

---

# **ANÁLISIS MULTITEMPORAL USANDO TECNOLOGÍAS SIG PARA EL MONITOREO ESPECIALIZADO DE PRESAS DE GRAN ENVERGADURA EN COLOMBIA, CASO DE ESTUDIO: HIDROITUANGO**

**Manuela Mejía Castaño**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director:

Ingeniero Electricista, PhD en Ingeniería: José Fernando Mejía Correa

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2022



## Resumen

Este estudio comprende el análisis multitemporal del comportamiento durante y después de la construcción de una presa, resaltando la importancia del uso de tecnologías de punta para el monitoreo de grandes infraestructuras, lo cual, constituye uno de los mayores retos para las empresas de generación de energía, en este caso de estudio para la presa de Hidroituango, localizada sobre el río Cauca principalmente en los predios de Ituango y Briceño. Se trabajó con datos de sensores remotos, principalmente del satélite japonés ALOS-2, con el cual, se obtuvieron mapas de calor y contornos de desplazamiento en el periodo 2019-2021 y fueron visualizados por medio de herramientas SIG. Se construyeron diferentes aplicaciones web en ArcGIS Online (StoryMaps, Sliders, Tableros de control), con el fin de visualizar y analizar los datos disponibles para el estudio, y se observa que las tasas de desplazamiento registradas coinciden con el comportamiento esperado en una presa de enrocado, en donde se continuarán registrando tasas lentas de desplazamiento durante toda la vida útil de la misma. Por último, se realizaron diferentes comparaciones de los datos registrados por un radar terrestre con el fin de corroborar los valores máximos de desplazamiento en la presa (18 cm). Se concluye que el monitoreo previo y posterior a la construcción de una presa es fundamental para su desarrollo eficaz y seguro, además del contraste existente entre las diversas técnicas y equipos de monitoreo que pueden llegar a existir en un proyecto hidroeléctrico (GNSS, Sismómetros, Caudalímetros, Estaciones Robóticas, Inclínómetros, entre otros).

**Palabras clave: presa, satélite, SIG, monitoreo, radar.**



# Abstract

This study performs a multi-temporal analysis of the behavior during and after the construction of a dam, highlighting the importance of the use innovative technologies for the monitoring of large infrastructures, which constitutes one of the greatest challenges for power generation companies, in this study case for the Hidroituango dam, located on the Cauca River mainly in the Ituango and Briceño properties. Data were obtained from remote sensors, mainly from the Japanese satellite ALOS-2, with which heat maps and displacement contours were obtained in the period 2019-2021 and were visualized through GIS tools. Different web applications were built in ArcGIS Online (StoryMaps, Sliders, Dashboards), in order to visualize and analyze the data available for the study, and it is observed that the registered displacement rates coincide with the expected behavior in a dam of rockfill, where slow displacement rates will continue to be recorded throughout its useful life. Finally, different comparisons of the data recorded by a terrestrial radar were made in order to corroborate the maximum displacement values in the dam (18 cm). It is concluded that the monitoring before and after the construction of a dam is essential for its effective and safe development, in addition to the contrast between the various monitoring techniques and equipment that may exist in a hydroelectric project (GNSS, Seismometers, Flowmeters). , Robotic Stations, Inclinometers, among others).

**Keywords: dam, satellite, GIS, monitoring, radar.**



# Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	8
2. JUSTIFICACIÓN .....	10
3. OBJETIVOS.....	12
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
4. ANTECEDENTES .....	13
5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	18
5.1 ARTÍCULOS DE CONSTITUCIÓN .....	18
5.2 RESOLUCIONES LEGISLATIVAS .....	19
5.3 DECRETOS SUPREMOS.....	20
5.4 RESOLUCIONES SUPREMAS.....	20
6. REFERENTE TEÓRICO .....	21
7. DESARROLLO DEL TRABAJO .....	25
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	33
9. CONCLUSIONES.....	50
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51



# Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Pirámide de Kelsen. Tomada de la Web.....	18
<b>Figura 2.</b> Huellas de ALOS-2 (blanco) y el área analizada (amarillo). Imagen óptica tomada de Google Earth. Fuente: Epm, 2021.....	27
<b>Figura 3.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2018/07/01-2019/02/24. ....	34
<b>Figura 4.</b> Contornos de desplazamiento de la presa en el periodo 2019/01/13-2019/02/24. ....	35
<b>Figura 5.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/01/13-2019/08/31 .....	36
<b>Figura 6.</b> Contornos de desplazamiento en la presa para el periodo 2019/02/16-2019/08/17. ....	37
<b>Figura 7.</b> Gráfica de desplazamiento absoluto acumulado en la presa para el periodo 2019/01/13-2019/08/31. ....	38
<b>Figura 8.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/06/16-2020/01/04. ....	39
<b>Figura 9.</b> Gráfica de desplazamiento absoluto acumulado en la presa para el periodo 2019/06/16-2020/01/04. ....	40
<b>Figura 10.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/12/01-2020/08/15. ....	41
<b>Figura 11.</b> Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el periodo 2019/12/01-2020/08/15. ....	41
<b>Figura 12.</b> Contornos de desplazamiento en la presa para el periodo 2019/08/17-2020/08/15. ....	42
<b>Figura 13.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2020/07/04-2020/12/19. ....	43
<b>Figura 14.</b> Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el 2020/07/04-2020/12/19. ....	44
<b>Figura 15.</b> Mapa de calor de la presa para el periodo 2020/07/04-2021/11/28. ....	44
<b>Figura 16.</b> Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el 2020/07/04-2021/11/28. ....	45
<b>Figura 17.</b> Contorno de desplazamiento en la presa para el periodo 2020/11/29-2021/12/31.....	46
<b>Figura 18.</b> Dahsboard con las gráficas de desplazamiento captadas por el Radar SARX para la presa. 47	



# Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<i>Tabla 1. Matriz de involucrados del proyecto. ....</i>	32
<i>Tabla 2. Tabla de resultados esperados del proyecto. ....</i>	48
<i>Tabla 3. Tabla de impactos esperados del proyecto.....</i>	49



# Lista de símbolos y abreviaturas

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>CMT</i>	Centro de Monitoreo Técnico
<i>PHI</i>	Proyecto Hidroeléctrico Ituango
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica
<i>UNGRD</i>	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres



# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## DE INVESTIGACIÓN

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) se localiza sobre el río Cauca, situado en la cordillera central al noroccidente del departamento de Antioquia, principalmente entre los predios de Ituango y Briceño. El proyecto se conforma por una presa de 225 m de altura y 20 millones de m<sup>3</sup> de volumen y será la hidroeléctrica más grande y generadora del país, y, además, una distribuidora de energía de alta demanda a nivel nacional e internacional.

A raíz de la contingencia del proyecto presentada en el año 2018 debido a las afectaciones ambientales y técnicas sobre el proyecto, nace el Centro de Monitoreo Técnico (CMT), operativo 24/7, el cual permite la emisión de alertas tempranas en caso tal se presente algún cambio relevante en el comportamiento en las obras principales del proyecto. Este está compuesto por áreas de análisis que monitorean variables de tipo hidrométrico, sismológico, interferométrico, geodésico y de instrumentación geotécnica, entre otras, que permiten un análisis profundo del comportamiento de la obra, integrando tecnologías SIG. Aunado a lo anterior, con todos los elementos de innovación que se han desarrollado, nace un referente importante para la sociedad Colombiana, ya que, se considera como uno de los primeros centros de monitoreo especializados en presas, lo cual, en la producción de energía no se tenía contemplado. Lo anterior, es un insumo para el enriquecimiento del conocimiento científico y el desarrollo de investigaciones.

El área de influencia del proyecto se encuentra circunscrito al Municipio de Ituango y los corregimientos aleñados aguas abajo de la presa como lo es Puerto Valdivia, siendo la comunidad directamente impactada en la construcción y operación de Hidroituango. Hoy el desarrollo del





centro de monitoreo permite el seguimiento constante de todas las variables, para dar un parte de seguridad y tranquilidad a estas comunidades, y, además, a la ejecución correcta de las actividades dentro del mismo proyecto.

Lo anterior, tiene un impacto en la prevención y atención temprana de desastres, así como en las comunidades alrededor, y las partes relacionadas con el diseño, construcción y operación de la presa, además, en un contexto más global, se convierte en un foco referente para otros entes interesados en la producción de energía en la región o en el país. Esto tiene un gran impacto, ya que, para entidades ambientales que reglamentan estos proyectos se facilita el seguimiento a grandes infraestructuras, lo cual, podría acelerar la aprobación de estas y directamente beneficiar el crecimiento económico de un país.

En este trabajo, se realizará un análisis comparativo multitemporal del comportamiento del terreno durante y después de la conformación de la presa de Hidroituango. Lo anterior, será posible por medio de los datos que se han obtenido a lo largo del tiempo con diferentes tipos de sensores e instrumentación dentro de las obras principales, además del análisis por medio de herramientas SIG que permitan la visualización e interacción multiparamétrica de las variables.

El desarrollo de este proyecto podrá ser una base para conocer y comprender el impacto de una mega infraestructura tanto en el componente ambiental, como social y económico, y así, entender la relevancia de contar con la integración de herramientas tecnológicas para el seguimiento del proceso de construcción/operación de un proyecto de estos. De acuerdo con lo anterior, se podrían efectuar sistemas de mitigación y prevención de un evento relevante.



## 2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfocará en resaltar la eficacia y relevancia del monitoreo robusto y continuo de una presa (Hidroituango) haciendo uso de herramientas SIG. La industria de generación de energía hace parte de uno de los focos dentro del crecimiento económico de un país, como es el caso de Hidroituango, el cual, generará 2.400 MW, y una vez entre en etapa de operación comercial, equivaldrá al 17% de la demanda de energía eléctrica de Colombia. Este proyecto es un referente importante en nuestro país, y por esta misma razón, se hace necesario el seguimiento a todos y cada uno de los avances constructivos y operacionales que se lleven a cabo, haciendo énfasis para este caso de estudio, en la instrumentación requerida en el análisis del comportamiento de obras principales y las laderas que conforman la cola del embalse (aproximadamente 75 km de longitud).

Aunado a esto, los centros de monitoreo son escasos en el país, puesto que no existe consciencia en la importancia de estos y no se implementan a menos que haya situaciones que puedan poner en riesgo la vida humana o la ejecución misma del proyecto, por esto, se hace necesario incluir técnicas de seguimiento en todo tipo de proyectos para la atención y prevención temprana de desastres, además de la integración geomática para los análisis requeridos.

En Colombia, hay pocas industrias o empresas que cuenten con el recurso necesario para la inversión a centros investigativos y de monitoreo de alta tecnología. Sin embargo, estas medidas preventivas podrían permitir una ejecución más responsable y humana del proyecto en sí, y beneficiaría directamente a las empresas dueñas del proyecto para regular los procesos y desarrollos de este. La relevancia de estos centros implementados en diferentes proyectos es principalmente enfocada a la gestión y atención temprana de posibles desastres, ya que, ante todo,



se debe salvaguardar la vida humana, y, además, esto podría ser un hito en el avance tecnológico y de gestión de riesgo en el país, para así, en un futuro concebir todos estos centros especializados dentro de un marco legal como parte del manejo y control de una presa.

En este tipo de proyectos, el impacto y enfoque es hacia dos escenarios:

- Comunidades en inmediaciones a los proyectos y que puedan verse beneficiadas e incluidas dentro de todos esos procesos de avance en monitoreo.
- Empresas públicas/privadas que quieran innovar e implementar estos centros de monitoreo dentro de sus proyectos de infraestructura.

Este proyecto tiene una característica diferencial y es el de ser pioneros en el país en monitoreo especializado de presas.



## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis multitemporal usando tecnologías SIG para el monitoreo especializado de presas de gran envergadura en Colombia, para la prevención de desastres en zonas aledañas, tomando como caso de estudio la construcción de la presa Hidroituango (Antioquia)

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recolectar información histórica de las variables históricas monitoreadas por satélite durante el proceso de construcción de la presa.
- Procesar y organizar la información de manera que las variables que se evalúen tengan relación entre ellas.
- Analizar las variables por los periodos de tiempo correspondientes.
- Construir un SIG para la visualización, interacción, y análisis de las variables satelitales, para el seguimiento en la construcción de la presa en Hidroituango.



## 4. ANTECEDENTES

El monitoreo en presas es una práctica importante en los proyectos de infraestructura de gran alcance a lo largo del mundo, no sólo por el ámbito ambiental, sino por el aspecto social e innovador. En infraestructuras de este talante, es necesario el seguimiento a diferentes variables que permitan un sistema de alertas tempranas para los fenómenos que acarrearán las diferentes actividades dentro del mismo proyecto (construcción, estabilización, operación, etc.).

A lo largo del mundo se tienen diferentes casos ejemplo en el monitoreo de presas, como el planteado por Li et. al., (2020), en el cual expone un análisis espacial del proceso de evolución del flujo lodo-arena y su posible efecto desastroso en la ruptura de una presa de relave, enfocándose principalmente en el monitoreo de la seguridad de las presas y la alerta temprana mediante el establecimiento de tres dimensiones de acuerdo con el terreno real y la presente situación actual del relleno del acopio. En este caso, se plantea un monitoreo en un tipo de presa que funciona como almacenamiento de agua y desechos derivados del proceso de extracción. Toman la presa de Qinglong como ejemplo, en la cual realizan una simulación del alcance, extensión y el estado espacial del riesgo presente por el flujo de lodo-arena después de la ruptura de la presa. Lo anterior, fue realizado con una simulación numérica de flujo de escombros e inundaciones, y con lo anterior, se limita el área de influencia de este posible desastre. Cada vez se logra mayor tecnología y eficiencia en el monitoreo, expuesto en casos de estudio como los de Gikas et. al., (2008), Yajun et. al., (2012) y Zhao et. al., (2021).

De acuerdo con el ejemplo anterior, es posible proporcionar las bases para tomar decisiones de ingeniería de manera más razonable, como es el caso expuesto en Hidroituango, dentro del cual, al contar con el CMT, es posible tomar decisiones basadas en cálculos o proyecciones con el



volumen de información que se tiene actualmente, además de esto, es posible determinar el área de influencia, específicamente hablando del proyecto Hidroituango, con el apoyo del Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA), creado en el municipio de Medellín en 1994, en el cual, se tienen diferentes instrumentos y herramientas a lo largo del departamento de Antioquia, que permiten la gestión temprana de desastres.

Li et. al., (2021) expone la importancia de la integración de los datos de seguimiento en el estudio de la deformación de presas de enrocado (igual que Hidroituango), además de resaltar, que las condiciones ambientales, de construcción, y otros factores acarran en el deterioro de los sensores de monitoreo que se tienen desde las etapas iniciales de una presa, lo cual, es un claro ejemplo de lo que sucede regularmente en el monitoreo de infraestructuras, sin embargo, en el caso de Hidroituango, se tiene una cantidad extensa de sensores e instrumentos que permiten el monitoreo de manera efectiva, además de la constante renovación de instrumentación que se encuentre fuera de servicio y la innovación en tecnología es un fuerte importante para el seguimiento. Por otro lado, el autor expone un modelo denominado “Punto de Monitoreo Múltiple” (MMP), el cual integra información espaciotemporal para hacer predicciones de datos faltantes a largo plazo de sensores en mal funcionamiento de acuerdo con la relación entre las coordenadas de posición, los valores ambientales y el asentamiento. Luego de las pruebas realizadas en deformación de presas en escala real, se determina que el modelo MMP es apropiado para las predicciones de datos a largo plazo en fallas del monitoreo de asentamiento dentro de una presa de enrocado, lo que enmarca un nuevo método para determinar la predicción de asentamiento en una presa y los análisis que de allí se derivan.



Diversos estudios se han desarrollado para el monitoreo de deformaciones en presas logrando establecer modelos o predicciones del comportamiento del terreno, el cual se esperaría que responda de manera activa a las diferentes etapas de construcción u operación de la presa y finalmente un asentamiento posterior luego de que se estabilice. Luo et. al., (2018) presenta el caso de la presa de tierra en la Provincia de Guangxi al suroeste de China, la cual fue monitoreada por un periodo de 18 años por diversa instrumentación, mostrando deformación lateral y de asentamiento principalmente en el centro de la presa, dominados principalmente por la presión hidráulica del cuerpo de agua represada. El análisis mostró que el mayor asentamiento se dio aguas arriba de la presa y se atribuyó a filtraciones dinámicas inducidas por los cambios en el nivel del agua del embalse, lo que indica que el frente de la presa debe repararse para minimizar los efectos del nivel dinámico del agua. Lo anterior, es un claro ejemplo del comportamiento de una presa luego de su asentamiento, lo cual, es muy visible en el proyecto trabajado, y resalta la relevancia del seguimiento continuo de las variables del entorno, ya que, permite tomar decisiones a tiempo en caso de que deban hacerse reparaciones o restituciones de la infraestructura para que esta perdure durante su operación y evite la propagación de daños. Otros estudios relacionados con el sistema de manejo de presas y el monitoreo temprano de desastres se expone en el estudio realizado por Anita et. al., (2015), en el cual, se expone la importancia de la toma de decisiones a partir de un centro de control, dando así control a diferentes variables o acciones en una presa, luego de observar por medio de los datos recolectados su comportamiento.

El uso de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es cada vez más usual en todas las ramas del conocimiento (ingeniería, economía, administración, etc.), ya que, juegan un rol muy importante en el análisis de todo tipo de estructuras, y para este proyecto, no es la excepción, ya que permite ganar un conocimiento y acción a partir de una gran cantidad de datos.



Kharazi et. al., (2021) hace uso de tecnologías o métodos SIG para la delimitación de sitios adecuados para represas de agua subterránea en el noreste de Irán. Lo anterior, fue llevado a cabo por medio del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) de acuerdo con los criterios de evaluación del estudio en cuestión. El objetivo de este fue sopesar y priorizar los criterios de la presa de agua subterránea para reconocer los sitios apropiados, y de allí, se desprendió el método de toma de decisiones. Este caso ejemplo, vale la pena resaltarlo ya que el uso de herramientas SIG para el caso de monitoreo de presas no se restringe netamente a las etapas iniciales de operación o construcción, sino también a la prospección o exploración de sitios o cuencas hidrográficas que sean tentativos para la construcción de una hidroeléctrica. Con estas tecnologías es posible medir cualquier tipo de variable o dato que sea relevante para la toma de decisiones. Otros estudios similares a estos fueron realizados por Finch (1997), en el cual, expone el uso de SIG para la discriminación de las áreas que contienen agua de otras que no, así como sombras profundas, las cuales han sido clasificadas de manera incorrecta y facilita el cálculo automático de las capacidades de una presa. Este ejercicio se realizó para dos regiones en Botswana. También puede verse estas aplicaciones de los SIG en presas en estudios como los de Saidi et. al., (2017), Mohammed Noori et. al., (2019), y Shahkooeei et. al., (2014).

Para el caso puntual del monitoreo en presas, se tienen muchos casos de estudio, entre esos el realizado por Schäuble et. al., (2008), en el cual se presenta un enfoque nuevo para calcular la acumulación de flujo con herramientas SIG, y de esta manera, conocer la eficiencia de trampas de las presas y su tiempo de operación específico. Estos cálculos reales permiten conocer la acumulación de flujo para cualquier periodo de tiempo y se puede aplicar a todo tipo de flujos de masa como sedimentos suspendidos o disueltos, de manera que se usan aplicaciones en los campos de hidrología y sedimentología (ArcView y ArcGIS).





Ildoromi et. al., (2018) identificó por medio de SIG un set de índices y lógica difusa para modelar la ubicación óptima de los sitios para la construcción de las presas de control. Basado en la capacidad de construir las presas de contención, el mapa se clasificó de muy alta a muy baja capacidad de construcción y finalmente usando el método de superposición y curva de característica operativa del receptor (ROC), la precisión del modelo espacial se estima entre 70% y 73,5% respectivamente.

Es posible por medio de estas tecnologías hacer modelaciones matemáticas del comportamiento de una presa, desde el componente hídrico, geológico, geotécnico, topográfico, climático, entre otros factores que se relacionan entre sí. Un estudio realizado por Ghoraba (2015), muestra las bondades de los SIG simulando el flujo de corriente de la presa Simly localizada en la cuenca del Rio Saon al noreste de Islamabad, usando la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool), en español, Herramienta de Evaluación del Suelo y el Agua, la cual establece el balance hídrico y estima el volumen de entrada mensual para ser un apoyo en la planificación y manejo de este importante reservorio de agua. La interfaz de ArcSWAT fue implementada en ArcGIS y fue usada para delinear el área de estudio y sus subcomponentes combinado con capas de datos y para editar la base de datos modelo. Finalmente fue comprobado que, si se calibra de manera adecuada, el modelo SWAT puede ser usado de manera eficiente en regiones semiáridas para soportar las políticas del manejo de agua. Con lo anterior, se puede concluir que los análisis de diferentes variables multiparamétricas funcionan de manera efectiva para la determinación de un fenómeno o para la toma de decisiones de acuerdo con lo que se busca en un proyecto, además de resaltar la gran aplicabilidad que tienen los SIG para todo el análisis espacial o no espacial de información.



## 5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

De acuerdo con la pirámide de Kelsen, la cual, representa gráficamente la idea de sistema jurídico escalonado (ver Figura 1), se presenta a continuación el marco legal y normativo del proyecto en cuestión.



*Figura 1. Pirámide de Kelsen. Tomada de la Web.*

### 5.1 Artículos de Constitución

De acuerdo con la base legal aplicable a la sociedad Hidroeléctrica Ituango S.A, entre las algunas de las normas asociadas a la constitución, se tienen las siguientes:

**Ley 142 de 1994**, en la cual se expresa lo siguiente “Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.”, la sociedad Hidroeléctrica Ituango S.A.I se encuentra enmarcada dentro del régimen legal de los artículos 32 y 41, citados a continuación:

#### **Artículo 32. Régimen de derecho privado para los actos de las empresas.**

Salvo en cuanto la Constitución Política o esta Ley dispongan expresamente lo contrario, la constitución, y los actos de todas las empresas de servicios públicos, así como los requeridos para la administración y el ejercicio de los derechos de todas las personas que sean socias de ellas, en lo no dispuesto en esta Ley, se regirán exclusivamente por las reglas del derecho privado.



### **Artículo 41. Aplicación del Código Sustantivo del Trabajo.**

Las personas que presten sus servicios a las empresas de servicios públicos privadas o mixtas, tendrán el carácter de trabajadores particulares y estarán sometidas a las normas del Código Sustantivo del Trabajo y a lo dispuesto en esta Ley. Las personas que presten sus servicios a aquellas empresas que a partir de la vigencia de esta Ley se acojan a lo establecido en el párrafo del artículo 17, se regirán por las normas establecidas en el inciso primero del ARTÍCULO 5. del Decreto-Ley 3135 de 1968.

**Ley 143 de 1994**, la cual, se expresa que “Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.”, citando el artículo 76:

**Artículo 76.** Los actos y los contratos, salvo los que se refieren a contratos de empréstito, celebrados por las sociedades por acciones en las cuales las entidades oficiales tengan participación en su capital social, sin atención a la cuantía que dicha participación represente, se regirán por las normas del derecho privado.

Aunado a lo anterior, en la adquisición de bienes y servicios de esta sociedad, se cuenta con un Estatuto de Contratación propio, según las leyes 142 y 143 de 1994, en concordancia con lo señalado en los artículos 13 y 14 de la Ley 1150 de 2007, esto es, el derecho privado. (Hidroeléctrica Ituango - Código de buen gobierno)

## **5.2 Resoluciones Legislativas**

Dentro de algunas de las resoluciones que acogen el PHI, se tienen las siguientes:

**Resolución 755.** Por la cual se instruye a las subdirecciones técnicas de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales sobre las actividades consideradas modificaciones menores de las licencias ambientales o planes de manejo ambiental establecidos para los sectores de Hidrocarburos y Eléctrico y se fijan en otras directrices. Expedida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) el 31/07/2013.



**Resolución 071.** Por la cual se adopta la metodología para la remuneración del cargo por confiabilidad en el Mercado Mayorista de Energía. Expedida por el CREG el 03/10/2006.

### 5.3 Decretos Supremos

Se tiene para el PHI algunos de los siguientes decretos:

**Decreto 1625.** Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario en materia tributaria. Expedido por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público el 26/05/2015.

**Decreto 1073.** Por medio del cual se expide el decreto único reglamentado del sector administrativo de Minas y Energía. Expedido por la Presidencia de la República el 26/05/2015.

### 5.4 Resoluciones Supremas

**Resolución 0155.** Licencia ambiental de Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Expedida por el Ministerio de Medio Ambiente el 30/01/2009.

Para más información acerca de la normatividad que cobija a Hidroituango, consultar en el Anexo “NORMOGRAMA HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A.E.S.P. (2017).”



## 6. REFERENTE TEÓRICO

La importancia de un centro de monitoreo para grandes infraestructuras nace del hecho de entender inicialmente su definición y los diferentes conceptos que lo acompañan. El monitoreo se define originalmente en la palabra “monitor”, el cual es un aparato que toma un registro sea fotográfico o de cualquier tipo, el cual ayuda a controlar o supervisar una situación. En general, el monitoreo se refiere a la observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías (Pérez y Gardey, 2010).

Del anterior concepto, se desprende una variable importantes para entender el contexto central del proyecto, denominada la gestión de riesgos de desastres, la cual, según la UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres), se define como el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, bienestar y calidad de vida de las personas (UNGRD, 2017).

Actualmente, en Colombia se avanza en la ejecución de diversos proyectos de energía, infraestructura y explotación de recursos naturales, con el objetivo de incrementar la competitividad de la nación y así mismo mejorar calidad de vida de la población, bajo un modelo de desarrollo sostenible. Es en este sentido que Empresas Públicas de Medellín inicia la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) en el año 2013. Se trata de un megaproyecto de ingeniería con el cual se pretende generar 2400 MW de energía, aportando así, el 17% del consumo energético del país. En el año 2018, el taponamiento de la Galería Auxiliar



de Desviación (GAD) del río Cauca ocasionó el llenado súbito del embalse antes de la conformación de la presa, originando lo que se denominó la Contingencia del PHI. Durante los meses siguientes se implementó en las oficinas principales del proyecto el Centro de Monitoreo Técnico (CMT), el cual está destinado a monitorear en tiempo real y de manera ininterrumpida, desde diversas áreas del conocimiento y con instrumentos especializados, las diferentes variables presentadas en los frentes de obra y otros sitios de interés.

Dentro de la instrumentación utilizada para este tipo de monitoreo especializado se tienen algunos ejemplos:

**GNSS:** se define como un Sistema Satelital de Navegación Global, los cuales, permiten dar datos de posicionamiento geoespaciales de manera autónoma. Todo este sistema se compone de una red de satélites y receptores terrestres, los cuales, permiten la navegación y posicionamiento en cualquier parte del mundo. Para el caso del PHI, estos GNSS son útiles a la hora de determinar con un cierto periodo de análisis (mínimo 1 año), la deformación del macizo.

**Radar:** es un instrumento que usa las ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos tanto estáticos como móviles. Para el caso del PHI, se utilizan diferentes radares de apertura sintética 2D (terrestres), para producir imágenes de las laderas del terreno de manera eficaz. Por medio de esta técnica, se monitorea de igual manera, pixel por pixel, la deformación del terreno.

Cabe resaltar, que se tienen numerosos tipos de instrumentos, además de los mencionados anteriormente, los cuales permiten en el monitoreo frecuente, de alta precisión y con alta cobertura de las obras principales del PHI. Así de esta manera, un Centro de Monitoreo Técnico, es el sitio donde se visualizan todos los datos de los numerosos instrumentos, de manera que se puedan



realizar análisis, correlaciones y seguimiento en tiempo real de todo lo que ocurre en un proyecto de gran envergadura, en este caso, de una presa.

De acuerdo con el foco de investigación, el uso de satélites para el monitoreo de grandes extensiones de terreno es cada vez más común, para el caso de la presa de Hidroituango, se utilizan imágenes satelitales de radar para detectar y medir desplazamientos en el terreno y en la infraestructura en áreas extensas, las cuales, se obtienen por medio de la empresa 3vGeomatics, proporcionando tecnología confiable de monitoreo geotécnico, estructural y geoespacial por medio de técnicas InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar* en inglés).

InSAR es una técnica de procesamiento aplicada a dos o más imágenes SAR de la misma área, más comúnmente para generar información de desplazamiento del terreno. Cada píxel en una imagen de radar contiene información de la amplitud y la fase. Después de adquirir dos imágenes, primero son alineadas con mucha precisión y luego se comparan píxel por píxel, para revelar la diferencia de fase. Esta comparación produce un interferograma que muestra la diferencia de fase de cada píxel o el “patrón de interferencia” entre las dos imágenes. Este interferograma contiene la ubicación y magnitud del desplazamiento a lo largo de la línea de visión del satélite (3vGeomatics, 2018).

Las técnicas InSAR pueden mejorar la seguridad de las represas al proporcionar mediciones de asentamiento oportuna de alta resolución espacial. Por otro lado, permite obtener datos de monitoreo en todo momento del día o de la noche, bajo cualquier condición climática y particularmente para áreas extensas con precisión de escala milimétrica. Sin embargo, esta técnica tiene algunas limitantes, como las tasas de deformaciones máximas que se pueden monitorear, y la ubicación exacta para el monitoreo no puede ser determinada. La tecnología InSAR para el



monitoreo de deformación en represas, puede ser utilizada como herramienta para la prevención de catástrofes sin precedentes por medio de métodos de alerta temprana (Aswathi et. al., 2022).

Las infraestructuras energéticas requieren de un monitoreo continuo y un sistema de alertas que permita la gestión temprana de desastres para asegurar la integridad de estas, sin embargo, en Colombia no se implementa de manera robusta el monitoreo en represas, lo cual, es de gran importancia para asegurar el seguimiento de la estabilidad de taludes, activación de deslizamientos o movimientos de pendientes, tasas de movimiento o velocidad, todo lo anterior, es esencial identificarlo a tiempo como posibles indicadores de una falla estructural alrededor de una infraestructura. El CMT implementado en Hidroituango es de gran importancia para el país, ya que, desde allí se busca generar alertas tempranas y así, salvaguardar la vida de las personas en las comunidades aguas abajo. Además de esto, otro de los objetivos principales es mitigar los efectos que tiene el proyecto sobre el medio ambiente, y, por último, cuidar e impulsar la integridad del proyecto y sus trabajadores.





## 7. DESARROLLO DEL TRABAJO

Para llevar a cabo el presente trabajo primero se define el enfoque de la investigación denominada “Análisis multitemporal usando tecnologías SIG para el monitoreo especializado de presas de gran envergadura en Colombia, caso ejemplo: Hidroituango”, el cual, se encamina con la investigación tecnológica, ya que, a partir de esto, se genera conocimiento o métodos de innovación (en este caso por medio del centro de monitoreo técnico) dirigidos al sector productivo de bienes y servicios, donde se pretende mejorar las técnicas de seguimiento de variables durante la construcción de una presa.

Por otro lado, dentro de los enfoques de la investigación, este estudio se clasifica como cuantitativo, ya que, se miden fenómenos por medio de datos recolectados y se tiene un control sobre los mismos. Permite, además, un análisis de causa-efecto sobre el problema planteado. Para este estudio en particular, se tiene un alcance correlacional, ya que, determina la variación de factores en relación con otros (análisis multitemporal de variables), lo que permite entender la relación entre múltiples variables y sus aplicaciones. Además de lo anterior, se alcanza una perspectiva innovadora en cuanto a las tecnologías SIG aplicadas para el monitoreo de presas.

Yuksel et. al., (2008) realizó un mapa de riesgo de erosión para una presa en Kahramanmaras, Turquía (Presa Kartalkaya), todo esto con tecnologías de sensoramiento remoto basados en la metodología implementada en el modelo CORINE (Coordination of Information on the Environment). Se usó imágenes ASTER para generar una clasificación de la cobertura/uso del suelo en ERDAS Imagine, y con esto, se obtuvieron los mapas digitales con otros factores en ArcGIS v9.2. Se concluye que el modelo CORINE junto con el sensoramiento remoto y las tecnologías SIG tienen un gran potencial para producir mapas de riesgo de erosión de manera



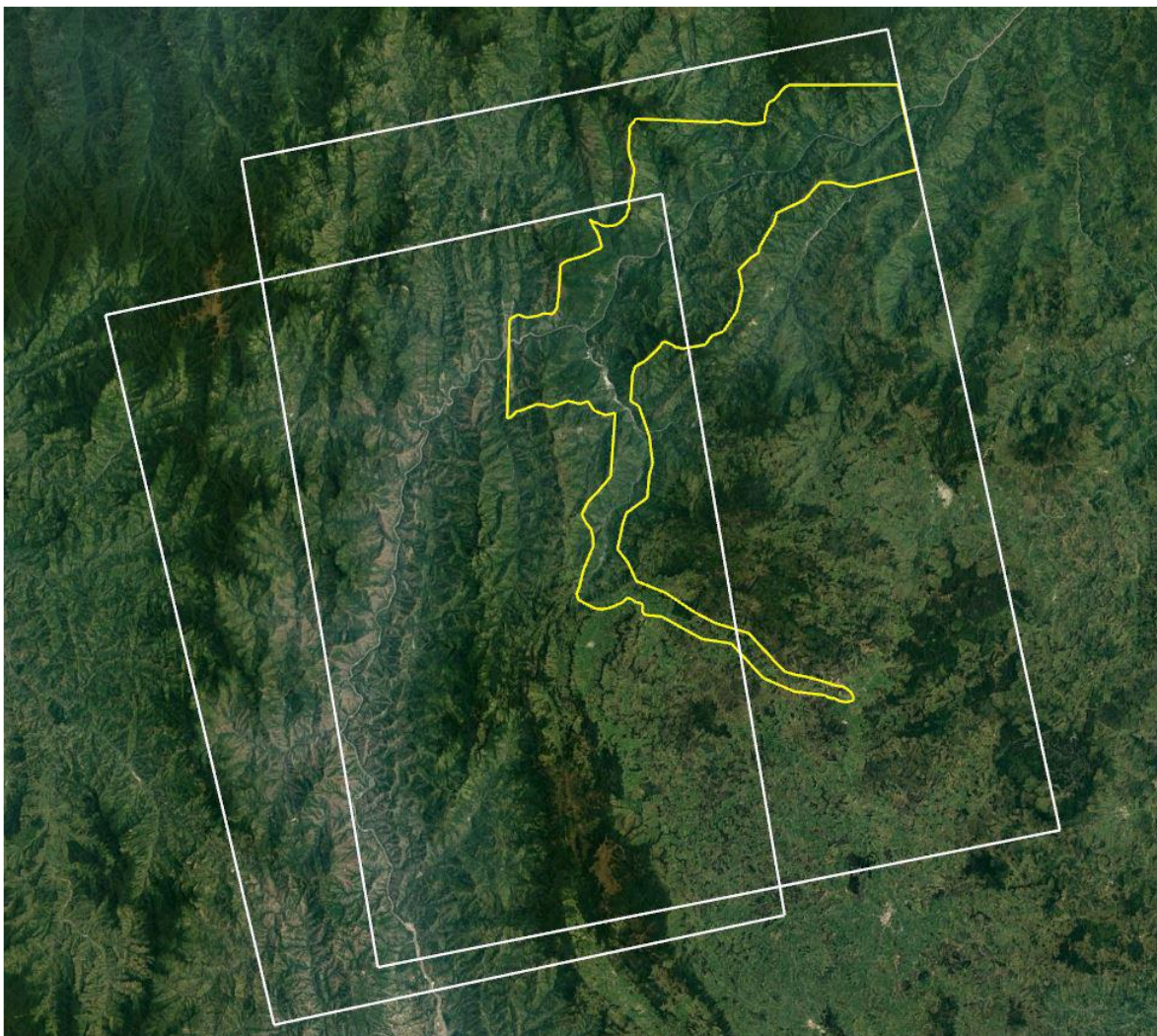
precisa y económica en Turquía. Trabajos como el de Okalp, K. (2008) resaltan la importancia de trabajar con SIG y sensoramiento remoto, ya que, estimó por medio de modelamiento SIG las tasas anuales de la pérdida de suelo en una cuenta hidrográfica mapeando el riesgo de erosión del suelo para un terreno complejo en Turquía. Así como estos estudios, se tienen muchos otros como el de Desmet et. al., (1995), Mitasova et. al., (1996), Sazbo, et. al., (1998), Clarke et. al., (2001), Esengin, E. (2002), Abrams et. al., (2003), Kilic et. al., (2006), Akay et. al., (2007), entre muchos otros.

Con el fin de entender las técnicas de monitoreo que serán analizadas, se define de manera concreta la metodología utilizada por la empresa 3vGeomatics para el procesamiento de los datos satelitales y los productos obtenidos. En primera instancia, el sensor SAR utilizado para el monitoreo es ALOS-2 (perteneciente a la Agencia Espacial Japonesa,) con las siguientes características específicas para el monitoreo de Hidroituango:

- Realiza observaciones SAR en la banda L.
- Tiempo de revisita de 14 días aproximadamente.
- Ángulo de incidencia de 8-70°, con capacidad de observación ascendente de visión izquierda o derecha.
- Escala de tasa: +- 50cm/año.
- Resolución de 3 metros
- Huella de imagen de 55 x 70 km



En la Figura 2 se puede observar la extensión del área de análisis del satélite ALOS-2.



*Figura 2. Huellas de ALOS-2 (blanco) y el área analizada (amarillo). Imagen óptica tomada de Google Earth.  
Fuente: Epm, 2021.*

De acuerdo con el manual del producto descrito por 3vGeomatics (2019), los tipos de datos analizados se dividen principalmente en dos:

**Reportes Rápidos (RR):** son productos de monitoreo en tiempo cuasi-real que mapean magnitudes y extensiones de desplazamiento en el terreno entre dos imágenes SAR. Debido a su



respuesta rápida, los informes rápidos son ideales para identificar nuevos o repentinos cambios en el desplazamiento.

Cabe resaltar que, para cada par de imágenes, existen áreas donde no es posible obtener una medición, y se definen así, dos tipos principales de áreas sin datos o limitantes del monitoreo:

- *Distorsión Geométrica:* corresponden a las áreas donde no hay datos debido a efectos geométricos como sombras, escorzo y escala. Estas áreas tienen una relación directa con la topografía.
- *Perturbación de Superficie:* corresponden a las áreas enmascaradas con el ruido en el par de imágenes. Dado de InSAR se basa en que la superficie del suelo es similar entre las imágenes, el ruido ocurrirá cuando la superficie haya sido alterada (por ejemplo, zonas de excavación, material removido por el viento, voladuras, zonas con alta vegetación, agua abierta, entre otros.).

**Reportes Comprehensive o Completos:** proporcionan un análisis extenso de 8 o más imágenes SAR, las cuales, resumen el desplazamiento ocurrido durante un periodo de tiempo más largo. El análisis proporciona una visión detallada de cómo cambia el desplazamiento con el tiempo.

Con el fin de que las áreas de monitoreo sean visibles, se escoge una tasa de referencia para mostrar los mapas de calor. Para el caso de Hidroituango, se escoge una tasa de +- 50cm/año, esto, con el fin de diferenciar entre las zonas con desplazamientos de baja magnitud y el ruido. Debido a que estos reportes se realizan con grandes volúmenes de datos, son excelentes para identificar desplazamientos mínimos en el terreno, los cuales, pueden no verse reflejados en los RR.

InSAR es una medida unidimensional tomada desde una posición fija en el espacio. La magnitud del desplazamiento medido represente el componente del desplazamiento que se alinea



con satélite ALOS-2. Las tasas de desplazamiento pueden parecer significativamente diferentes dependiendo del ángulo de incidencia del satélite. Este fenómeno es común en todas las tecnologías de radar, pero se puede mejorar combinando medidas tomadas desde varias direcciones (3vGeomatics, 2019).

Los datos utilizados en este estudio son suministrados por el Centro de Monitoreo Técnico perteneciente a Empresas Públicas de Medellín. Para llevar a cabo la recolección, técnica de adquisición y análisis de datos, se tienen en cuenta las siguientes fases de procedimiento:

### **Fase I**

1. Establecer el periodo de análisis para la obtención de los datos obtenidos por las técnicas de monitoreo satelital (etapa post-construcción de la presa, 2019 – 2021).
2. Obtener de los datos de las variables geodésicas e interferométricas (imágenes de radar e interferogramas mediante técnica InSAR (contornos de desplazamiento, mapas de calor, entre otros).

Para el desarrollo de esta fase se tomarán los datos históricos de monitoreo satelital durante la etapa post-construcción de la presa y los datos del radar interferométrico terrestre, que se encuentra monitoreando la presa desde el año 2019. Lo anterior, con el fin de hacer el análisis del asentamiento de la misma presa y la respuesta del macizo. Se toman sets o conjuntos de datos que puedan ser correlacionables tanto por variables medidas como por el periodo de análisis.

### **Fase II**

1. Identificar y organizar la información.
2. Depuración de la información que no sea relevante o que, a su vez, tenga un margen de error alto (datos anómalos, falla instrumental, etc.).



En el desarrollo de esta fase se realizará la organización y depuración de la información, para este caso, de los datos en crudo que se tengan de las variables de radar, además de la revisión de calidad de los datos satelitales. Luego de esto, se logra tener un conjunto de datos para todo el análisis que se lleva a cabo con las herramientas SIG.

### **Fase III**

1. Análisis temporal de periodos de deformación, donde se identifique el momento en que el terreno empezó a responder a la construcción de la presa y el momento en el que empezó a estabilizarse.
2. Correlación entre las respuestas instrumentales del satélite y establecer la relación y diferencia entre cada tipo de dato (a su vez, correlacionado con los datos de radar).
3. Establecer una conclusión global de cómo fue la respuesta del terreno durante las etapas de construcción de la presa y resaltar la importancia del trabajo realizado.

En esta fase se hará un análisis de cada dato tanto de manera independiente como conjunta para evaluar el comportamiento del macizo en las etapas posteriores a la construcción de una presa. Las variables serán presentadas en bases de datos, capas ráster y vectoriales, además de gráficas representativas para el procesamiento de información. Se tendrá un resultado preliminar para poder llevar estas variables a una plataforma usando tecnologías SIG para la correlación entre cada una, teniendo en cuenta diferentes periodos de tiempo y análisis.

### **Fase IV**

1. Evaluar y escoger herramientas SIG pueden llegar a ser útiles en el análisis y visualización de la información, de manera que se pueda realizaron análisis





espaciotemporal de la respuesta del macizo en términos de deformación después de la construcción de la presa.

2. Por medio de los datos obtenidos en las técnicas satelitales, llegar a hacer análisis y posibles predicciones del comportamiento del macizo en respuesta a otros posibles escenarios utilizando herramientas como ArcGIS Insights, Dashboards, StoryMaps, entre otros, los cuales, ofrecen capacidades de análisis espacial y no espacial para explorar datos y proporcionar resultados potentes.

En la última etapa de esta fase, se definirán las plataformas que serán utilizadas para el montaje de la información, de manera que puedan visualizarse e interactuar todas las variables. Esto se llevará a cabo con diferentes pruebas en cada tipo de herramienta con el fin de determinar los alcances de cada una y poder hacer una integración total.

Para llegar a entender con mayor detalle la metodología, se muestra a continuación la integración de los elementos relevantes para tener en cuenta en el desarrollo de este proyecto, donde se muestra un análisis de los grupos involucrados en el mismo.

En la Tabla 1 se observa la matriz de involucrados dentro de la metodología de trabajo.



GRUPOS	INTERESES	PROBLEMAS PERCIBIDOS	RECURSOS Y RESTRICCIONES
Comunidades aledañas a la represa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguridad en cuanto a la estabilidad de un proyecto de generación de energía.</li> <li>- Involucrar a las personas dentro del conocimiento que se genera a partir del monitoreo.</li> </ul>	Desconocimiento ante un proyecto de infraestructura, de sus afectaciones o beneficios.	-
Empresas públicas/privadas interesadas en la generación de energía.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suministro de capacitaciones o insumos básicos para implementar el monitoreo de una presa (sin tener en cuenta la instrumentación convencional usada en construcción de infraestructuras)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poca información de cómo se estructura un centro de monitoreo para presas con tecnologías de punta.</li> <li>- Falta de interés de las empresas para concebir esta idea del monitoreo 24/7 como una necesidad para el proyecto en cuestión.</li> </ul>	Falta de recursos, ya que, se requiere una alta inversión para las tecnologías involucradas en un centro de monitoreo e investigación.
Comunidad científica o centros de investigación (en infraestructuras)	Generación de nuevos conocimientos a partir de la información que se maneje en el centro de monitoreo.	Falta de apoyo económico para la ejecución de	Apoyo de parte de entes externos para llevar estas tecnologías e ideas de monitoreo a otros proyectos.
Entes de control como la ANLA, Reaseguradores, entes ambientales, entre otros.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguimiento del comportamiento en detalle de un proyecto de infraestructura de gran importancia para una región o país.</li> <li>- Seguimiento de procesos de calidad dentro del manejo de los datos.</li> <li>- Acceso a la información y análisis de manera efectiva debido a la alta tecnología.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de orden en las bases de datos de un proyecto o difícil acceso a la información.</li> </ul>	-
Proveedores de equipos de monitoreo en tiempo real	Venta de equipos a esos centros especializados de monitoreo de grandes empresas o proyectos.	Desbalance entre oferta y demanda en este mercado específico.	-

*Tabla 1. Matriz de involucrados del proyecto.*





## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis, se realizó una comparación visual de los Reportes Comprehensive o Completos, Reportes Rápidos y los datos relacionados con el radar terrestre SARX. Además de esto, también se tuvieron en cuenta las gráficas de desplazamiento y velocidad obtenidas en los periodos correspondientes a cada Reporte Completo.

### SATÉLITE ALOS-2

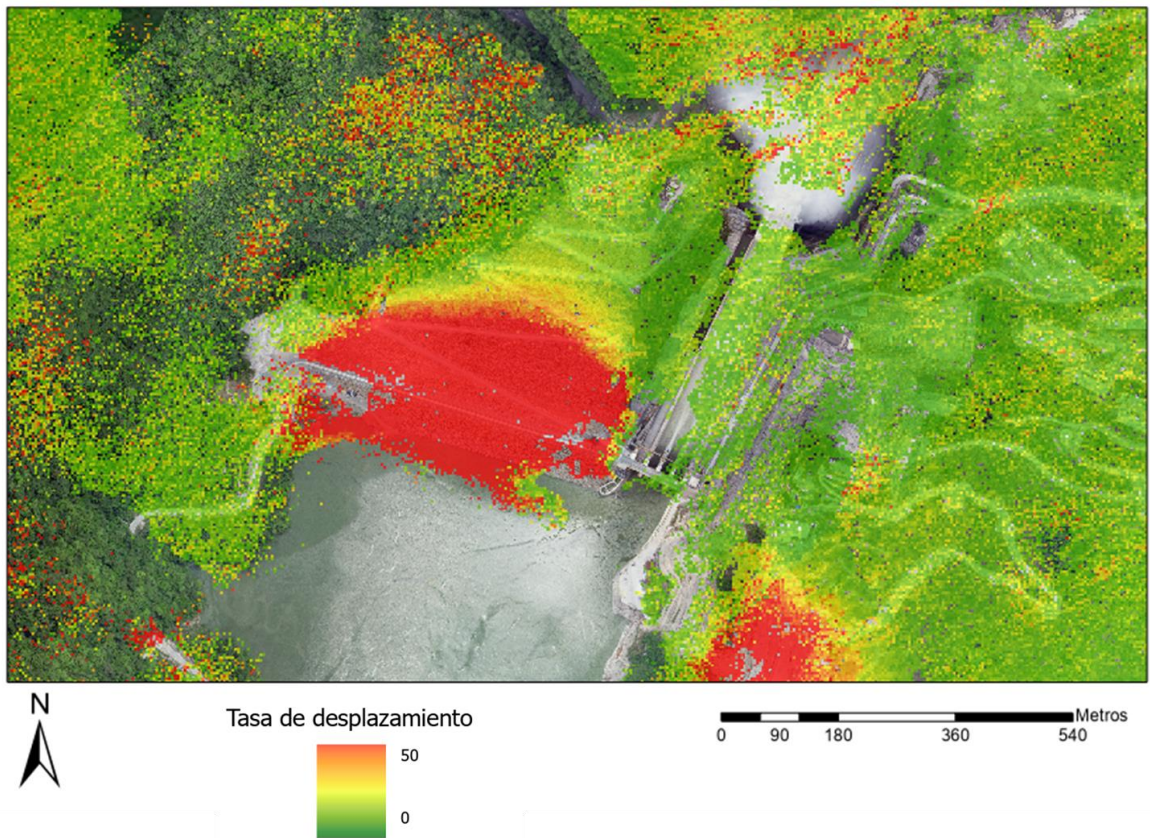
#### PERIODO I

Durante el periodo 2018-2019, la presa de Hidroituango aún no se encontraba conformada en su totalidad, ya que, se encontraban adelantando obras para finalizar la última etapa de llenado de la cota 418 a la 435, y a su vez, se construyó la pantalla de concreto elastoplástico como elemento de control de filtraciones. La colocación continua de material y las diversas obras llevadas a cabo, se ven reflejadas en las altas tasas de desplazamiento captadas tanto por el satélite ALOS-2, como por el radar terrestre SARX. Adicional a esto, la pantalla elastoplástica conllevó una intervención importante, y pudo haber sido la causa principal de las mayores deformaciones registradas, sin embargo, una vez finalizada generó una mayor estabilidad desacelerando fuertemente los desplazamientos.

Los sensores satelitales son sensibles a este tipo de movimiento constante, ya que, son capas nuevas de material, simulando un proceso “deformativo”, además, las capas inferiores de la presa son sometidas a una mayor compresión, y, por ende, mayor compactación, lo que es traducido en asentamiento.



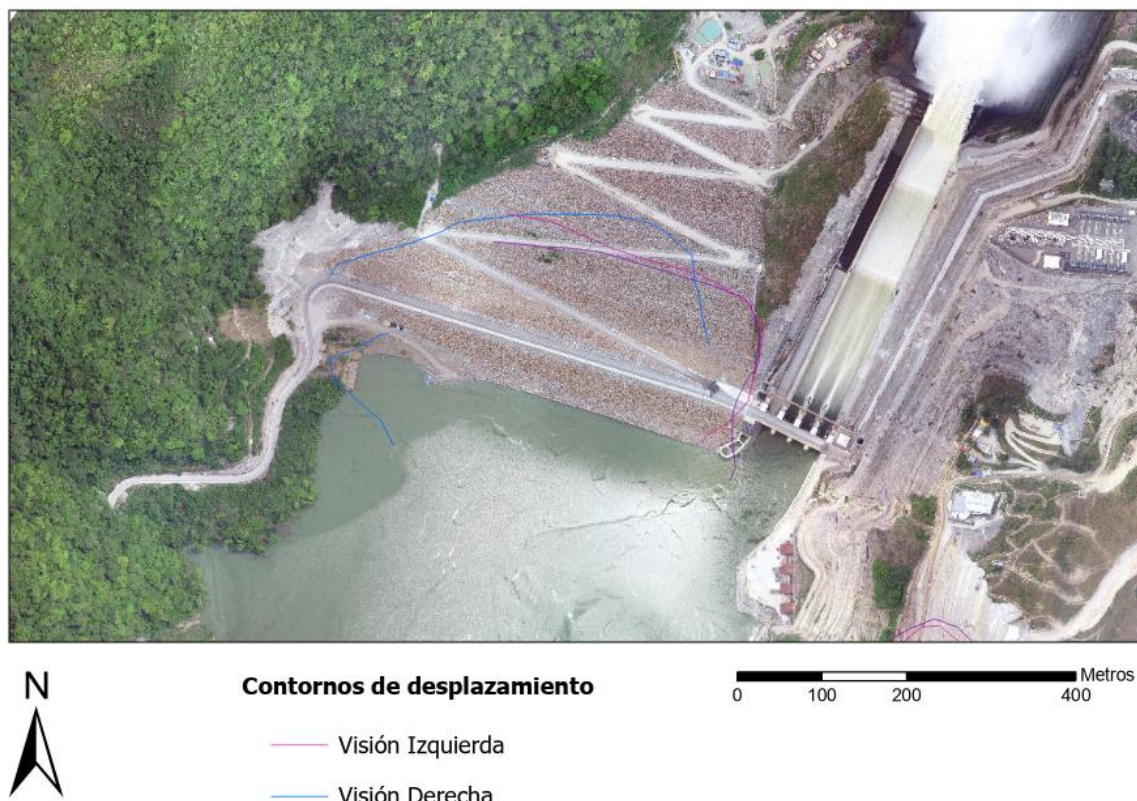
En la Figura 3 se tienen tasas de desplazamiento de hasta 80 cm/año y concuerdan con el alcance que presentan los contornos de desplazamiento para este mismo periodo (Figura 4), todo esto teniendo en cuenta que durante inicios del 2019 la presa aún se encontraba en el periodo de conformación. Para este periodo se tienen dos contornos de visión izquierda y uno de visión derecha.



**Figura 3.** Mapa de calor de la presa para el periodo 2018/07/01-2019/02/24.

Fuente: Epm, 2021.





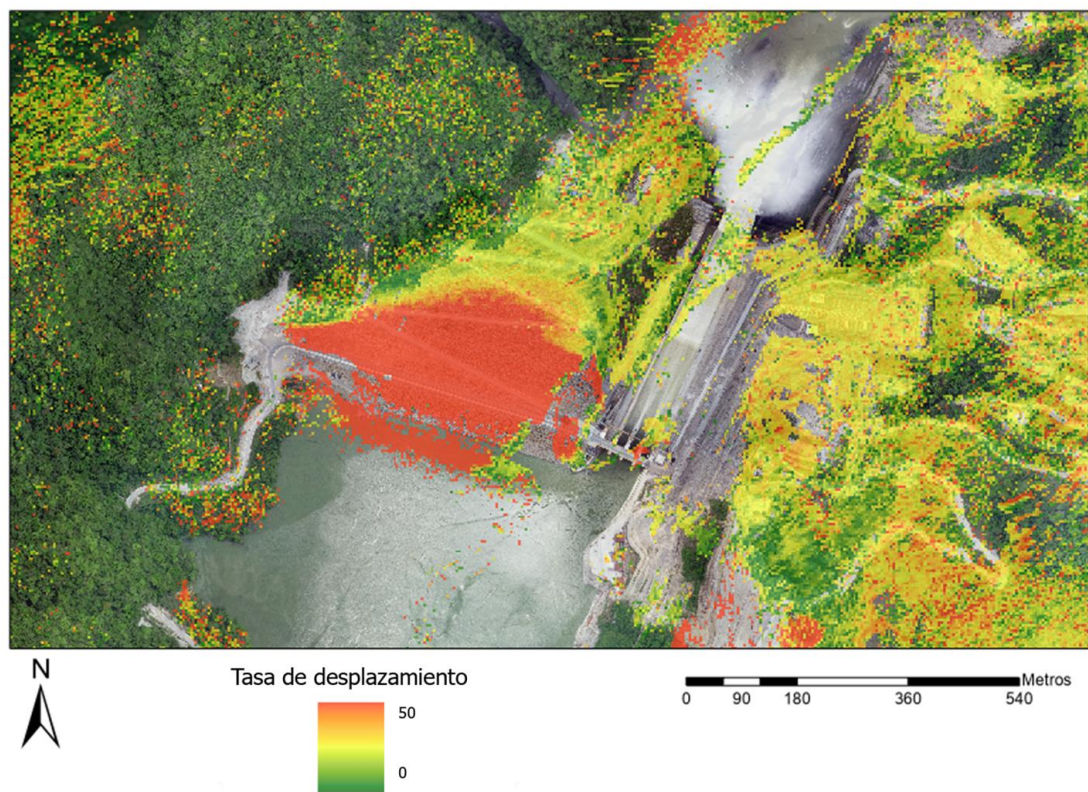
*Figura 4. Contornos de desplazamiento de la presa en el periodo 2019/01/13-2019/02/24.*

*Fuente: Epm, 2021.*

Algo similar sucede en la Figura 5 con valores aproximados a 50 cm/año, pero siendo notorio la disminución en área de estas altas tasas de desplazamiento hacia los límites del espaldón de la presa. En cuanto a los contornos de desplazamiento (Figura 6), se observa una distribución particular en las diferentes líneas de visión del satélite; para el caso de los contornos de visión izquierda, en su mayoría, se ubican hacia el este del espaldón, mientras que los contornos de visión derecha, se encuentran distribuidos a lo largo de todo el espaldón. Los valores para estos contornos varían de 0 a 4 cm, dentro de los cuales, algunos pueden llegar a ser desplazamientos no confirmados.



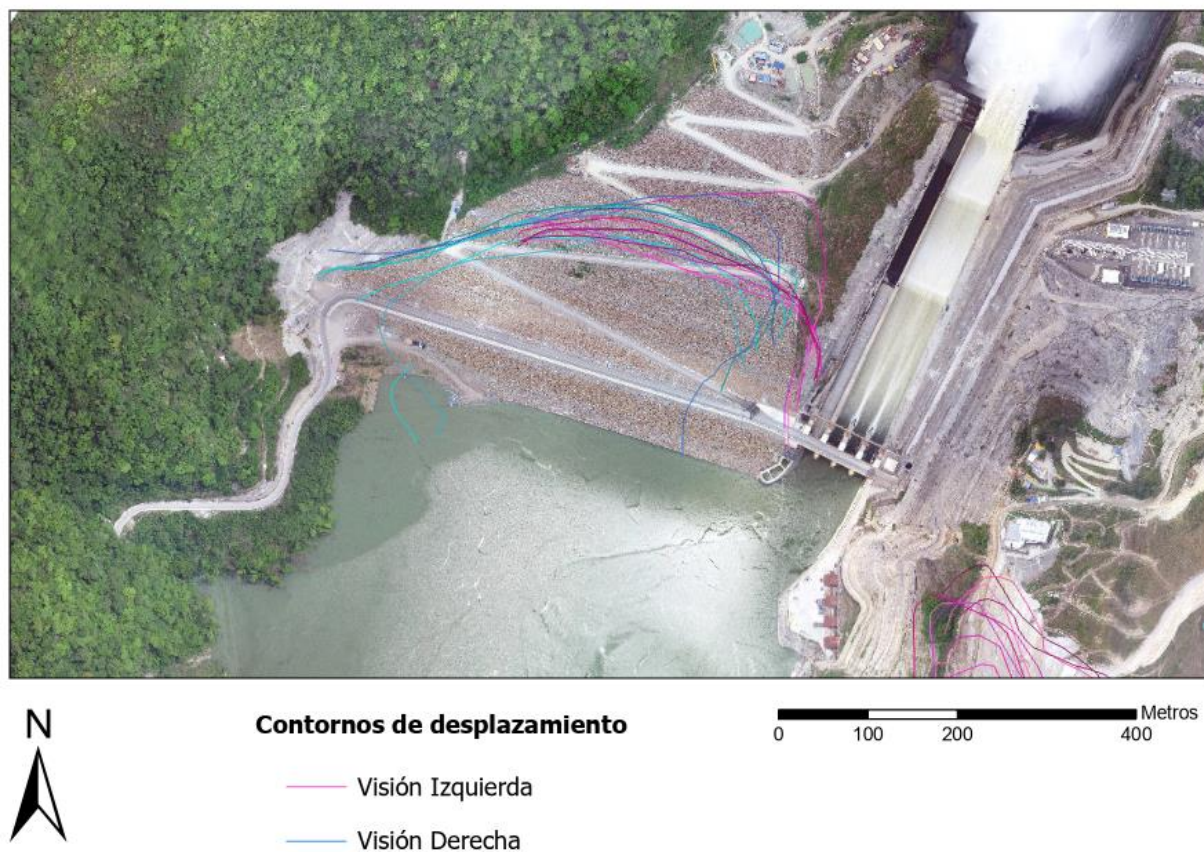




*Figura 5. Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/01/13-2019/08/31.*

*Fuente: Epm, 2021.*



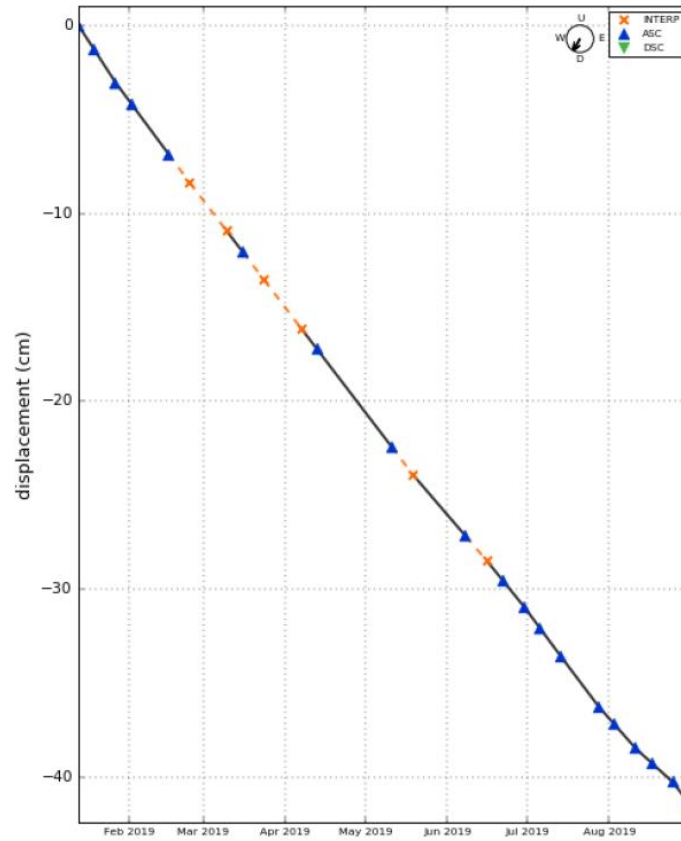


*Figura 6. Contornos de desplazamiento en la presa para el periodo 2019/02/16-2019/08/17.*

*Fuente: Epm, 2021.*

En la Figura 7 se puede observar un desplazamiento absoluto de hasta 45 cm/año (en dirección de asentamiento), coincidiendo con el mapa de calor anterior.





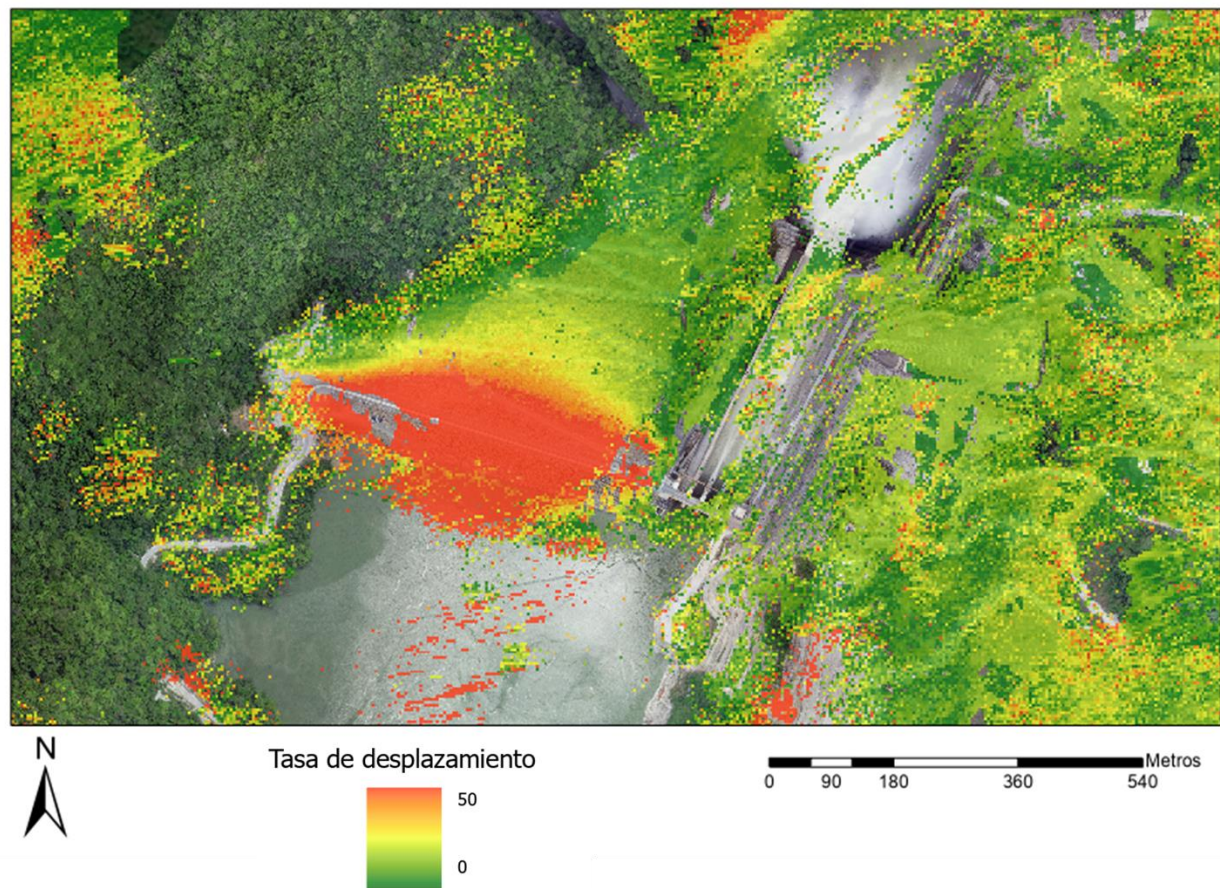
**Figura 7.** Gráfica de desplazamiento absoluto acumulado en la presa para el periodo 2019/01/13-2019/08/31.

Fuente: Epm, 2021.

En la Figura 8 y Figura 9 se puede observar una disminución en las tasas de desplazamiento, con valores entre 30 y 40 cm/año. Para el segundo periodo del año 2019 en adelante, los movimientos captados por los sensores se siguen presentando, pero poco a poco se van desacelerando por la acomodación final de las capas y la finalización del llenado de la presa (cota 435).



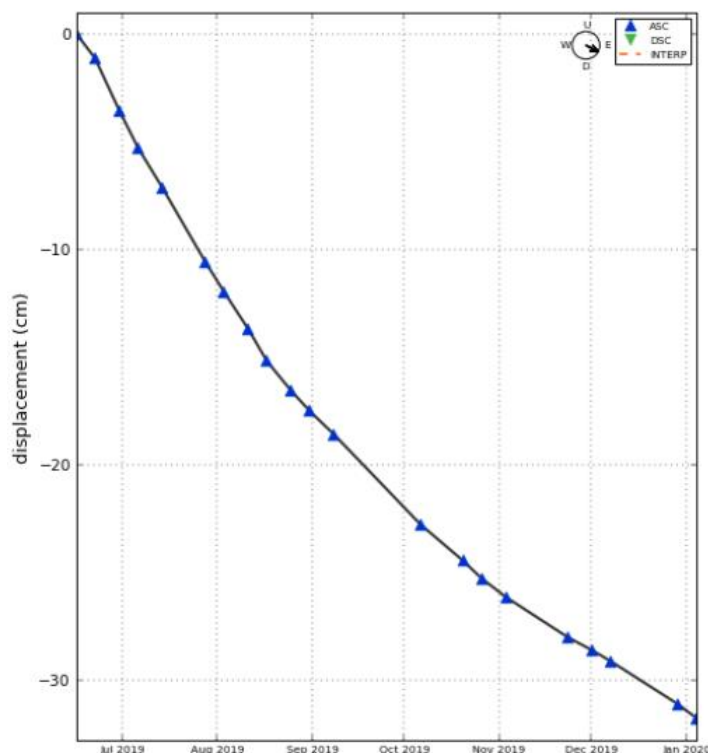




*Figura 8. Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/06/16-2020/01/04.*

*Fuente: Epm, 2021.*





**Figura 9.** Gráfica de desplazamiento absoluto acumulado en la presa para el periodo 2019/06/16-2020/01/04.

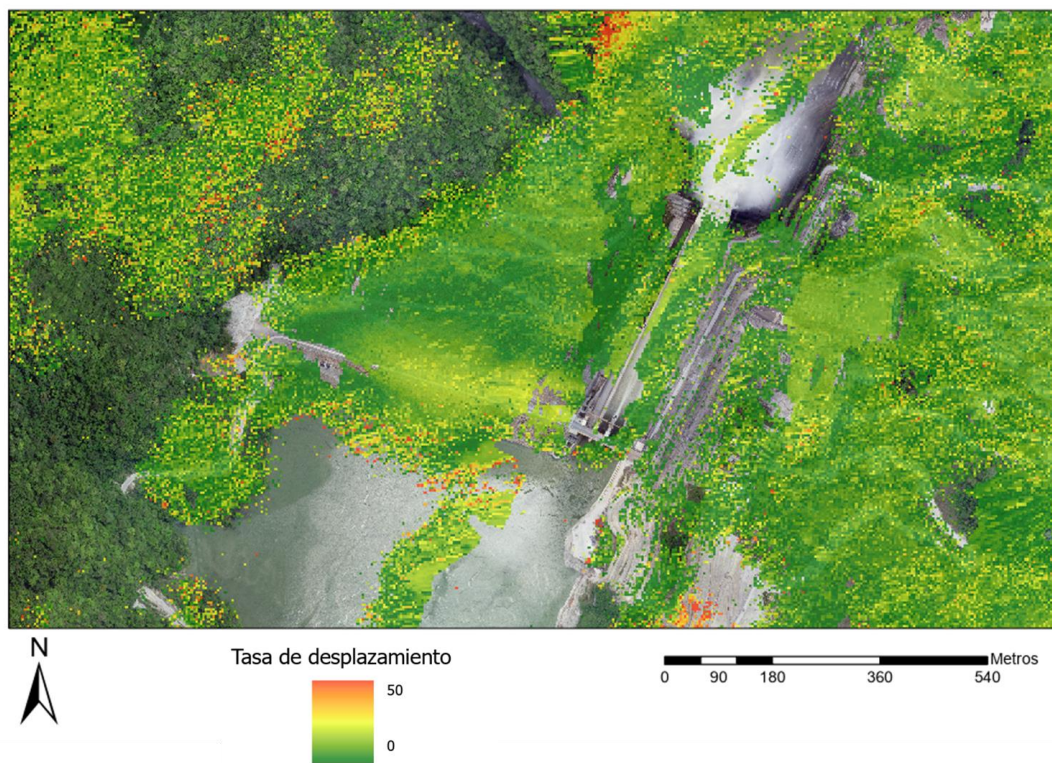
Fuente: Epm, 2021.

## PERIODO II

Para el periodo correspondiente al año 2020 en adelante, se puede observar una disminución considerable en las tasas de desplazamiento, con una reducción de hasta 40 cm/año. Este comportamiento es constante a partir de este año hasta la fecha estudiada. En los mapas de calor de la Figura 10, Figura 13, y Figura 15 se observa una disminución considerable como se menciona anteriormente, con valores que varían de los 5 a 12 cm/año, lo cual, es contrastable con las gráficas obtenidas de desplazamiento en la Figura 11, Figura 14, y Figura 16, dando como máximo valor en la gráfica de ~ 15cm. En cuanto a las gráficas de velocidad obtenidas en estas mismas gráficas, se obtienen valores que oscilan entre los 0 y 15 cm/año.







**Figura 10.** Mapa de calor de la presa para el periodo 2019/12/01-2020/08/15.

Fuente: Epm, 2021.

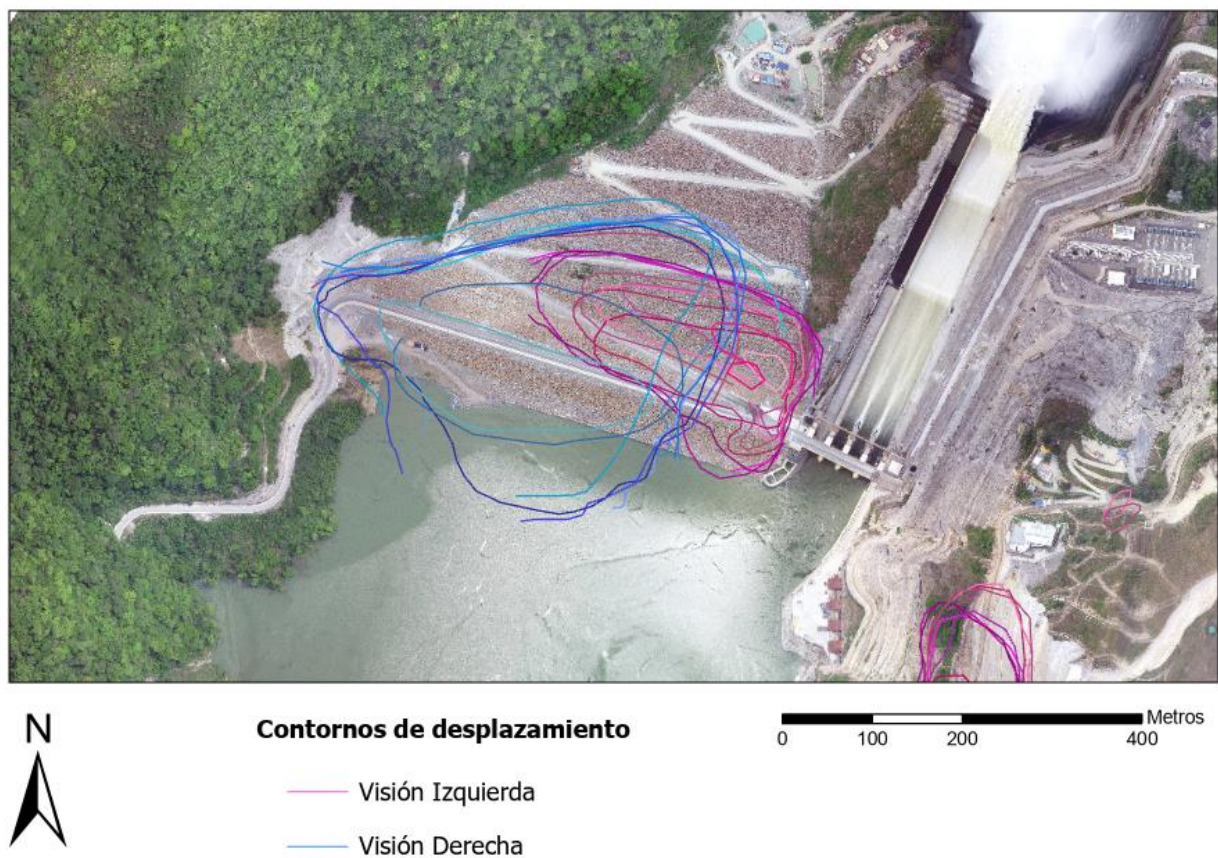


**Figura 11.** Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el periodo 2019/12/01-2020/08/15.

Fuente: Epm, 2021.



Para el periodo analizado, en la Figura 12 se observa una cantidad similar de contornos de visión izquierda y derecha del satélite para esta zona, con valores que varían de 0 a 4 cm y dentro de los cuales, algunos pueden llegar a ser desplazamientos no confirmados.



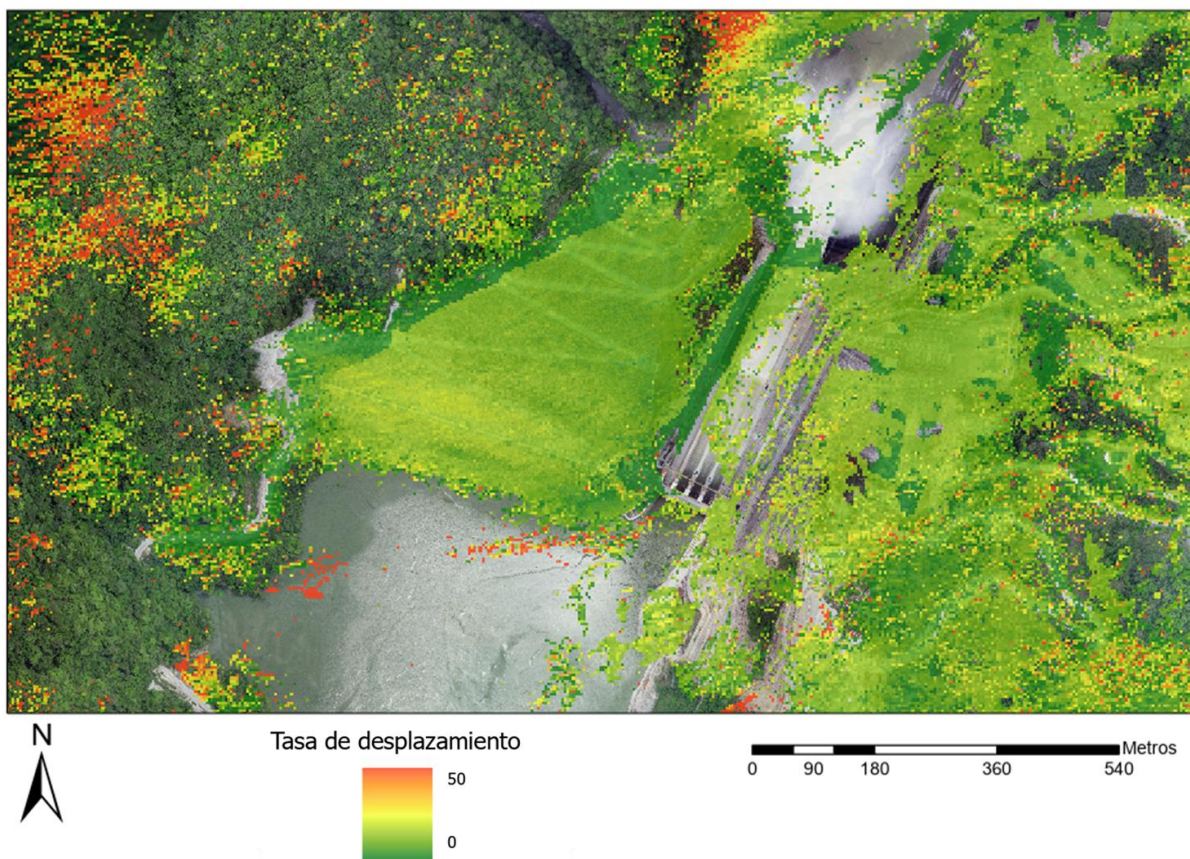
*Figura 12. Contornos de desplazamiento en la presa para el periodo 2019/08/17-2020/08/15.*

*Fuente: Epm, 2021.*





En la Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se observa una tendencia de estabilización en la presa, con tasas de aproximadamente 12 a 15 cm/ año y unos desplazamientos absolutos de ~6-10 cm.



**Figura 13.** Mapa de calor de la presa para el periodo 2020/07/04-2020/12/19.

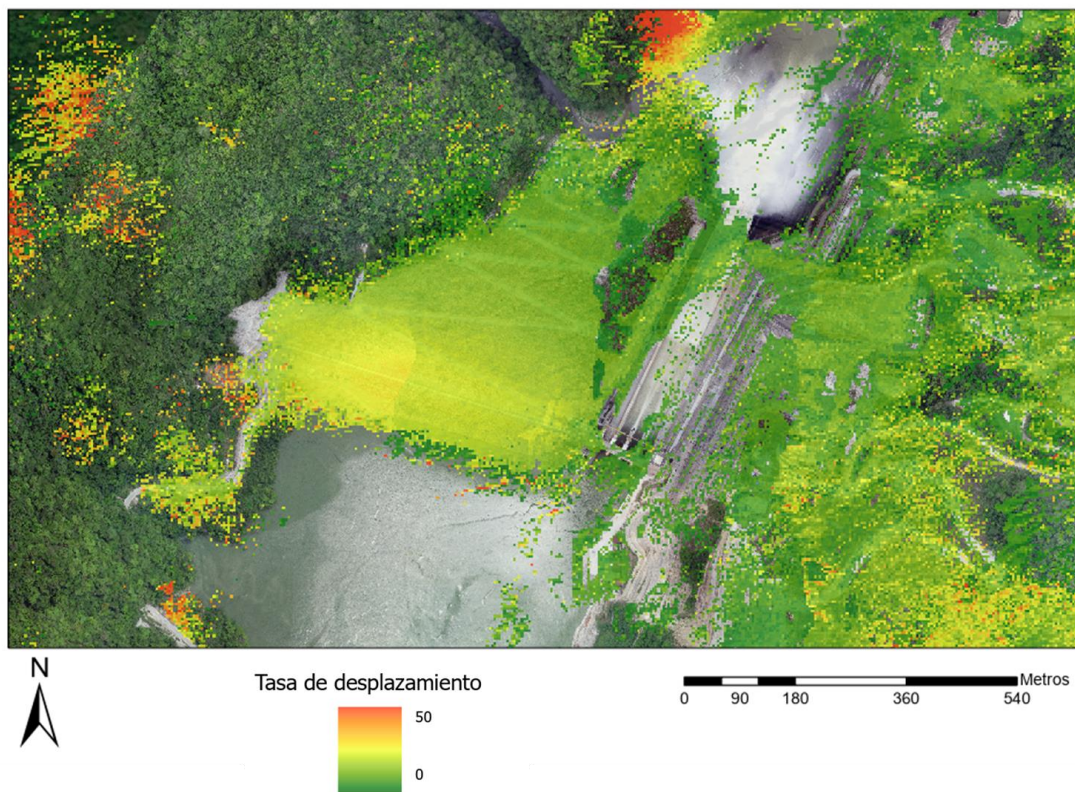
*Fuente: Epm, 2021.*





**Figura 14.** Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el 2020/07/04-2020/12/19.

Fuente: Epm, 2021.

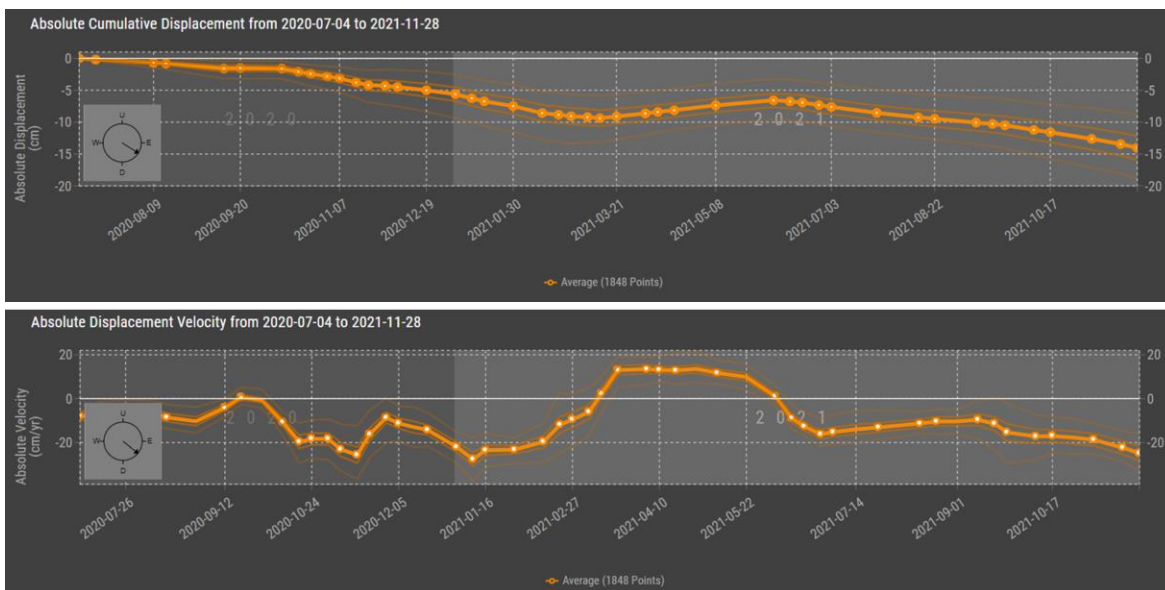


**Figura 15.** Mapa de calor de la presa para el periodo 2020/07/04-2021/11/28.

Fuente: Epm, 2021.





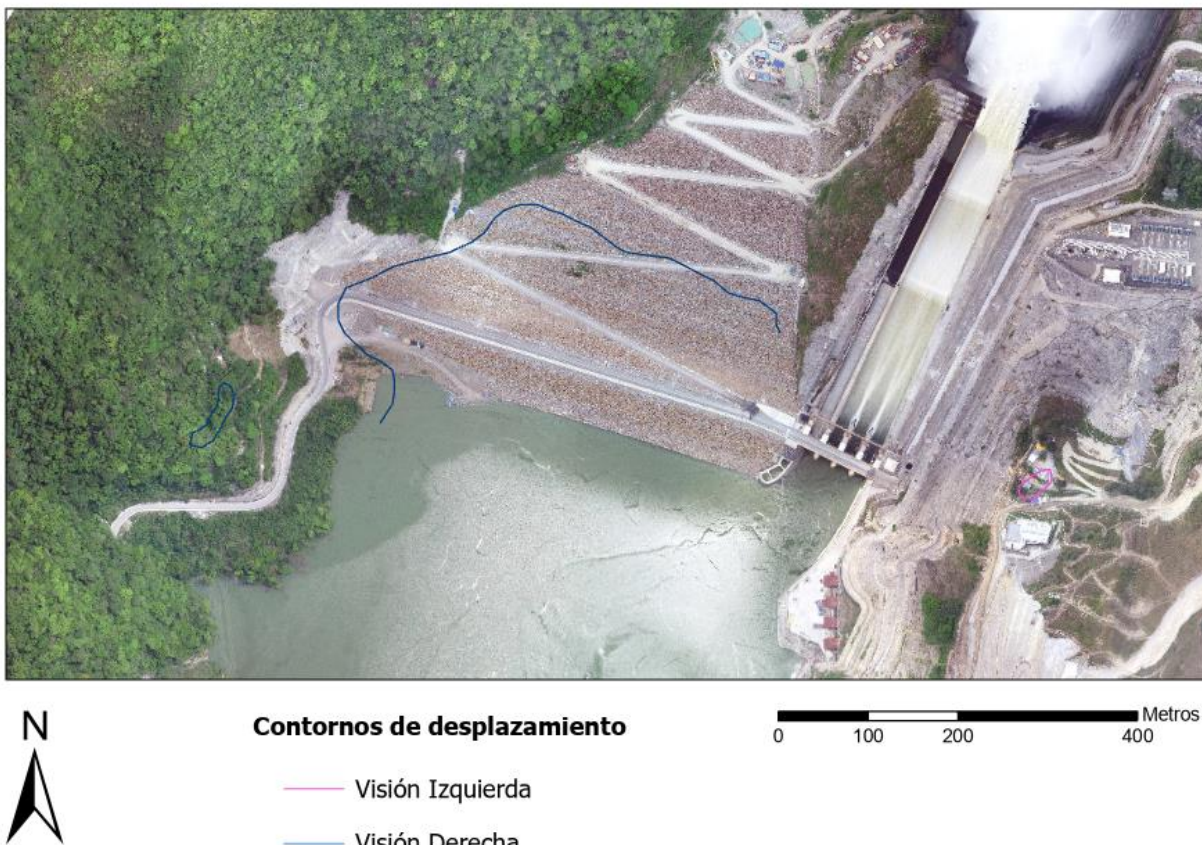


**Figura 16.** Gráficas de desplazamiento y velocidad absoluta en la presa para el 2020/07/04-2021/11/28.

Fuente: Epm, 2021.

Cabe resaltar que el único contorno registrado en la presa para el año 2021 corresponde a un contorno de línea de visión izquierda del satélite, captado en el periodo 2021/01/30 – 2021/02/13 (ver Figura 17).





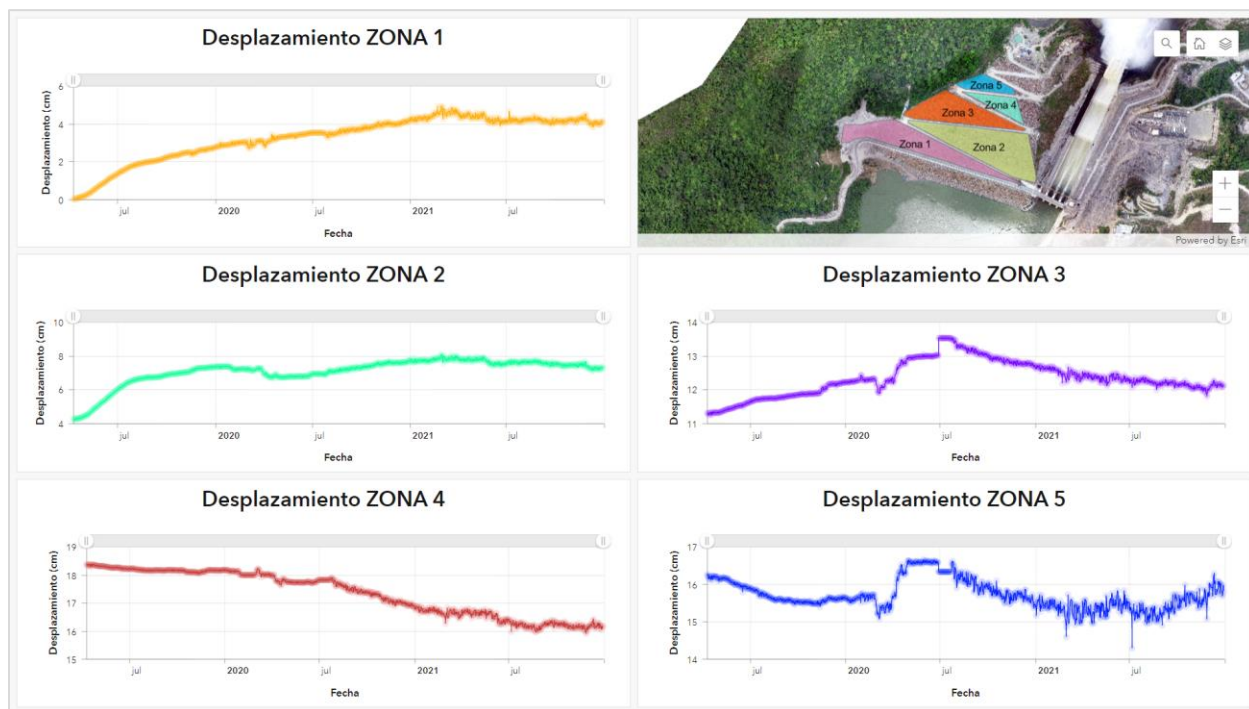
*Figura 17. Contorno de desplazamiento en la presa para el periodo 2020/11/29-2021/12/31.*

*Fuente: Epm, 2021.*

## **RADAR SARX**

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 18, el comportamiento del radar SARX presenta una tendencia asintótica en su deformación, siendo congruente con las tasas de desplazamiento en el satélite, las cuales, disminuyen paulatinamente hasta estabilizarse.





**Figura 18.** Dashboard con las gráficas de desplazamiento captadas por el Radar SARX para la presa.

En general, las tasas de deformación son muy bajas y coinciden con el comportamiento esperado en una presa de enrocado (conformación de suelo compactado), en donde se continuarán registrando tasas lentas de desplazamiento durante toda la vida útil de la misma.

Se realizó un análisis estadístico con el fin de correlacionar las técnicas de monitoreo, sin embargo, no se encuentra una relación directa aun cuando ambos métodos de monitoreo analizan el mismo tipo de variable (desplazamiento). Esto puede darse debido a los diferentes ángulos con los cuales los equipos monitorean, además, teniendo en cuenta que el radar terrestre se encuentra posicionado en un mismo sitio durante todo el tiempo de análisis, mientras que el satélite, se encuentra cambiando constantemente de dirección y los ángulos pueden variar por cada revisita. Cabe resaltar que la deformación de la capa más baja de la presa alcanza valores de hasta 15 a 18 cm, lo cual, si llega a ser coincidente con los valores máximos que registra el satélite (aun cuando estos tienen valores negativos asociados al asentamiento).



De acuerdo con el desarrollo preliminar del proyecto de investigación, se establecieron algunos objetivos en relación con sus características dentro de los resultados que se obtendrían con este estudio (ver Tabla 2)

OBJETIVOS	RESULTADOS/PRODUCTOS ESPERADOS	INDICADOR	BENEFICIARIO
Obtención de datos históricos de variables	Informe de análisis	1	Investigador
Tableros de control con los resultados	Aplicaciones SIG	1– 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigador</li> <li>- Comunidad</li> <li>- Empresas nacionales e internacionales</li> </ul>
Investigación científica	Artículo científico	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigador</li> <li>- Comunidad científica y técnica</li> </ul>

**Tabla 2.** Tabla de resultados esperados del proyecto.

Con estos resultados obtenidos, se esperará conseguir los objetivos planteados que lleven a la solución de problemas o a la consolidación del conocimiento previo en monitoreo de presas y en la importancia del uso de tecnologías SIG para mayor alcance en el mismo. Adicional a esto, también se plantearon inicialmente los posibles impactos o productos a generar en el entorno del proyecto de investigación en relación con su plazo de ejecución y el indicador comprobable (ver Tabla 3).





IMPACTO ESPERADO	PLAZO (AÑOS) DESPUÉS DE FINALIZADO EL PROYECTO	INDICADOR VERIFICABLE	SUPUESTOS
Diversas tecnologías SIG empleadas en monitoreo de presas	Largo (10 o más)	Índice de uso de tecnologías SIG y su crecimiento en el tiempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión en tecnologías e instrumentación</li> <li>- Socialización y capitalización del conocimiento del monitoreo</li> </ul>
Divulgación de información de tipo científico	Corto (1 a 4)	Artículo publicado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Información base y de conocimiento general para la comunidad.</li> <li>- Insumos para hidroeléctricas.</li> </ul>

**Tabla 3.** Tabla de impactos esperados del proyecto.

Cabe resaltar que el plazo después de finalizado el proyecto para los posibles impactos, es de 10 años o más (largo), ya que, con este proyecto es posible hacer una predicción de cómo puede llegar a comportarse una presa durante, y después de su construcción y el manejo adecuado de tecnologías para asegurar la integridad de una hidroeléctrica y las comunidades aledañas.

A nivel general, tanto los resultados como impactos se obtuvieron de manera exitosa durante el desarrollo del trabajo, aún cuando uno de los impactos (divulgación científica) se encuentra en proceso de ejecución, el resto de los objetivos fueron cumplidos y desarrollados de manera exitosa mostrando así la importancia del monitoreo constante para una infraestructura como lo es una presa, y la consolidación de la información con ayuda de herramientas SIG.



## 9. CONCLUSIONES

La presa de Hidroituango durante los periodos analizados presentó un comportamiento asintótico, relacionado con un estado de estabilidad progresiva asociado a los procesos de asentamiento de esta, obteniéndose un valor máximo registrado de 18 cm de desplazamiento en ambos sensores (Satélite ALOS-2 y Radar SARX). En general, esta infraestructura presenta un comportamiento acorde a lo esperado para una presa en enrocado, y continuará presentando pequeñas tasas de desplazamiento a lo largo de toda su vida útil debido a su naturaleza.

La utilización de las herramientas SIG en conjunto con técnicas de monitoreo especializadas son un componente fundamental para la prevención de desastres en proyectos de gran envergadura como lo es la presa de Hidroituango, ya que, no sólo aporta un componente científico e investigativo, sino que a su vez genera un hito en las técnicas de monitoreo implementadas regularmente en proyectos de infraestructura en Colombia, lo cual, conlleva a un mejor manejo de los recursos y utilidades, así como salvaguardar las vidas humanas que puedan verse involucradas en zonas aledañas al proyecto.

Se espera que los análisis relacionados se conviertan en un aliciente que dé inicio a nuevos estudios más detallados sobre las diferentes técnicas de monitoreo y sensoramiento remoto, con lo cual, se puedan contrastar entre sí y generar un punto de partida para diferentes estudios en proyectos de ingeniería en Colombia.



## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Publicado: 2010. Actualizado: 2013. Definiciones: Definición de monitoreo (<https://definicion.de/monitoreo/>).

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2017. Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes.

Ildoromi, A.R., Sepehri, M., Malekinezhad, H., Kiani-Harchegani, M., Ghahramani, A. Hosseini, S.Z., Artimani, M.M., 2018. Application of Multi-Criteria Decision Making and GIS for Check Dam Layout in the Ilanlu Basin, Northwest of Hamadan Province, Iran, Physics and Chemistry of the Earth.

Li, S., Yuan, L., Yang, H., An, H., Wang, G. 2020. Tailings dam safety monitoring and early warning based on spatial evolution process of mud-sand Flow. Safety Science 124 (2020) 104579.

Li, Y., Min, K., Zhang, Y., Wen, L. 2021. Prediction of the failure point settlement in rockfill dams based on spatial-temporal data and multiple-monitoring-point models. Engineering Structures 243 (2021) 112658.



Jin Luo, Qi Zhang, Liang Li, Wei Xiang, Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China. *Engeo* (2018).

Schäuble, H., Marinoni, O., Hinderer, M. 2008. A GIS-based method to calculate Flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences* 34 (2008) 635–646.

Ghoraba, M. Shima. 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal. Irrigation and Hydraulics Engineering Department, Faculty of Engineering, Tanta University, Egypt.*

Kharazi, P., Arab Khazaeli, E., Heshmatpour, A. 2021. Delineation of suitable sites for groundwater dams in the semi-arid environment in the northeast of Iran using GIS-based decision-making method. *Groundwater for Sustainable Development* 15 (2021) 100657.

Yajun, Z., Qian, Q. 2012. A New Type of Automatic Monitoring System of Static and Dynamic Displacement on Dam and Slope. *International Symposium on Safety Science and Engineering in China, 2012 (ISSSE-2012). Procedia Engineering, ELSEVIER.*

Gikas, V., Sakellariou, M. 2008. Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring. *Engineering Structures, ELSEVIER.*



Zhao, S., Kang, F., Li, J., Ma, C. 2021. Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. Automation in Construction, ELSEVIER.

Anita, Singh, R., Choudhury, S., Singh, B. 2015. Wireless Disaster Monitoring and Management System for Dams. International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence (ICCC-2014). Conference Organized by Interscience Institute of Management and Technology, Bhubaneswar, Odisha, India. ELSEVIER.

Finch, J.W. 1997. Monitoring small dams in semi-arid regions using remote sensing and GIS. Journal of Hydrology 195, 335-351. ELSEVIER.

Mohammed Nooria, A., Pradhanb, P., Mahmood A., Q. 2019. Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS. Journal of Hydrology 574, 964-979. ELSEVIER.

Okalp, K. Soil erosion risk mapping using geographic information systems: a case study on Kocadere creek watershed, Izmir. MSc Thesis. Department of Geodetic and Geographic Information Technologies, Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. Ankara, Turkey, 2005; pp 20-21.

Saidi, S., Houimli, H., Zid, J. 2016. Geodetic and GIS tools for dam safety: case of Sidi



Salem dam (northern Tunisia). Saudi Society for Geosciences 2017. Springer.

Shahkooeei, E., Arekhi, S., Najafi Kani., A. 2014. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land use changes using support vector machine algorithm (Case study: Ilam dam watershed). International Research Journal of Applied and Basic Sciences.

J. Aswathi, R.B. Binoj Kumar, T. Oommen, E.H. Bouali, K.S. Sajinkumar. 2022. InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. Energy Geoscience 3 (2022) 160-171.

3vGeomatics. 2018. InSAR Guide. Understanding the capabilities of InSAR.

3vGeomatics. 2019. 3vG InSAR Product Manual. Version 3.0. InSAR Monitoring Product Descriptions.

Yuksel, A.; Gundogan, R.; Akay, A.E. Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaras, Turkey. Sensors 2008, 8, 4851-4865.

Mitasova, H.; Hofierka, J.; Zlocha, M.; Iverson, R.L. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS, International Journal of Geographical Information Science 1996, 10, 5, 629-641.

Sazbo, J., Pasztor, L.; Suba, Z.; Varallyay, G. Integration of remote sensing and GIS techniques in land degradation mapping. Proceedings of the 16th International Congress of Soil Science, Montpellier, France, August 1998; pp. 63-75.



Akay, A.E.; Karas, I.R.; Gundogan, R. Classification of Tree and Shrub Species in KSU Research and Application Forest in Kahramanmaras, Turkey. In 10th Intl. Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing (eds M.E. Schaepman, S. Liang, N.E. Groot, and M. Kneubühler), Intl. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, WG VII/I, ISPRS, Davos, Switzerland, 2007; pp. 334-337.

Abrams, M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 2003, 21 (5), 847-859.

Kılıc, S.; Evrendilek F.; Berberoglu, S; Demirkesen, A.C. Environmental monitoring of land-use and land-cover changes in a mediterranean region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 2006, 114, 157–168.

Clarke K.E., Bradley O.P. and Crane M.P., *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, Prentice Hall, 2001.

Desmet, P.J.J. and Govers, G., GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information, *Catena*, 25, pp. 389-401, 1995.

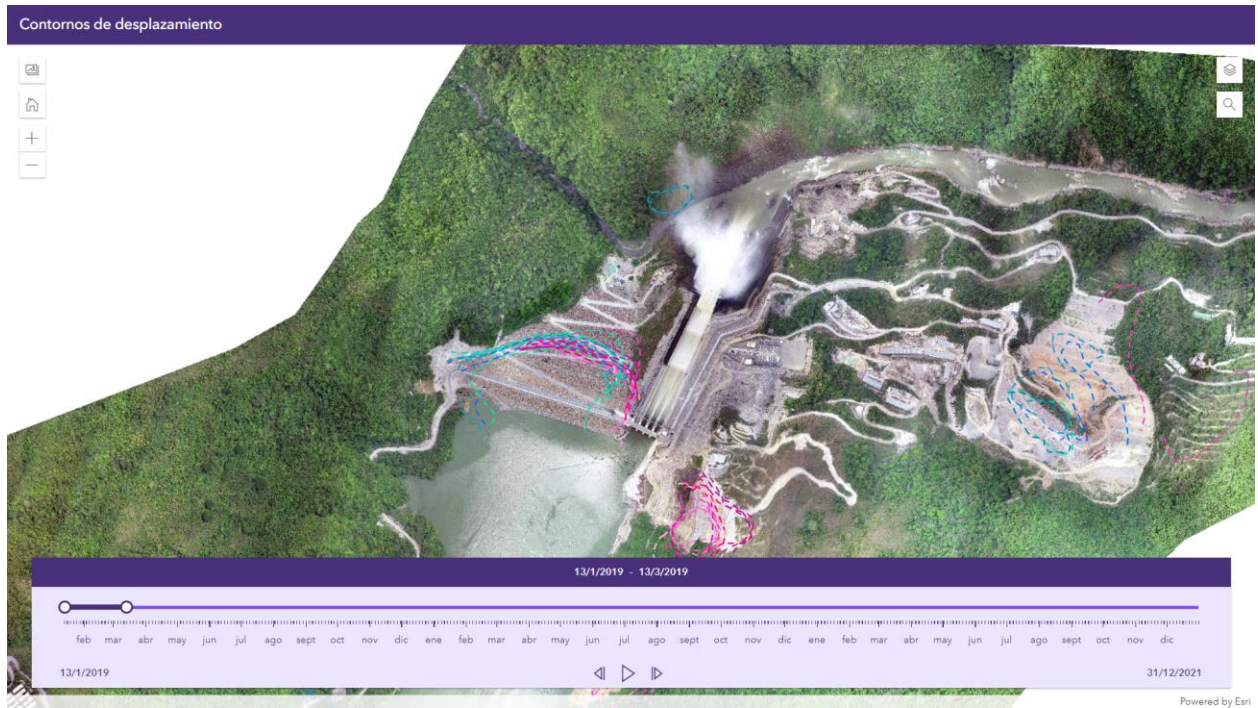
Esengin, E., *Integration of Geographic Information Systems with Environmental Impact Assessment: A Case Study on Çamlı Dam*, MSc Thesis, METU, 2002.



# 11. ANEXOS

## RESULTADOS

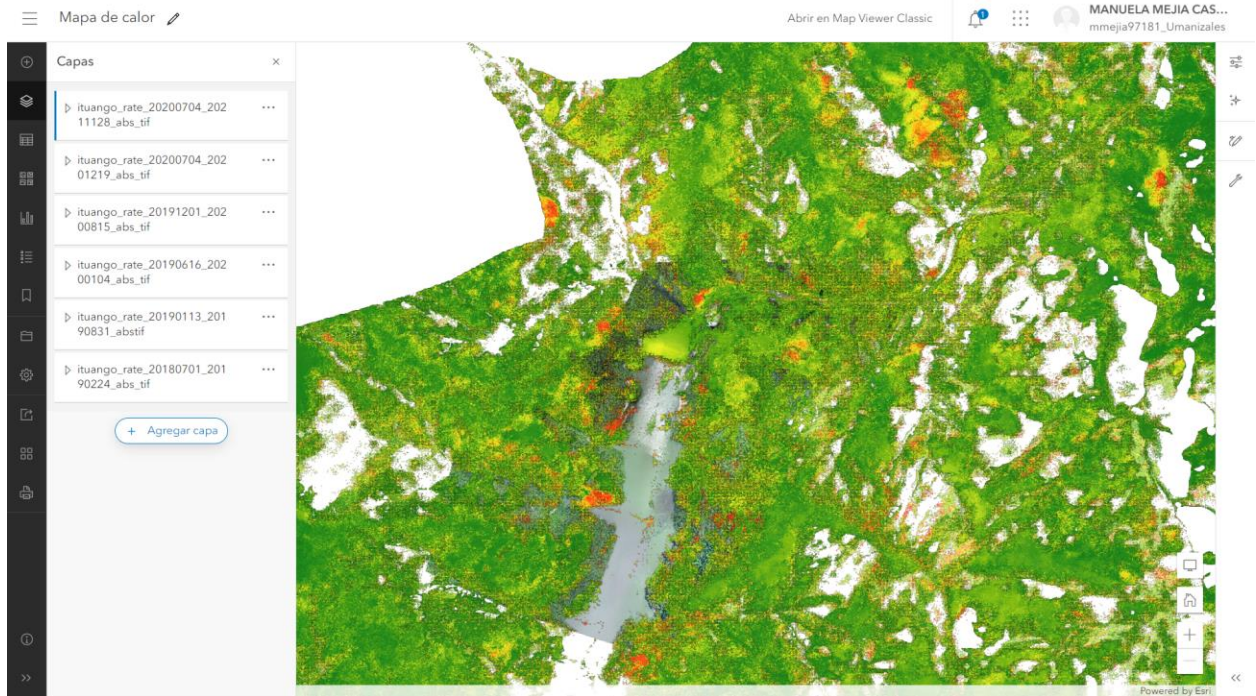
### *Tableros de control*



*Aplicación Slider para visualización por periodos de tiempo de los contornos de desplazamiento en la presa de Hidroitungo*







*Mapa web de los mapas de calor históricos registrados con el satélite ALOS-2 en la presa de Hidroituango*

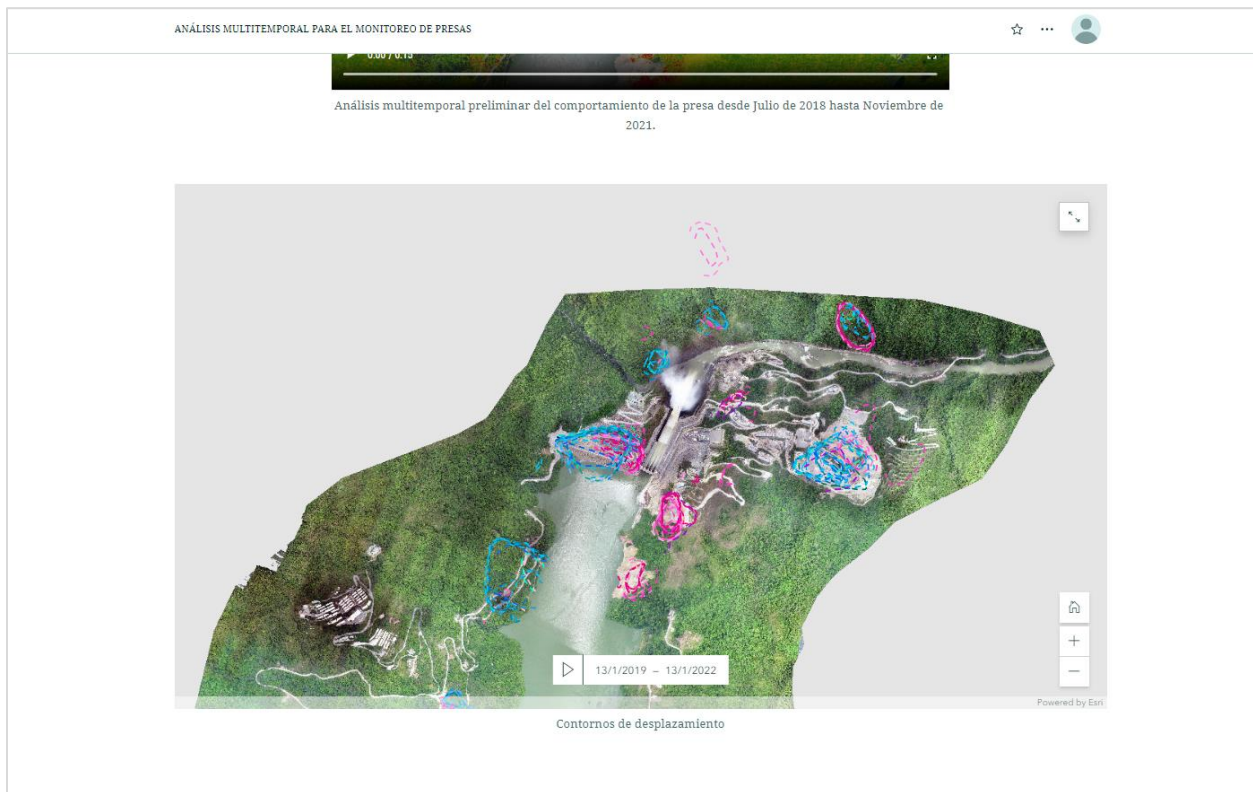


*StoryMap interactivo (1)*





*StoryMap interactivo (2)*



*StoryMap interactivo (3)*





## Dispersiones Radar Vs. Satélite



Zonas de monitoreo del radar SARX

