especialista en Geomática**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ
JUNIO DE 2019**

ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA DETERMINAR LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL Y EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO CAUCA PRODUCIDO POR EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO, EN LOS AÑOS 2009 Y 2019, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES.

Multitemporal Analysis to Determine Changes in Vegetation Coverage and Main Channel of the Cauca's River Produced by the Ituango Hydroelectric Project, between 2009 and 2019, Using Satellite Images.

Omar Fernando Velandia Guerrero
Biólogo

Resumen

Las presas se cuentan dentro de las grandes infraestructuras de la ingeniería asociadas a la producción de energía, actividades agrícolas y control de inundaciones. Sin embargo y pese a sus valores agregados, este tipo de construcciones también implican fuertes impactos sociales, económicos y ambientales sobre las zonas en las que se asientan. Mediante la Clasificación Supervisada de imágenes satelitales procesadas con los software ERDAS IMAGINE® y ArcMap® fue posible cuantificar las alteraciones generadas por el proyecto Hidroeléctrico Ituango sobre la cobertura vegetal y el cauce del río a la altura del Cañón del Cauca en los años 2009 y 2019, así como determinar los principales efectos de la represa sobre la fauna y flora de las poblaciones aguas arriba y aguas abajo de la construcción. Los resultados permiten evidenciar las principales modificaciones en la cobertura de Bosque de Galería y el espejo de agua del río Cauca, generando impactos en términos ecosistémicos y de biodiversidad, los cuales están siendo compensados mediante el establecimiento de acciones de Restauración a lo largo del cauce principal del río.

Abstract

The dams are part of the large engineering infrastructure associated with energy production, agricultural activities and floods control. However, despite their added value, these types of constructions also have strong social, economic and environmental impacts on the areas in which they are located. Through the Supervised Classification of satellite images processed with the ERDAS IMAGINE® and ArcMap® software, it was possible to quantify the alterations generated by the project on the vegetation coverage and riverbed at the Cauca's Canyon in 2009 and 2019, as well as to determine the main effects of the dam on the fauna and flora of the populations upstream and downstream of the construction. The results show the main modifications in the coverage of Bosque de Galería and the water mirror of the Cauca river, generating impacts in ecosystem and biodiversity terms, which are being compensated through the establishment of Restoration actions along the main riverbed.

Palabras clave: Hidroituango, cobertura vegetal, imágenes satelitales, clasificación supervisada, análisis multitemporal

Key words: Hidroituango, vegetal coverage, satellite images, supervised classification, multitemporal analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Las represas son estructuras asociadas a la producción de energía, producción agrícola, control de inundaciones y otras actividades que generan un valor agregado sobre este tipo de proyectos. Sin embargo, la construcción de grandes represas ha tenido un fuerte impacto sobre los lugares donde se asientan, dentro de dichos impactos ambientales se cuenta la transformación física de los ríos y ecosistemas aledaños con todas las afectaciones en flora y fauna que esto implica [7].

Otros de los efectos de la construcción de presas es la disminución en la cantidad de nutrientes, la cantidad de agua dulce que llega a los mares, pérdida de bosques, hábitats y especies endémicas, las emisiones de gases de efecto invernadero, la retención de sedimentos, la erosión del fondo de los ríos, la alteración en el espejo de agua, profundidad y pendiente hidráulica y la reducción o suspensión del avance de la línea de costa hacia el mar [25].

Por las razones expuestas anteriormente, se hace necesaria la aplicación de técnicas que permitan hacer un seguimiento de las variaciones físicas de las zonas impactadas por este tipo de proyectos, con el fin de dar a conocer los impactos negativos de las obras y de manera simultánea con el proyecto, o en el corto y mediano

plazo, generar estrategias que mitiguen los efectos negativos generados a nivel local y regional, especialmente en el ámbito ambiental.

Con el objetivo de determinar las afectaciones del proyecto Hidroeléctrico Ituango sobre la cobertura vegetal y el cauce del río a la altura del Cañon del Cauca, este trabajo propone el uso de imágenes satelitales procesadas con los software ERDAS IMAGINE® y ArcMap® y su análisis mediante la metodología de Clasificación Supervisada. Los resultados permitirán dimensionar el impacto del proyecto sobre la cobertura vegetal y el espejo de agua.

1.1. Construcción de embalses y su impacto ambiental.

La implementación de este tipo de infraestructuras vulnera los ecosistemas y las especies dentro de las zonas intervenidas, al mismo tiempo que disminuye las coberturas vegetales y altera la morfología del cauce de los ríos [18]. Este hecho ha generado múltiples estudios para monitorear los cambios en las cuencas y la valoración de su magnitud, con el propósito de proponer alternativas para el manejo, prevención y mitigación de los impactos generados sobre la biota asociada a los ecosistemas afectados [22].

Los efectos que tiene la construcción de presas sobre los ríos han sido

jerarquizados dentro de tres grupos. Los de primer orden incluyen: desvío de los ríos, llenado del embalse, alteración en la transferencia de la energía proveniente de la cuenca afluyente y la variación en la tipología del esquema del caudal aguas abajo; los efectos de segundo orden, evaluados sobre una escala mayor en el tiempo, son el cambio en la geomorfología del cauce y la influencia del río sobre su plano lateral aguas abajo de la presa; los de tercer orden se refieren a los impactos sobre la biota acuática como consecuencia de la interacción de los efectos de las categorías anteriores [23].

El impacto más evidente para las poblaciones ribereñas es la disminución de la fauna íctica en las zonas de presa, esto como consecuencia de la interrupción en las rutas de dispersión y migración, el cambio en la oferta de alimento, la alteración en las señales ambientales para activar los procesos de desove y maduración y la generación de condiciones que favorecen el crecimiento individual y reducen las tasas de depredación. Las condiciones de embalse interfieren con el gradiente altitudinal de riqueza reportado en los cuerpos hídricos y crea nuevos gradientes dentro del área de influencia de los embalses [23].

1.2. Antecedentes

Las hidroeléctricas son consideradas como empresas generadoras de energía renovable, al producir dicho recurso a partir de la fuerza del agua, sin embargo, teniendo en cuenta el gran impacto ambiental y social que producen, no están clasificadas como empresas sostenibles [13]. La hidroelectricidad

deriva sus principales inconvenientes de las fluctuaciones en la producción y de la necesidad de inundar espacios útiles para una gran variedad de actividades, los que la ubican en conflicto directo con otras labores productivas. Es en esta necesidad importante de espacio en donde se concentra la principal desventaja de este tipo de proyectos [15].

En el año 2013 la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica en Colombia era de 14478 MW, de los cuales 64% provenía de las hidroeléctricas. Los embalses del país poseen una capacidad de almacenamiento superior a los 15 Mm³, de los que el 54% se destina para generar energía. Los embalses que se han construido por debajo de los 100 m.s.n.m, con gran auge durante la década de los setenta, cuentan con un área superficial aproximada de 325 Km², que corresponden a 11518 Mm³ de agua embalsada o a 8392MW de energía eléctrica efectiva producida, la mayoría de estas presas se encuentran dentro de la cuenca Magdalena-Cauca. Para el año 2027, se planea alcanzar los 24000MW producidos en hidroeléctricas ubicadas dentro de este cauce, por lo que se encuentran en estudio 205 embalses distribuidos a partir de los 100 m de altitud [23].

Estas estructuras proveen el 60% de la energía del país que, por sus características geomorfológicas y riqueza hídrica hacen que sea la fuente de energía más recurrente [22]. En Colombia, el municipio de Antioquia, cuenta con el 25% del potencial energético del país, por lo cual la mayoría de sus ríos se encuentran altamente intervenidos

con desplazamientos e inundaciones, como consecuencias relacionadas. Las características escarpadas y montañosas del departamento producen cañones profundos y tierras onduladas, lo que lo convierten en el productor de la quinta parte de energía nacional [29].

Las técnicas de análisis de imágenes satelitales surgen como una alternativa para, a través de los multitemporales, detectar los cambios producidos en la cobertura vegetal, en los cuerpos de agua, realizando estudios comparativos entre las condiciones previas y posteriores a la construcción de este tipo de infraestructuras. La geomática, se convierte entonces, en una oportunidad técnica para la toma de decisiones acerca de la mitigación de impactos generados por estos proyectos, a partir del análisis del modelamiento de procesos hidrológicos producto de los datos cuantitativos y cualitativos obtenidos a partir de la aplicación de las técnicas de información geográfica [18].

La Clasificación Supervisada se basa en la integración de diferentes fuentes de información incluyendo el conocimiento del área de estudio, lo cual es empleado para definir un algoritmo de clasificación, identificando las clases temáticas para la identificación de las coberturas [27].

1.3. Estudios Multitemporales

Los multitemporales que usan la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica, facilitan el estudio de los sistemas ecológicos a escalas espaciales y temporales, dado que el procesamiento digital de imágenes permite la cuantificación y

medición de áreas y problemáticas ambientales y su evolución en el tiempo. Este tipo de estudios también han permitido determinar el grado de afectación sobre los ecosistemas como consecuencia de eventos naturales o antrópicos como por ejemplo, incendios forestales, el retroceso de los glaciales, los impactos ambientales causados por la implementación de diferentes proyectos [17].

Dentro de los estudios relacionados se encuentran el Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia, realizado por Flórez *et al* (2016); El Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y cambio de uso del suelo del área de influencia del programa de reforestación de la Federación Nacional de Cafeteros en el Municipio de Popayán, Cauca, a cargo de De la Cruz y Muñoz (2016); Actualización del Mapa de Coberturas Vegetales, Análisis Multitemporal y Métrica del paisaje del municipio de Envigado. Informe Final, desarrollado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Rural del Municipio de Envigado (2014); El Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico- provincia Caravani en los años 1989-2014, por Condori *et al* (2018), el Análisis Multitemporal de imágenes Landsat para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la Laguna Leoner, Granma, Cuba [11], cuyos resultados permiten determinar los efectos, a nivel cuantitativo, de diferentes actividades productivas (minería, agricultura, restauración

ecológica y fenómenos naturales (disminución de áreas glaciares y nevadas) sobre la disminución o incremento de las coberturas vegetales en las zonas impactadas para facilitar la toma de decisiones en cuanto a la mitigación de impactos ambientales y los logros de las técnicas de conservación y restauración ejecutadas.

Otros estudios han abordado el impacto de diferentes actividades sobre los cauces de los ríos y la cobertura vegetal aledaña, como lo realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales "IDEAM" relacionado con el Análisis Multitemporal del cauce del Río Magdalena en el período 1980-2000. Sector Barrancabermeja - Bocas de Ceniza [19], mediante el cual fue posible identificar los sectores donde el cauce del río se hace más inestable y tomar las medidas preventivas pertinentes. Otro multitemporal realizado sobre la ribera del río Guadarrama (Madrid), elaborado por Aguirre *et al* (2009), del cual fue posible determinar la disminución del caudal y el incremento de la cobertura vegetal de la ribera, evidenciando los procesos de regulación del caudal propios del río.

Por último, el análisis multitemporal utilizado para realizar una evaluación morfológica del río Uré (Córdoba – Colombia), basada en fotografías aéreas de diferentes años [24], permitió construir un mapa de coberturas que evidenciaba la variación de la extensión vegetal a través del tiempo, relacionándola con fenómenos naturales como las temporadas de lluvia o con intervenciones antrópicas como las construcciones urbanas y la extracción de Níquel por parte de

Cerro Matoso, esto sumado a la modificación de la morfología del Río, en cuanto a dirección y longitud de su cauce.

El presente estudio permite aplicar las técnicas de Análisis de Imágenes Satelitales y SIG para determinar la variación del cauce y cobertura vegetal en la zona de influencia del Proyecto Hidroituango para establecer los impactos generados y proponer medidas de mitigación en el corto y mediano plazo.

Con la entrada en funcionamiento de la presa, se proyecta la inundación de 4539 ha de bosque seco tropical, reteniendo veinte millones de metros cúbicos. En la margen izquierda, las inundaciones ocuparán territorios ubicados en Ituango, Peque y Buriticá y en la margen derecha, se inundarán predios de Briceño, Toledo, Sabanalarga y Liborina [29].

El proyecto en sus fases iniciales proyectó la desviación temporal del río Cauca, mediante dos túneles de 14 m de ancho y 7 m de altura con longitudes de 811 m y 1065 m respectivamente sobre la margen derecha del sitio de presa, construcción de vías, campamentos, depósitos, rellenos sanitarios, plantas de trituración y plantas de concreto, captación de aguas para uso industrial y doméstico, vertimiento de aguas residuales a los ríos Cauca y San Andrés, aprovechamiento forestal en un volumen máximo de total 474.935,29 m³, para un área de 4.140,42 ha., el cual incluye el aprovechamiento forestal en las 1.515,62 Ha., localizadas por debajo de la cota 385 msnm. De igual forma, la hidroeléctrica podrá hacer ocupación de cauces para la instalación

alcantarillas, puentes y Box Couvert [26].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la zona de estudio

Ituango se encuentra al norte del departamento de Antioquía, a 198 km de Medellín. Su población es de 25000 habitantes y se encuentra entre los más grandes del departamento. Tradicionalmente su economía se ha basado en la agricultura, cultivos de café, maíz, caña de azúcar y frijol [30]

El proyecto Hidroeléctrico Ituango, con un costo total de US\$ 5508 millones, se encuentra ubicado en el gran Cañón del río Cauca, con influencia sobre doce municipios del norte y Occidente del departamento. Olaya, Liborina, Sabanalarga, Toledo, San Andrés de Cuerquia, Briceño, Yarumal, Ituango, Peque, Buritacá, Santa Fe de Antioquia y Valdivia [20]. La presa, con una altura de 220m, cuenta con 70 Km de largo, una cota de 430m, con 12m de ancho y 500m de longitud. Se espera que con la puesta en marcha de la represa, Hidroituango aporte el 17% de la energía Nacional, generando 2400 MW [29].

El sitio de presa se localiza a 8 km aguas abajo del puente de Pescadero, sobre el río Cauca, en la vía a Ituango. Según la información reportada en el mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, escala 1:100.000 [21], se indica que el proyecto se localiza en los biomas Pedobioma del Zonobioma Húmedo Tropical y Zonobioma Húmedo Tropical, en los biomas IAvH Hidrobioma Nechí-San Lucas, Zonobioma Húmedo Tropical Nechí-

San Lucas, en el área hidrográfica del Magdalena Cauca, zona hidrográfica del Cauca y subzona hidrográfica Directos Río Cauca entre Río San Juan y Puerto Valdivia (Figura 1).

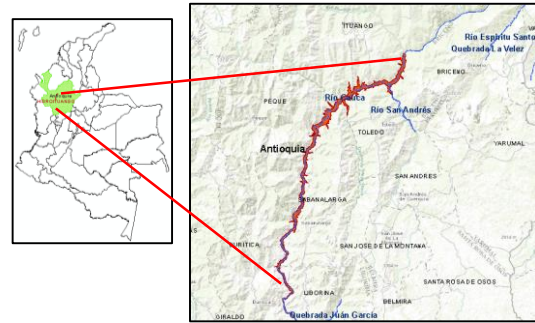


Figura 1. Área de estudio – Proyecto Hidroeléctrico Pescadero - Ituango
Fuente: Elaboración propia.

2.2. Reconocimiento del área de estudio

El represamiento del río a la altura del cañón del Cauca, es el protagonista de las alteraciones en el cauce de la cuenca y en la cobertura vegetal, estos cambios fueron detectados mediante el análisis de las imágenes y respaldados por el trabajo de campo realizado durante el desarrollo del presente proyecto (**Fotografía 1**).

Como primer aspecto para la identificación de las coberturas, se realizó una visita al área de estudio durante el mes de mayo, donde se geo-referenciaron puntos de control, y se indagaron los impactos ambientales generados por el desarrollo del proyecto y la implementación de medidas de prevención, mitigación, corrección y compensación de acuerdo con la aplicación de la jerarquía de la mitigación.



Fotografía 1. Infraestructura del proyecto Hidroeléctrico Pescadero – Ituango.
Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de las imágenes satelitales y el Modelo Digital de Elevación, se contó con las siguientes fuentes de información:

- <https://earthexplorer.usgs.gov/>, por medio del cual se obtuvieron imágenes Sentinel 2, de los años 2015 y 2019, empleados como insumos para la identificación de las coberturas [14].
- <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>, correspondiente a una base de datos de información satelital, del cual se obtuvo el Modelo Digital de Elevación, el cual presenta una resolución de 12.5 m. [2].
- Visor Geográfico de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales “ANLA – SIGWEB Ágil - SAT”, del que se obtuvieron imágenes satelitales de los años 2009 y 2019, las cuales fueron las empleadas para procesamiento y análisis de resultados. [4]

A continuación se presenta el diagrama general de las actividades ejecutadas para el desarrollo del presente estudio (**Figura 2**).

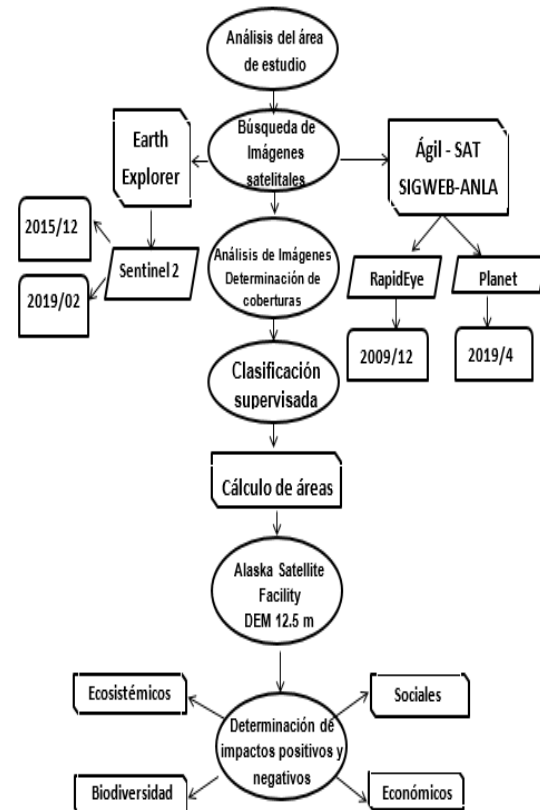


Figura 2. Diagrama Metodología de trabajo
Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 1** y en la **Figura 3** se presenta un resumen de las características generales de los insumos empleados:

Tabla 1. Insumos empleados para el análisis del proyecto Hidroeléctrico Pescadero – Ituango.

Sensor	Fecha de Captura	Resolución espacial
RapidEye-3	2009-12-30	6.5 m
PlanetScope	2019-04-03	3.9 m
Sentinel 2	2015-12-24	10 m
Sentinel 2	2019-02-16	10 m
ALOS PALSAR-DEM	2011-03-16	12.5

Fuente: Elaboración propia.

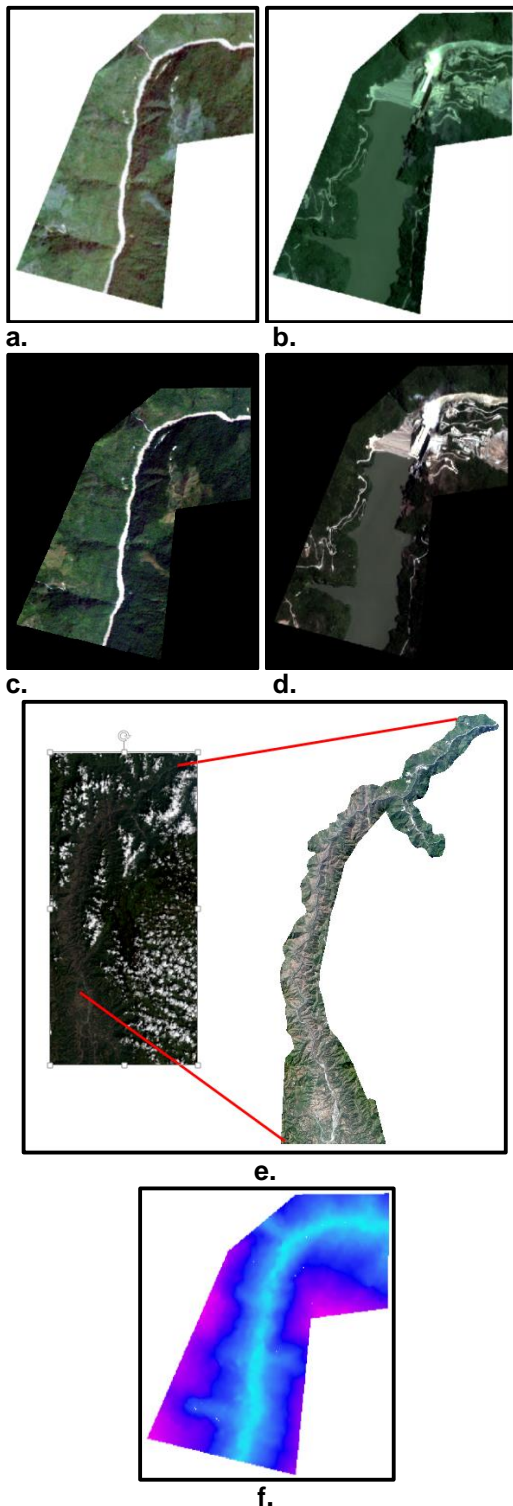


Figura 3. Productos empleados para el análisis multitemporal. **a.** Imagen Satelital RapidEye-3 / 2009, sin procesamiento. **b.** Imagen Satelital PlanetScope / 2019 sin procesamiento. **c.** RapidEye-3 / 2009 Procesada. **d.** PlanetScope / 2019 procesada **e.** Imagen satelital Sentinel 2. **f.** Modelo Digital de Elevación del área de estudio.

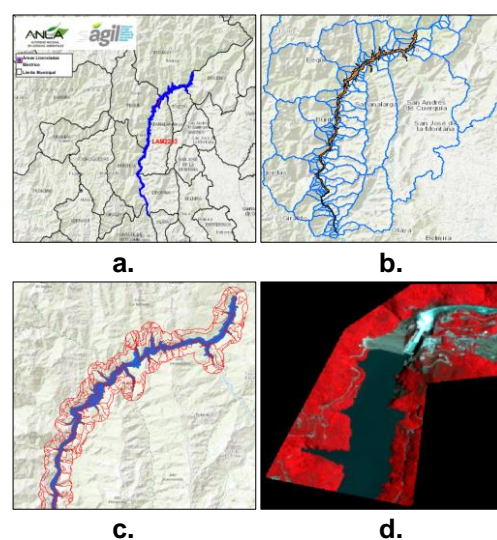
Fuente: Elaboración propia.

Adicional a las imágenes previamente mencionadas, se emplearon los siguientes insumos para la identificación de las coberturas de las imágenes a procesar, correspondientes a las obtenidas de los satélites RapidEye-3 y PlanetScope (**Tabla 2** y **Figura 4**).

Tabla 2. Fuentes de información para la identificación de coberturas.

Insumo	2009	2019
Imágenes Sentinel 2	Imagen comparativa	Imagen comparativa
Capa coberturas	Metodología Corin Land Cover 1:100.000 Periodo 2005-2009	Mapa Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia. Escala 1:100.000. Año 2017.
	Metodología Corin Land Cover 1:100.000 Periodo 2010-2012	
Capa Zonificación Hidrográfica	Zonificación hidrográfica 2010	Zonificación hidrográfica 2013
Información del Proyecto	Revisión Expediente LAM2233	Revisión Expediente LAM2233
Análisis multiespectral	5 Bandas	4 Bandas

Fuente: Elaboración propia.





e.

Figura 4. Insumos para la identificación de coberturas. **a.** Información contenida en el expediente LAM2233 en la ANLA. **b.** Zonificación Hidrográfica. **c.** Mapas de coberturas. **d.** Análisis multiespectral. **e.** Identificación de coberturas mediante la georeferenciación en campo para la imagen 2019.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta información se realizó una clasificación supervisada (**Figura 5**) haciendo uso del software ERDAS IMAGINE® y ArcMap®. Este procedimiento incluye las siguientes fases:

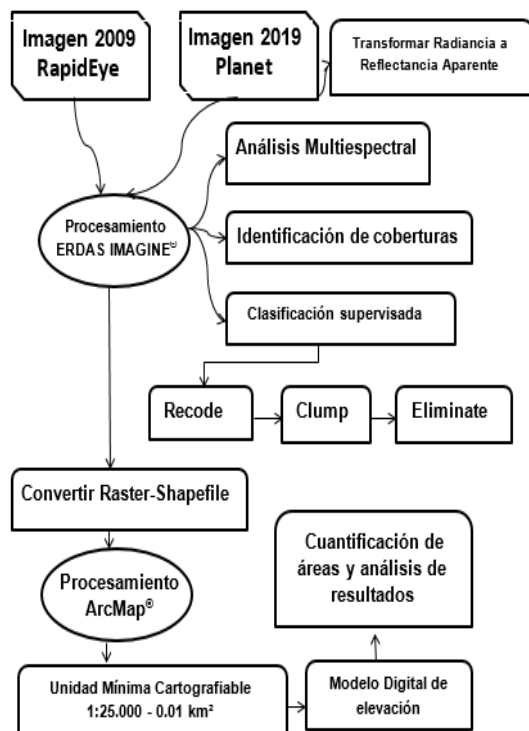
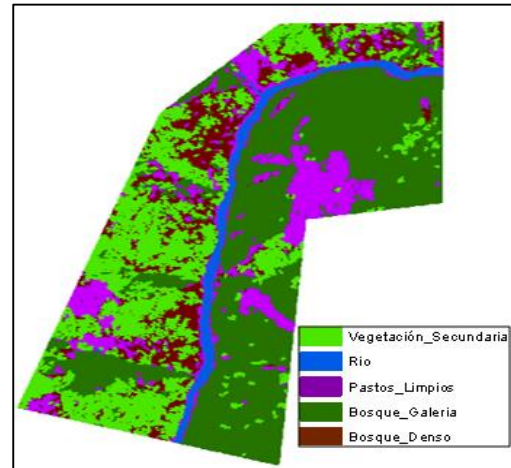


Figura 5. Metodología para la realización de la clasificación supervisada.
Fuente: Elaboración propia.

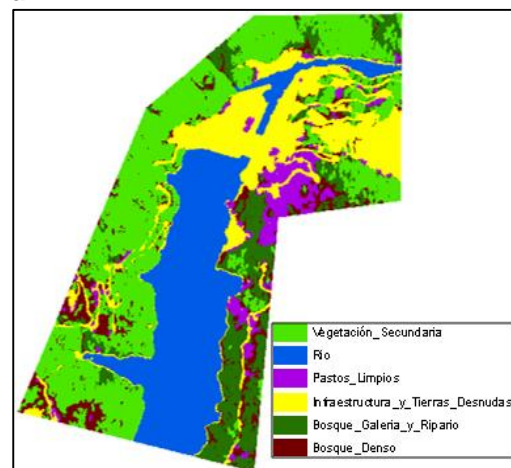
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como resultado de la interacción de información primaria obtenida en campo, así como de información

secundaria, mediante el software ERDAS IMAGINE® y ArcMap® se realizó una clasificación supervisada la cual generó los siguientes resultados:



a.



b.

Figura 6. Clasificación Supervisada **a.** Coberturas producto del procesamiento de la imagen año 2009. **b.** Coberturas producto del procesamiento de la imagen año 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Los productos obtenidos permiten identificar gráficamente las variaciones en la totalidad de las coberturas presentes en el año 2009 comparadas con las coberturas generadas posteriores al desarrollo del proyecto Hidroeléctrico Pescadero – Ituango (año 2019).

Con base en este insumo se incluyó el Modelo Digital de Elevación el cual

presenta una resolución de 12,5m, lo que permitió obtener las áreas de cada cobertura, teniendo en cuenta las amplias variaciones topográficas que presenta el terreno, generando los siguientes resultados:

Tabla 3. Áreas para cada una de las coberturas identificadas en la zona de estudio para los años 2009 y 2019.

Coberturas	2009 [ha]	2019 [ha]
Bosque Denso	149,56	112,11
<u>Bosque Galería y Ripario</u>	<u>378,12</u>	<u>96,02</u>
Pastos Limpios	103,99	30,98
Río	27,04	201,72
Vegetación Secundaria	169,59	234,83
<u>Infraestructura y Tierras Desnudas</u>	**	152,63
Área Total	828,297	

** Ausencia de cobertura

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados permiten identificar un notable incremento en el área cubierta por el río Cauca, en la vegetación secundaria y la presencia de la cobertura denominada Infraestructura y Tierras desnudas con un área total de 152,63 ha para el año 2019, así como una reducción en las coberturas denominadas Bosque Denso, Bosque Galería y Ripario y Pastos Limpios, con respecto a la información generada para el año 2009.

Dentro de las coberturas generadas, se resalta la aparición de la cobertura *Infraestructura y Tierras desnudas*, la cual integra diversas obras de arte para el desarrollo del proyecto como lo son: la Presa, ataguía, vertedero de crecientes, sistema auxiliar de desviación, obras de captación, obras de conducción, casa de máquinas y obras anexas, vías de acceso, remoción de cobertura para estabilización de taludes y demás infraestructura requerida para el desarrollo logístico y técnico del proyecto, evidenciando

un cambio notable dentro del área de análisis.

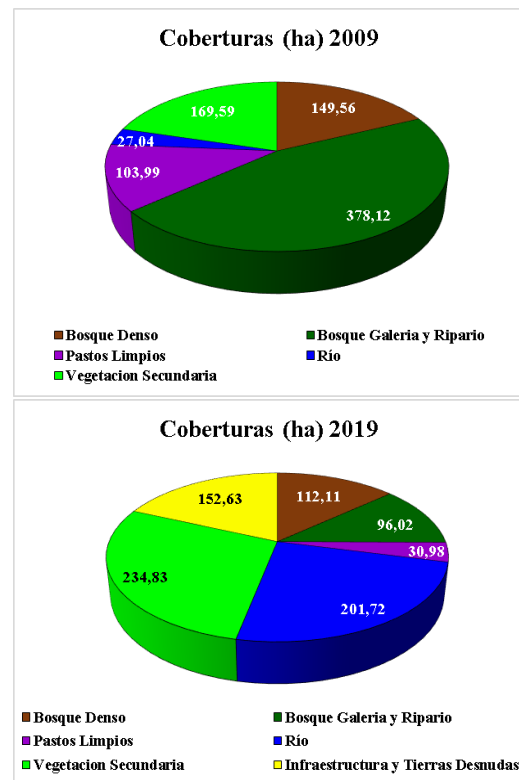


Figura 7. Representación gráfica de las coberturas identificadas en los años 2009 y 2019 en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

El incremento de esta cobertura, así como el aumento en la zona de inundación en la margen derecha del río genera una reducción considerable del Bosque Galería y Ripario, pasando de un área en el 2009 de 378,12 ha a 96,02 ha, cobertura que genera diversos servicios ecosistémicos y biodiversidad asociada.

Con relación al incremento en las área definidas como Vegetación Secundaria, se evidencia un incremento en el área para el producto generado en el año 2019, lo cual se presenta por las actividades de compensación de los diferentes impactos generados, en donde el Titular del Instrumento de Manejo y Control Ambiental, se encuentra ejecutando acciones de

Restauración a lo largo del área de influencia del proyecto aguas arriba de la construcción de la presa.

Para el caso de Pastos Limpios se evidencia una reducción para esta cobertura en el año 2019, en donde varias de las obras para el desarrollo del proyecto se ejecutaron en estas zonas, así como una reducción en las áreas de destinadas a pastoreo por la comunidad, en vista que la totalidad de los terrenos son ahora propiedad de la empresa operadora del proyecto y enfocados en acciones de Restauración y Preservación.

Con relación al área del río Cauca, se analizaron los resultados incluyendo las variaciones aguas arriba y aguas abajo de la construcción de la presa. Para el área que conforman las imágenes satelitales procesadas, aguas arriba se presenta un incremento del 92,57% para el año 2019. Por su parte, para la comparación de las dos imágenes aguas abajo se presenta un área de 9,85ha en el año 2009 y un área de 16,41 ha para el 2019, presentando un incremento del 39,92%. Lo anterior evidencia un incremento considerable teniendo en cuenta el área original “previo a la intervención” principalmente aguas arriba del punto de intervención.

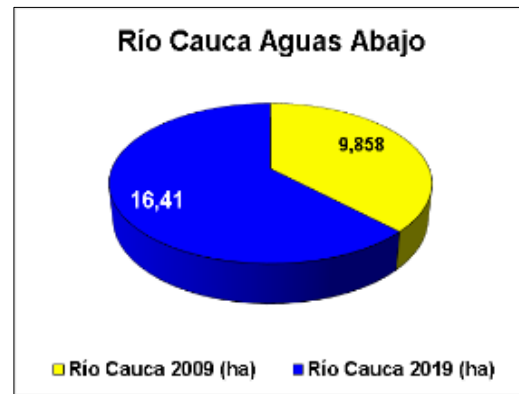
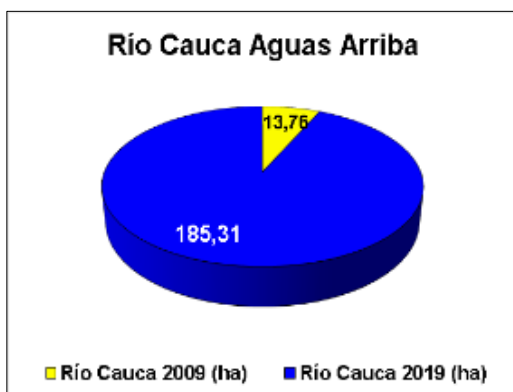


Figura 8. Representación gráfica de las áreas cuantificadas aguas arriba y aguas abajo en los dos periodos de análisis
Fuente: Elaboración propia.

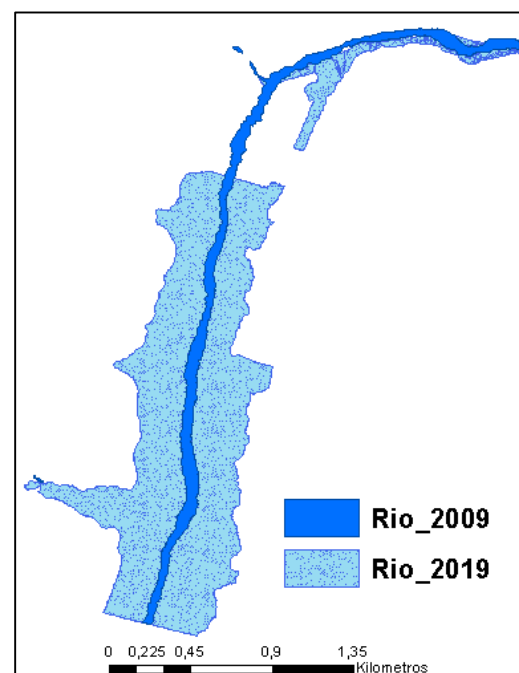


Figura 9. Cobertura del río Cauca para los dos periodos evaluados 2009 y 2019.
Fuente: Elaboración propia.

La modificación en el área del espejo de agua, evidencia la magnitud de los impactos residuales que genera a los ecosistemas intervenidos en términos de cobertura vegetal, biodiversidad y variación en los nichos y hábitos de las especies que se distribuyen en las áreas adyacentes al río.

Para la cobertura de Vegetación Secundaria, se evidencia un incremento de 65,24 ha para la

imagen del 2019, lo cual se da por las acciones de compensación que desarrolla el Titular del Instrumento de Manejo y Control Ambiental, en donde se establecieron invernaderos en los cuales se propagan diferentes especies nativas para los procesos de restauración que se encuentran ejecutando, evidenciando que dichas acciones se encuentran recuperando ecosistemas que pudieron ser afectados por el desarrollo del proyecto o por otros factores tensionantes.

3.1. Identificación de impactos residuales.

De manera general, la calidad fisicoquímica y bacteriológica del recurso hídrico depende entre otros factores de la geología del área que conforma el lecho del río, la cual evidentemente sufrió una notable modificación aguas arriba de la presa, generando una alteración en las condiciones que permiten el establecimiento y desarrollo de las diferentes comunidades hidrobiológicas, las que se incluyen perifiton, fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados, peces y macrófitas.

Dentro de los impactos negativos, fue posible establecer la pérdida de conectividad entre los ecosistemas acuáticos, afectando de manera directa la fauna íctica del río Cauca, en donde la infraestructura no contempla el establecimiento de canales que permitan a las especies migratorias desplazarse aguas arriba del punto de intervención, lo cual genera fragmentación total de las especies a cada lado de la presa.

Este tipo de proyectos reduce la conectividad del cuerpo de agua con su red fluvial, generando una

fragmentación de hábitats en los afluentes aguas arriba, con afectaciones directas sobre las poblaciones ícticas. Para la cuenca del río Cauca-Magdalena se reporta un total de 220 especies [12], en donde las especies que presentan mayor importancia comercial y de autoconsumo corresponden a las que presentan comportamientos migratorios [31], las cuales con la construcción de la presa se ven directamente afectadas, en donde las actividades de migración se generan tanto por procesos reproductivos como tróficos. Estas afectaciones pueden generar un declive en las densidades poblacionales, teniendo en cuenta que la migración se da para suplir dos fases fundamentales para la supervivencia de las especies, como lo son la alimentación y la reproducción.

Estudios anteriores han permitido establecer que las hidroeléctricas producen la pérdida total de la conectividad en tres rangos diferentes de elevación, lo que afecta el crecimiento de los juveniles, la migración y el desove de las especies migratorias asociadas a ríos medianos y grandes [3]

Con relación a la comunidad de macrófitas, aproximadamente 5.0 km aguas arriba de la presa se evidencian consecuencias directas de estas variaciones en las condiciones fisicoquímicas, en donde se reporta la presencia de *Eichhornia craissipes* (buchón).

El establecimiento de buchón, detectado aguas arriba de la presa, se ve favorecido por el represamiento y la acumulación de nutrientes en el agua. *Eichhornia craissipes* es considerada uno de los

principales problemas en las presas del mundo debido a que su naturaleza invasiva disminuye el espejo de agua y la cantidad de luz que penetra en el cuerpo de agua, situaciones que provocan una amplia variedad de impactos residuales como por ejemplo el desplazamiento de las especies acuáticas nativas, variación en la calidad del recurso hídrico, afectación en la estructura y composición de las comunidades hidrobiológicas, así como diferentes aspectos socioeconómicos [9].

Dentro de los impactos físicos, el análisis de las imágenes satelitales permite identificar zonas erosionadas en las riberas, en las nuevas áreas de inundación, así como afectación en el establecimiento de la cobertura vegetal aguas abajo de la presa, lo cual se presenta por la variación en los niveles de humedad relativa por la caída del agua que sale de la presa.

La principal cobertura vegetal que se vio afectada en las zonas de inundación corresponde a bosque de galería, afectando de manera directa los servicios ecosistémicos brindados por este hábitat.

Los bosques de galería se caracterizan por proteger los bancos de los ríos de la erosión y sus pequeñas corrientes, adicionalmente, su estructura vegetal genera microclimas que amortiguan los efectos de la estación seca sobre los ambientes acuáticos, funcionando como moderador de los caudales, absorbiendo el calor, evitando el calentamiento de los sistemas hídricos y enriqueciendo sus aguas mediante el transporte de nutrientes, energía y materiales disueltos [16], servicios

ecosistémicos que se vieron directamente afectados por el desarrollo del proyecto, lo cual es evidente en los procesos de erosión que se desarrollan lo largo del cauce del río Cauca.

Dentro de las acciones enfocadas a compensar por los impactos ambientales generados por el desarrollo del proyecto, enmarcados en el plan de manejo ambiental del proyecto, se encuentran una amplia serie de actividades como por ejemplo:

- Procesos de Restauración con especies nativas.
- Centros de rehabilitación y rescate para la fauna silvestre.
- Generación de conocimiento científico a partir del estudio de la biodiversidad presente en el área, entre otros.
- Repoblamiento íctico en diferentes áreas de influencia del proyecto.
- Beneficios socioeconómicos para los pobladores de los municipios aledaños al proyecto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos por medio de la Clasificación Supervisada y los análisis de las áreas obtenidas, permitieron identificar las variaciones en las coberturas tanto naturales, seminaturales e intervenidas por el desarrollo del proyecto Hidroeléctrico Pescadero – Ituango, en donde las mayores variaciones se presentaron en el área inundada, señalando un cambio en el 92,57% del área que presentaba en el río Cauca en el año 2009.

Así mismo y en vista de las variaciones en las áreas inundadas, se presenta una considerable reducción en los bosques de galería y riparios, el cual se presentaba como la cobertura dominante en el margen derecho del río Cauca en el año 2009, sin embargo al incrementar el área inundada y al estar esta cobertura directamente relacionada con las riberas del río se vio fuertemente afectada.

Con el desarrollo del proyecto se incluye como cobertura Infraestructura y Tierras Desnudas, presentando un área de 152,63 ha, lo cual presenta una modificación total del uso del suelo en comparación con las coberturas identificadas en la imagen satelital del año 2009.

Los resultados obtenidos evidencian los fuertes impactos residuales que se presentan por el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico, en donde la desaparición de coberturas vegetales consecuencia de las nuevas áreas de inundación generan la pérdida de servicios ecosistémicos y áreas fundamentales para los procesos naturales que desarrollan las especies que en ellos habitan.

Por su parte el incremento en el área de inundación genera la modificación en la calidad de agua, lo cual afecta las comunidades hidrobiológicas, como en este caso específico con el desarrollo y proliferación de la especie *Eichhornia crassipes*.

Para el caso de la fauna íctica, si bien su estructura y composición se ve afectada por las modificaciones en las nuevas áreas de inundación, esta comunidad al no presentar sitios de paso perdió la conectividad y el flujo genético con las especies que

se localizan aguas arriba y aguas abajo respectivamente, los cuales deben modificar su comportamiento migratorio con el fin de adaptarse a las modificaciones antrópicas generadas por el desarrollo del proyecto.

Sin embargo las acciones de compensación permiten recuperar áreas degradadas por el desarrollo de otras actividades y/o del mismo proyecto, en donde los procesos de restauración y preservación que se encuentran en ejecución a lo largo del cauce del río Cauca donde se presenta influencia del proyecto, evidencian que la recuperación de coberturas naturales con especies nativas, permite la restauración de los ecosistemas, entendiéndose como recuperar un ecosistema en términos de estructura, composición y función.

Como recomendación se aconseja realizar los análisis en imágenes satelitales que presente una mayor área de análisis, esto en vista que los impactos residuales de un megaproyecto como es la construcción y operación de una hidroeléctrica que abarca 11 municipios no solo se presentan en las áreas inmediatamente afectadas por la construcción de la presa, en donde la variación en el espejo de agua y en general de las coberturas se extiende a un ámbito regional, en donde su análisis permitirá evaluar a fondo los impactos y poder tomar decisiones frente a los impactos previstos y no contemplados por el desarrollo del proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aguirre E., Merino S., Marchamalo M., Carrero L., García De Jalón D. 2009. Estudio Multitemporal y de

- la Vegetación de ribera del Río Guadarrama [Madrid] mediante fotografías aéreas. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Cayalutud, 23-26 de septiembre. Pp 101-104.
- [2] Alaska Satellite Facility. 2019. Recuperado de <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>
- [3] Angarita, H., Wickel, AJ, Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, JA, Herrera-R, GA, Delgado, J. Y Purkey, D. Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompos depression wetlands, Colombia. *Hydrol. Sistema de tierra Sci.*, 22, 2839-2865, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>, 2018.
- [4] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA SIG-Ágil. Recuperado de <http://sig.anla.gov.co:86>
- [5] Bello S., Beltrán R. 2010. Caracterización y Pronóstico del precio Spot de la energía Eléctrica en Colombia. *Revista de la Maestría en Derecho Económico*. Volumen 6. Número 6: 293-316.
- [6] Chuvieco E. 1990. Teledetección y S.I.G: ¿Técnicas paralelas o Convergentes?. *Actas del IV CGC`90*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid.
- [7] Comisión Mundial De Represas. 2000. *Represas y Desarrollo. Un nuevo marco para la toma de decisiones*. Earthscan Publication. Estados Unidos.
- [8] Condori I., Loza M., Mamani F., Soliz H. 2018. Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico- provincia Caravani en los años 1989-2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*. 9 [1]: 25-44. Bolivia.
- [9] Correa, M. 2013. *La Conquista Hidrosocial del Valle de Tenza [Boyacá- Colombia]. El paisaje hídrico de la región en el marco de la planeación y construcción de la represa del Chivor 1940-2010*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Antropología. Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Antropología. Universidad Nacional de Colombia.
- [10] De La Cruz-Burgos J., Muñoz G. 2016. Análisis Multitemporal de la Cobertura Vegetal y cambio de uso del suelo del área de influencia del programa de reforestación de la Federación Nacional de Cafeteros en el municipio de Popayán, Cauca. Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería. http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2807/DeLaCruz_Burgos_Jenni_2016.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- [11] Denis D. 2015. Análisis Multitemporal de imágenes Landsat para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la laguna Leonero, Granma, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*. Volumen 36, 47-53. Flora y Vegetación. La Habana. Cuba.

- [12] Donascimento C, Herrera-Collazos EE, Herrera-R GA, Ortega-Lara A, Villa-Navarro FA, Usma-Oviedo JS, Maldonado-Ocampo JA. 2017 Checklist of the Freshwater fishes of Colombia: a Darwin Core alternative to the updating problem. *ZooKeys* 708: 25-138. <http://doi.org/10.3897/zookeys.708.13897>.
- [13] Duarte B., Boelens R., Yacoub C. 2015. Agua y Ecología Política. El extractivismo en la agroexportación, la minería y las hidroeléctricas en Latinoamérica. *HIDROELECTRICAS, ¿Energía limpia o destrucción socioecológica?*. Capítulo 15. Quito. Ecuador.
- [14] Earthexplorer. 2019. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [15] Espejo C., García R. 2010. Agua y Energía: Producción hidroeléctrica en España. *Investigaciones Geográficas*. Número 51. Pp 107-129. ISSN: 0213-4691. Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante.
- [16] Fajardo A., Veneklass E., Obregón S., Beaulieu N. 2017. Los Bosques de Galería. Guía para su Apreciación y Conservación. Centro Internacional de Agricultura Tropical. CIAT.
- [17] Florez G., Rincón A., Cardona P., Alzate A. 2016. Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA* 84 [201], pp. 95-101. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/55759/63753>.
- [18] Fonseca C. 2015. Estudio Multitemporal para la detección de cambios físicos en las coberturas vegetales y en el cauce principal, producidos por la construcción de la central Hidroeléctrica El Quimbo. Facultad de Ingeniería. Especialización en Geomática. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. Colombia.
- [19] Grupo Técnico Subdirección de Geomorfología y Suelos, IDEAM. 2002. Análisis Multitemporal del cauce del río Magdalena en el período 1980-2000. Sector Barrancabermeja – Bocas de Ceniza. Documento Técnico de soporte para: Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena- Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales- IDEAM. Bogotá. Colombia.
- [20] Hidroituango S.A. E.S.P. 2018. Informe del estado del proyecto. Proyecto Hidroeléctrico Ituango – Pescadero.
- [21] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 2017. http://geoservicios.ideam.gov.co:8080/geonetwork/srv/api/records/0684d637-5b6a-40e8-80f4-bdf915b3e3da/attachments/E_ECC_MC_Ver21_100K.jpg. 2017. Consultado el 26 de mayo 2019.
- [22] Jimenez L., Lasso C. 2014. Especial embalses y ríos regulados. *Biota Colombiana*. Volumen 15. Número 2. ISSN 0124- 5376. Bogotá. Colombia.
- [23] Jimenez L., Restrepo D., LÓPEZ S., Delgado J. Valderrama M., Alvarez J., Gomez D. 2014.

- Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia. Volumen 15. Número 2. ISSN 0124-5376. Bogotá. Colombia.
- [24] Leon D. 2017. Evaluación Morfológica del río Uré [Córdoba], basado en el análisis multitemporal de las fotografías aéreas de los años 1955, 1970, y 1995, usando PCI geomática y ARCGis. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá Colombia.
- [25] Maza J.A. 2004. La necesidad de construir presas. Ingeniería del agua. Volumen 11. Número 4. México.
- [26] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MINVIVIENDA]. 2009. "por la cual se otorga una licencia ambiental para el proyecto central hidroeléctrica "pescadero - ituango" y se toman otras determinaciones". Bogotá. Colombia.
- [27] Posada, E., Ramírez, H., Espejo, N. 2012. Manual de prácticas de percepción remota. Parte I. Centro de investigación y Desarrollo en Información Geográfica. CIAF. Instituto Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.
- [28] Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Rural. 2014. Actualización del Mapa de Coberturas Vegetales, Análisis Multitemporal y Métrica del paisaje del municipio de Envigado. Informe Final.
- [29] Soler J.P., Roa T. 2015. Agua y Ecología Política. El extractivismo en la agroexportación, la minería y las hidroeléctricas en Latinoamérica. Colombia: desarrollo, hidrocracias y estrategias de resistencia de las comunidades afectadas por Hidroituango. Capítulo 19. Quito Ecuador.
- [30] Úsuga E. 2014. Impactos Sociales y Económicos de la Hidroeléctrica en Ituango. Trabajo de grado para optar por el título de Administración de Empresas. Universidad de Medellín. Antioquia.
- [31] Zapata, L A & J. S Usma [Editores]. 2013. Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. Vol. 2. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia. Bogotá. D.C, Colombia P. 486.