



Análisis temporal del volumen de agua y determinación del periodo de tiempo de inicio del llenado del Embalse Artificial 'Las Parcelas' en el corregimiento El Tomate del municipio de San Pedro de Urabá, a partir de imágenes satelitales y un modelo de elevación digital

Andrés Felipe Pineda Ceballos

Sara Girlesa Velásquez Taborda

Monografía para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Orientador

Rodrigo Alonso Díaz Correa, Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática**

Medellín

2024

Cita	(Pineda Ceballos & Velásquez Taborda, 2024)
Referencia	Pineda Ceballos, A. F, & Velásquez Taborda, S. G. (2024). Centro de Documentación de Ingeniería <i>de la Universidad de Antioquia: Análisis temporal del volumen de agua y determinación del Periodo de tiempo de inicio del llenado del Embalse Artificial 'Las Parcelas' en el corregimiento El Tomate del municipio de San Pedro de Urabá, a partir de imágenes satelitales y un modelo de elevación digital</i> [Monografía]. Universidad de Antioquia, Medellín UdeA.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática UdeA, Cohorte 19.



Centro de Documentación de Ingeniería UdeA.

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	6
2.	Marco teórico	8
3.	Objetivos.....	10
3.1	Objetivo general	10
3.2	Objetivos específicos	10
4.	Metodología.....	11
4.1	Área de estudio y conjuntos de datos	11
4.1.1	<i>Área de Estudio</i>	11
4.1.2	<i>Conjunto de Datos</i>	11
4.2	Obtención del modelo de elevación digital (DEM).....	12
4.3	Obtención de imágenes satelitales – LANSAT	12
4.4	Post procesamiento DEM	14
4.4.1	<i>Post Procesamiento DEM</i>	14
4.4.2	<i>Post Procesamiento de Imágenes NDWI</i>	15
4.4.3	<i>Cálculo de Volumen de Agua del Embalse en Función del Tiempo</i>	16
5.	Análisis y resultados	17
5.1	Determinación del periodo de tiempo de inicio de llenado embalse artificial las parcelas – análisis de imágenes satelitales de LANDSAT y NDWI.....	17
5.2	Análisis del volumen de agua usando el dem de nasadem e imágenes satelitales lansant con índice NDWI.....	18
5.2.1	<i>Análisis del Modelo de Elevación Digital DEM</i>	18
5.2.2	<i>Evolución Temporal del Volumen del Embalse Artificial Las Parcelas (2005 – 2024)</i> 19	
6.	Conclusiones.....	22
7.	Referencias	23

Lista de figuras

Figura 1. Código utilizado en Google Engine para la obtención del modelo de elevación digital (DEM).	12
Figura 2. Código utilizado en Google Engine para la obtención del modelo de imágenes satelitales de la misión Lansat.	13
Figura 3. Imágenes Satelitales Lansat con índice NDWI no funcionales.	17
Figura 4. Presencia de lámina de agua de embalse las parcelas en el tiempo.	17
Figura 5. Superficie del Modelo de elevación digital del embalse las parcelas año 2000. ..	19
Figura 6. Evolución de la lámina de agua del embalse artificial Las Parcelas en el tiempo.	21

Lista de tablas

Tabla 1. Funcionalidad de imágenes satelitales con índice NDWI y presencia de cuerpo de agua Las Parcelas.....	18
Tabla 2. Parámetros de análisis del embalse artificial Las Parcelas.....	20

Gráficos

Gráfico 1 Relación Cota vs Volumen Embalse Artificial Las Parcelas.	19
Gráfico 2. Variabilidad de volumen del embalse artificial las parcelas año 2005 - 2024.	21

Resumen

El Embalse artificial Las Parcelas se encuentra ubicado en el corregimiento El Tomate del municipio de San Pedro de Urabá, el cual por condiciones de orden público y conflicto armado sufrido en la zona en las décadas de los 80 y 90 presenta un vacío de información respecto a su llenado y operación, histórico de niveles de agua, características morfológicas e hidrológicas antecedentes y precedentes, importantes para conocer y garantizar una adecuada gestión del recurso hídrico en función del uso estratégico de este cuerpo de agua; principalmente porque el embalse Las Parcelas en el momento es la única fuente de abastecimiento operativa que brinda y garantiza el suministro de agua por gravedad al sistema de acueducto de este corregimiento, optimizando costos operativos y energéticos frente a otras alternativas disponibles en la zona. Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo identificar la ventana de tiempo de llenado del embalse, analizar la evolución y variación del espejo de agua y su potencial volumen de almacenamiento entre los años 2004 y 2024 utilizando imágenes satelitales de la misión Landsat y de un modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM, obteniéndose como resultado el periodo en el cual se comenzó a llenar el embalse, la identificación de los meses en los que se alcanzaron los volúmenes y cotas críticas máximas y mínimas, estableciendo una relación entre las variables altura de la lámina de agua y potencial de almacenamiento.

Palabras Clave: imágenes satelitales, modelo de elevación digital, volumen, embalse artificial, nivel de agua, Google Earth Engine, abastecimiento, teledetección, Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

Abstract

The Las Parcelas artificial reservoir is located in the El Tomate district of the municipality of San Pedro de Urabá, which due to conditions of public order and armed conflict suffered in the area in the decades of the 80s and 90s presents a lack of information regarding its filling and operation, historical water levels, morphological and hydrological characteristics, antecedents and precedents, important to know and guarantee adequate management of the water resource based on the strategic use of this body of water; mainly because the Las Parcelas reservoir is currently the only operational supply source that provides and guarantees the supply of gravity water to the aqueduct system of this township, optimizing operating and energy costs compared to other alternatives available in the area. Therefore, this research aims to identify the reservoir filling time window, analyze the evolution and variation of the water mirror and its potential storage volume between the years 2004 and 2024 using satellite images from the Landsat mission and a digital elevation model (DEM) from NASADEM, obtaining as a result the period in which the reservoir began to fill, the identification of the months in which the volumes and maximum critical levels were reached and minimum, establishing a relationship between the variables height of the water table and storage potential.

Keywords: satellite images, digital elevation model, volume, artificial reservoir, water level, Google Earth Engine, supply, remote sensing, Normalized Difference Water Index (NDWI).

1. Introducción

El embalse artificial Las Parcelas se encuentra ubicado en el municipio de San Pedro de Urabá específicamente en el corregimiento El Tomate el cual cuenta con 7 veredas, limitando al norte con el municipio de Arboletes, al oriente y al sur con el corregimiento de Santa Catalina, y al occidente con el municipio de Turbo. El corregimiento El Tomate posee un área de 56,1 km² y una población de 1151 habitantes (Gobernación de Antioquia, sin fecha), los cuales se abastecen de agua de este embalse artificial localizado en las coordenadas geográficas 76°23'5.20"O; 8°26'21.53"N, con un área aproximada de 15 hectáreas y una profundidad cercana a los 15 metros.

Los embalses son reguladores de las dinámicas hidráulicas además de que funcionan como alternativa de almacenamiento de agua para diferentes usos, ya sea doméstico, industrial, oficial o ecológico (Połomski, M., & Wiatkowski, M. 2023), por lo tanto, es un componente esencial para la supervivencia y el desarrollo de las dinámicas poblacionales, sin embargo, en las últimas décadas las fuentes hídricas han sido afectadas en su disponibilidad debido a actividades antrópicas y al cambio climático, derivado de los cambios de temperatura y precipitación, lo cual impacta la demanda y el suministro de agua (Cheng, y otros, 2023). Adicionalmente, las condiciones morfológicas y de distribución de los cuerpos de agua tienden a variar con el paso del tiempo (Zhao & Wang, 2024) (Bacalhau, Neto, taux, -Nguyen, & Moreira, 2022), por lo que es importante conocer y monitorear el volumen de almacenamiento disponible de estos cuerpos de agua, ya que es uno de las variables más representativas en la gestión de este tipo de recurso hídrico, previniendo situaciones de escasez y desabastecimiento del líquido vital en épocas de estiaje o posibles inundaciones en temporadas de lluvia comprendiendo la interacción entre la dinámica espacio-temporal del agua y el cambio climático (Bacalhau, Neto, taux, -Nguyen, & Moreira, 2022).

Por lo anterior, es importante realizar un monitoreo de la dinámica del embalse artificial Las Parcelas, el cual por condiciones de orden público y conflicto armado sufrido en la zona en las décadas de los 80 y 90 presenta un vacío de información respecto a su llenado y operación, histórico de niveles y variación del espejo de agua (Beleño, Ayala, & Herrera, 2024) (Agudelo, 2022). Cabe resaltar que el embalse Las Parcelas, es actualmente la única fuente de agua factible que surte de agua por gravedad al sistema de acueducto del corregimiento el Tomate, evitando sobrecostos por bombeo frente a otras alternativas de la zona como lo es el recurso hídrico subterráneo. (Pérez, A. K. C, 2021).

Con el fin de conocer el histórico de variables morfométricas del embalse es importante acudir a la tecnología de información espacial o teledetección, la cual se ha convertido en uno de los medios más importantes a la hora de extracción de datos de la superficie terrestre (Cao, H., Han, L., & Li, L, 2022). Esta tecnología ha evolucionado rápidamente en los últimos años, aumentando tanto la cantidad de datos como la diversidad de sensores que adquieren las imágenes (Cheng, y otros, 2023).

Para cumplir el objetivo de identificar y resaltar la zona acuática del embalse Las Parcelas en las imágenes satelitales, se realizó un ajuste en el contraste y el brillo espectral de los datos referidos a cuerpos de agua, suprimiendo el brillo de los datos asociados a la vegetación y la tierra; por medio de herramientas que facilitan la recopilación de información, para este caso

en particular se utilizó Google Earth Engine (GEE), la cual es una plataforma en nube que contiene un gran conjunto de datos geoespaciales disponibles públicamente con el fin de procesarlas de una manera más eficiente (Zhao & Wang, 2024).

En ese sentido, esta investigación tiene como objetivo, identificar el periodo de inicio del llenado del embalse artificial Las Parcelas, mediante el uso de imágenes de teledetección obtenidas de la misión Landsat y un modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM (Kariminejad, N., Jafari, M., Domazetović, F., & Quesada-Román, A. 2024), con el fin de analizar los cambios en su capacidad hídrica a lo largo del tiempo. Estos cambios están condicionados a diferentes factores propios de la zona, como las costumbres que determinan en gran medida el consumo de agua de sus habitantes, así como las actividades económicas del corregimiento, las cuales se basan en la agricultura y explotación forestal (Vargas et al., 2020) y finalmente, por patrones ambientales y meteorológicos como el ENOS que puede influir en el régimen de lluvias de la zona (Naranjo Bedoya, K., Aristizábal Giraldo, E. V., & Morales Rodelo, J. A., 2019).

Esta investigación aporta en el conocimiento de la dinámica del comportamiento de las características físicas del embalse artificial Las Parcelas, teniendo en cuenta los fenómenos atmosféricos, lo que contribuye en la predicción de la disponibilidad de agua para el abastecimiento de la población y adicionalmente, con el estudio de imágenes satelitales con sus diferentes técnicas de teledetección que permiten la recolección de información sobre el terreno a diferentes escalas, permitiendo así investigaciones en profundidad de la superficie de la Tierra (Kislik, C., Dronova, I., Grantham, T. E., & Kelly, M., 2022), por medio del uso de herramientas tecnológicas como GEE, que permite analizar y procesar datos geoespaciales a escala planetaria (Gorelick et al. 2017), podemos conocer información histórica importante para el desarrollo de las comunidades.

2. Marco teórico

La disponibilidad de agua y las características de las fuentes hídricas dependen en gran medida de los patrones de precipitación (Banerjee, y otros, 2024); con el fin de conocer la influencia histórica en el comportamiento de las distintas características espectrales de los cuerpos de agua y su distribución espacial, se utiliza la teledetección por satélite, la cual se caracteriza por su rapidez y simplicidad (Zhao & Wang, 2024), además, de que son cruciales para la gestión eficaz del agua en regiones en desarrollo con escasez de datos (West et al., 2019).

De acuerdo con (Zhao & Wang, 2024) en los últimos años, se han llevado a cabo investigaciones sobre identificación de masas de agua superficiales mediante técnicas de teledetección y se han propuesto diferentes modelos de extracción, como: la banda única que suele utilizar bandas de infrarrojo cercano e infrarrojo medio que se caracterizan por su simplicidad y facilidad de operación. En comparación con el método de banda única, los índices espectrales multibanda se han utilizado ampliamente, ya que construyen modelos matemáticos a través de operaciones con bandas para mejorar los cuerpos de agua y suprimir las características no acuáticas (Zhao & Wang, 2024), sin embargo, de acuerdo con la clasificación de la teledetección en el caso de ser supervisada puede ser un proceso tedioso, ya que se realiza por medio de un análisis visual con el propósito de identificar componentes del paisaje, basándose en criterios de tono, color y textura, pero su costo es menor que en un análisis digital (Luna, I. J. C., Murguía, M. L., Pati, F. M., & Valdivia, H. S., 2018).

Como lo mencionan los autores del artículo “Surface water monitoring from 1984 to 2021 based on Landsat time-series images and Google Earth Engine” los índices de agua comúnmente utilizados son: el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada (MNDWI), el Índice de Extracción Automatizada de Agua (AWEI), el Índice de Agua 2015 (WI2015) y el Índice de Agua Multibanda (MBWI). Destacándose los índices AWEI y WI2015, ya que se ha demostrado en algunos estudios que tienen una mejor precisión (Zhao & Wang, 2024).

Con el fin de aplicar las técnicas de teledetección descritas, es posible utilizar plataformas de código abierto como Google Earth Engine, la cual ofrece servicios fáciles de usar y métodos sostenibles para el análisis espacial a gran escala (Demir, Bas, & ayiğit, 2024). Como lo destacan (Fernando & Senanayake, 2024) “GEE no solo proporciona accesibilidad a una amplia gama de conjuntos de datos satelitales y espaciales, sino que también asigna recursos computacionales para analizar registros de tiempo de los datos y la posibilidad de programar de acuerdo con los requisitos del usuario”.

Otras de las características principales de GEE, es que no solo permite integrar múltiples fuentes e imágenes de teledetección global a múltiples escalas, sino que también permite el análisis de imágenes de banda completa y alta intensidad (Liang, Chen, Song, Sun, & Yang, 2023). Todas estas características la han convertido en una herramienta útil y versátil, aplicable en diferentes campos de la ingeniería. Algunos ejemplos que destacan (Bajaj, y otros, 2024), es la utilidad de Google Earth Engine para abordar desafíos ambientales y proporcionar información basada en el monitoreo de los cambios en la cobertura del suelo (Song, y otros, 2018), evaluar las tasas de deforestación (Hansen, y otros, 2013), rastreo del

crecimiento urbano (Li et al., 2021), mapeo de la dinámica de los incendios forestales (Cohen et al., 2017) e incluso predecir brotes de enfermedades (Funk et al., 2018). Además, facilita la toma de decisiones oportunas en respuesta a los cambios del entorno por su capacidad para procesar y analizar imágenes satelitales durante períodos de tiempo prolongados; todas estas cualidades, lo convierten en una herramienta valiosa para estudiar ecosistemas dinámicos (Bajaj, y otros, 2024).

Aunque autores como (Pinkeaw, Boonrat, Koedsin, & Huete, 2024), mencionan que GEE se puede aplicar como una combinación de herramientas automatizadas cuando tenemos grandes cantidades de datos, junto con refinamiento manual para producir resultados precisos y mapas confiables, logrando un equilibrio entre ambas, se pueden incurrir en errores involuntarios, en el caso de la interpretación visual la cual requiere de experiencia, por lo que es factible realizar una clasificación errónea (Yang, y otros, 2024). Como también es el caso de las imágenes a gran escala que se capturan en su mayoría en diferentes períodos, por lo tanto, pueden tener variaciones temporales y espaciales, lo que hace que el umbral sea susceptible a factores de subjetividad del observador (Zhao & Wang, 2024).

Por otra parte, con el fin de conocer las características de los cuerpos de agua, entre ellas el volumen, es importante tener en cuenta los datos de altimetría satelital, los cuales dependen de los sensores, las frecuencias de muestreo, de las propiedades del terreno de la zona y de las nubes sobre la región de estudio. Es posible que los anteriores factores deriven en el resultado de valores atípicos (Han, Kim, Mehrotra, & Sharma, 2024).

Los datos de altimetría y las características del terreno como contorno de líneas, pendiente y aspecto del terreno, pueden ser extraídos de un modelo de elevación digital (DEM), el cual está hipotéticamente libre de árboles, edificios u otros objetos no terrestres, que proporcionan la base para el modelado y el análisis de información espacio-topográfica (Villarreal, C. A., Garzón, C. G., Mora, J. P., Rojas, J. D., & Ríos, C. A., 2022). y que utiliza diferentes técnicas como la fotogrametría, los sensores o estudio de campo, cada una con sus ventajas y desventajas. Los DEM son aplicados en áreas de la hidrología para la estimación de la capacidad de un embalse, para la evaluación de la probabilidad de deslizamientos de tierra, la modelación de aguas subterráneas, la cartografía de zonas propensas a inundaciones, etc (Elsonbaty, Fawzy, Moghazy, Rashed, & Hamed, 2023). Como es el caso de las imágenes satelitales, muchos DEM también se pueden obtener de manera libre, sin embargo, cuando se requiere información con una resolución a gran escala es bastante difícil de adquirir, debido a su alto costo (Huang, y otros, 2023).

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Identificar el periodo de inicio del llenado del embalse artificial Las Parcelas, mediante el uso de imágenes de teledetección obtenidas de la misión Landsat y un modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM, con el fin de analizar los cambios en su capacidad hídrica a lo largo del tiempo.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar el periodo de inicio de llenado del embalse artificial las parcelas en el municipio de San Pedro de Urabá mediante el análisis de imágenes satelitales de la misión Landsat-4, Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8 y la aplicación del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), analizando las variaciones en la superficie del agua a lo largo del tiempo.
- Analizar el cambio en el espejo de agua mensual a partir de imágenes satelitales desde enero del 2004 hasta octubre del 2024, y su correlación con el volumen de almacenamiento del embalse artificial las parcelas, en el municipio de San Pedro de Urabá utilizando un modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la fuente NASADEM.
- Encontrar una relación entre la cota y el volumen de agua contenido para el embalse artificial Las Parcelas en el municipio de San Pedro de Urabá, utilizando el modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM y herramientas de geoprocésamiento espacial.

4. Metodología

El análisis realizado para determinar el volumen del cuerpo de agua superficial fue desarrollado en tres etapas principales:

- Obtención y preprocesamiento de imágenes satelitales con aplicación del índice NDWI para la identificación de áreas de agua.
- Obtención y preprocesamiento de modelo de elevación digital (DEM).
- Procesamiento de información y cálculo del volumen mediante modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la fuente NASADEM e imágenes satelitales con aplicación del índice NDWI fuente Landsat. A continuación, se detallan los métodos empleados en cada una de estas etapas.

4.1 Área de Estudio y Conjuntos de Datos

4.1.1 Área de Estudio

La represa artificial Las Parcelas, se encuentra localizado en las coordenadas (76°23'5.20"O; 8°26'21.53"N) del Sistema WGS84 en el corregimiento El Tomate, municipio de San Pedro de Urabá, departamento de Antioquia, Colombia. Este corregimiento limita al norte con Arboletes, al oriente y al sur con el corregimiento de Santa Catalina, y al occidente con el distrito de Turbo.

4.1.2 Conjunto de Datos

Para el desarrollo del análisis presentado en este documento, se emplearon las siguientes misiones espaciales para la adquisición de imágenes satelitales y la generación de modelos de elevación digital:

4.1.2.1 Imágenes satelitales – Landsat.

Landsat, un programa conjunto del USGS y la NASA, ha estado observando la Tierra continuamente desde 1972 hasta la actualidad. Hoy en día, los satélites Landsat obtienen imágenes de toda la superficie de la Tierra con una resolución de 30 metros aproximadamente una vez cada dos semanas, incluidos datos multiespectrales y térmicos (Amani et al., 2022).

4.1.2.2 Modelo de Elevación Digital – NASADEM.

Los Modelo de Elevación Digital (DEM), debido a los avances en la tecnología informática y satelital, ha contribuido significativamente a la precisión de la mayoría de los modelos hidrológicos (Tran et al., 2022), NASADEM es una reprocesamiento de datos SRTM con resolución de 30 metros, con precisión mejorada al incorporar datos auxiliares de los conjuntos de datos ASTER GDEM, ICESat GLAS y PRISM. Las mejoras de procesamiento más significativas implican la reducción de vacíos mediante un mejor desenvolvimiento de fases y el uso de datos ICESat GLAS para el control. En general, NASADEM presenta un buen desempeño para la evaluación de características de red de ríos y cuencas hidrográficas

(Nguyen et al, 2022), por lo que es un elemento esencial en la determinación de las características morfológicas e hidrológicas del embalse artificial Las Parcelas.

4.2 Obtención del Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo de elevación digital (DEM) utilizado en este análisis fue obtenido a partir de la fuente NASADEM para el año 2000. Este satélite proporciona datos de radar de apertura sintética (SAR) en banda L, lo que permite generar modelos de elevación con alta precisión, incluso en áreas de difícil acceso y bajo condiciones meteorológicas adversas. El proceso para la obtención del DEM fue realizado mediante un código Javascript en el entorno Google Earth Engine (Capolupo et al.,2021) de manera simplificada como se presenta a continuación:

Figura 1. Código utilizado en Google Engine para la obtención del modelo de elevación digital (DEM).

```
1 var DEM = ee.Image("NASA/NASADEM_HGT/001");
2
3 var elevation = DEM.select('elevation');
4
5 Map.addLayer(elevation, {min:50, max:200}, 'elevation');
6
7 var Parcelas = elevation.clip(AOI);
8
9 Map.addLayer(Parcelas, {min:50, max:200}, 'Parcelas');
10
11 Export.image.toDrive({
12   image: Parcelas,
13   description: 'DEM_30m',
14   scale:30,
15   region:AOI,
16   maxPixels:1e10
17 })
```

4.3 Obtención de Imágenes Satelitales – Lansat

Las imágenes satelitales utilizadas fueron obtenidas de la misión Landsat. Se generaron composiciones anuales desde 2004 hasta 2024, así como composiciones mensuales en el mismo periodo.

Para este estudio, se emplearon imágenes específicamente de los satélites Landsat 4 "LANDSAT/LT04/C02/T1_L2", Landsat 5 "LANDSAT/LT05/C02/T1_L2", Landsat 7 "LANDSAT/LE07/C02/T1_L2" y Landsat 8 "LANDSAT/LC08/C02/T1_L2", debido a su alta resolución espacial (30 m) y su disponibilidad temporal para la región de estudio. Las imágenes obtenidas fueron preprocesadas para corregir efectos atmosféricos y geográficos, como la corrección radiométrica y la ortorectificación, utilizando las herramientas disponibles en Google Earth Engine.

Para identificar y delimitar las áreas correspondientes a cuerpos de agua superficial, se utilizó a través las herramientas disponibles en Google Earth Engine el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés) un indicador espectral ampliamente utilizado para la detección de agua en imágenes satelitales, sobre las imágenes compuestas de interés. (Liu et al., 2018)

Cálculo del NDWI: El índice NDWI fue calculado para cada una de las imágenes compuestas generadas a partir de las bandas verde y de infrarrojo cercano (NIR) de las imágenes Landsat, utilizando la siguiente fórmula:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Los Raster .TIF generados a partir del cálculo del índice NDWI de las imágenes satelitales utilizadas mediante Google Earth Engine (GEE), como se presenta a continuación:

Figura 2. Código utilizado en Google Engine para la obtención del modelo de imágenes satelitales de la misión Lansat.

```

1  var imagenRGB = {
2    "opacity": 1,
3    "bands": ["red", "green", "blue"],
4    "min": 0.8132160139083863,
5    "max": 1.0155839490890504,
6    "gamma": 1
7  };
8
9  var imagenNDWI = {
10   "opacity": 1,
11   "bands": ["nd"],
12   "min": -0.27543141679391764,
13   "max": 0.052812264719490486,
14   "palette": ["ff361d", "29ff54", "2409ff"]
15  };
16
17  Map.centerObject(AOI, 11);
18  Map.addLayer(AOI);
19
20  var ALI = function(image) {
21    var qa = image.select('QA_PIXEL');
22    var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 5)
23      .and(qa.bitwiseAnd(1 << 7))
24      .or(qa.bitwiseAnd(1 << 3));
25
26    var ALI2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.min());
27    return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(ALI2).divide(10000).copyProperties(image, [{"system:time_start"}]);
28  };
29
30  var startDate = '2024-01-01';
31  var endDate = '2024-12-31';
32
33  var coleccion1 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2")
34    .filterDate(startDate, endDate)
35    .filterBounds(AOI)
36    .select(['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B7', 'QA_PIXEL'], ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'QA_PIXEL'])
37    .map(ALI);
38
39  var coleccion2 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2")
40    .filterDate(startDate, endDate)
41    .filterBounds(AOI)
42    .select(['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B7', 'QA_PIXEL'], ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'QA_PIXEL'])
43    .map(ALI);
44
45  var coleccion3 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C02/T1_L2")
46    .filterDate(startDate, endDate)
47    .filterBounds(AOI)
48    .select(['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B7', 'QA_PIXEL'], ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'QA_PIXEL'])
49    .map(ALI);

```

```

50
51 var coleccion4 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
52   .filterDate(startDate, endDate)
53   .filterBounds(AOI)
54   .select(['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7', 'QA_PIXEL'], ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'QA_PIXEL'])
55   .map(ALI);
56
57 var coleccionTotal = coleccion1.merge(coleccion2).merge(coleccion3).merge(coleccion4);
58
59 var months = ee.List.sequence(1, 12);
60 var monthsCollection = months.map(function(m) {
61   var monthlyImages = coleccionTotal.filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, 'month'));
62   var monthlyImage = monthlyImages.median().clip(AOI).set('month', m);
63   return monthlyImage;
64 });
65
66 var coleccionMensual = ee.ImageCollection.fromImages(monthsCollection);
67
68 var months.getInfo().forEach(function(month) {
69   var img_month = coleccionMensual.filter(ee.Filter.eq('month', month)).mosaic();
70   Map.addLayer(img_month, imagenRGB, 'Landsat Month ' + month, false);
71 });
72
73 var months.getInfo().forEach(function(month) {
74   var NDWI_month = coleccionMensual.filter(ee.Filter.eq('month', month)).mosaic()
75     .normalizedDifference(['green', 'swir1']);
76   Map.addLayer(NDWI_month, imagenNDWI, 'NDWI Month ' + month);
77 });
78
79 var exportImage = function(image, name, region) {
80   Export.image.toDrive({
81     image: image,
82     description: name,
83     region: region,
84     scale: 30,
85     maxPixels: 1e13,
86   });
87 };
88
89 var months.getInfo().forEach(function(month) {
90   var img_month = coleccionMensual.filter(ee.Filter.eq('month', month)).mosaic();
91   var name = 'Landsat_Month_' + month;
92   exportImage(img_month, name, AOI);
93
94   var NDWI_month = coleccionMensual.filter(ee.Filter.eq('month', month)).mosaic()
95     .normalizedDifference(['green', 'swir1']);
96   var NDWI_name = 'NDWI_Month_' + month;
97   exportImage(NDWI_month, NDWI_name, AOI);
98 });

```

4.4 Post Procesamiento DEM

4.4.1 Post Procesamiento DEM

La producción de líneas de contorno de alta precisión es importante para la determinación de los métodos tradicionales de volumen de contorno (Du et al.,2023). Una vez descargados de manera local el archivo DEM para el año 2000, realizando la previa verificación de la no existencia del embalse artificial ni demás interferencias como cuerpos de agua u otros, mediante la herramienta ARCGIS PRO 3.3, se procedió con la generación de líneas de contorno mediante la herramienta de arctoolbox > 3D Analisis Tools> Raster > Surface > Contour para la generación de curvas de nivel basadas en el DEM de referencia.

Una vez generadas las curvas de nivel mediante la herramienta Contour de ArcGis Pro 3.3, se procedió con la generación de archivo TIN (red irregular de triángulos) mediante la herramienta de arctoolbox > 3D Analisis Tools> Raster > TIN Dataset > Create TIN. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.arctoolbox > 3D Analisis Tools> Raster > TIN Dataset > Create TIN. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.



4.4.2 Post Procesamiento de Imágenes NDWI

Una vez descargados de manera local los archivos ráster con el índice NDWI para las imágenes compuestas de interés mediante la herramienta ARCGIS PRO 3.3, se procedió con:

4.4.2.1 Determinación de Imágenes Lansat Funcionales.

En el análisis de imágenes satelitales, es crucial seleccionar aquellas que cumplan con los requisitos específicos del estudio. Las imágenes útiles se definieron como aquellas que proporcionan una cantidad adecuada de información, destacándose por su alta calidad y una baja interferencia de factores como la nubosidad, la contaminación atmosférica u otros elementos que puedan comprometer la precisión y fiabilidad de los datos. Esta revisión fue realizada de manera manual identificando los ráster compuestos con suficientes datos para ser post procesadas, para los casos en los que no existan imágenes compuestas funcionales con periodicidad mensual, pero la imagen compuesta con periodicidad anual es funcional, se hace uso de esta última bajo la figura de mes de diciembre del respectivo año.

4.4.2.2 Calculo Área de Lámina de Agua en Función del Tiempo.

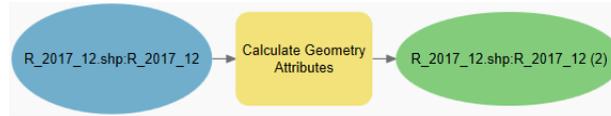
Una vez identificados los ráster a ser post procesados, se procedió a utilizar el Software ArcGis Pro 3.3, mediante la herramienta del arctoolbox > Spatial Analysis Tools > Reclass > Reclassify para la generación de nuevos ráster con dos únicos valores según el conjunto de datos definido para cada ráster. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.



Una vez reclasificados los raster con el índice NDWI para cada una de las imágenes compuestas seleccionadas, se hizo uso de la herramienta de arctoolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon, generando los shapefile tipo polígonos como se muestra a continuación. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.



En los archivos Shapefile de tipo polígono generados a partir del paso anterior, se hizo uso de la herramienta arctoolbox > Data Management Tools > Feature > Calculate Geometry Attributes para crear la columna de área y calcular su valor en unidad de Hectárea para cada uno de los ráster seleccionados. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.



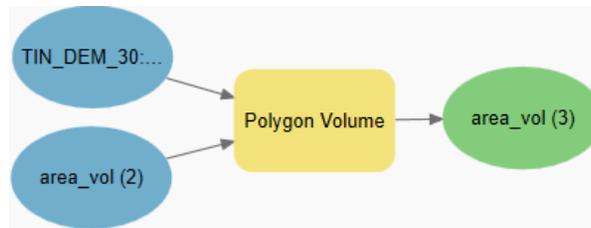
Una vez terminado los anteriores pasos, se procedió a realizar eliminación manual de los campos o atributos de los shapefile de tipo polígono que no representaban la lámina de agua del embalse objeto del análisis.

4.4.3 Cálculo de Volumen de Agua del Embalse en Función del Tiempo

Una vez definido el modelo de elevación digital, se procede con la creación de un shapefile tipo polígono que represente el área máxima posible de la lámina de agua o cuenca hidrográfica del punto de interés, esto con el objetivo de que al momento de terminar el volumen del cuerpo de agua no genere errores de sobredimensionamiento de volumen. Para esto, se hace uso de la herramienta Create Feature Class del software Arcgis Pro 3.3. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.



Una vez determinados el archivo TIN generado a partir del modelo de elevación digital y el shapefile de referencia, se hace uso de la herramienta arctoolbox 3D Analyst Tools > Area and Volume > Polygon Volume para determinar el volumen entre el polígono y el TIN ingresados para múltiples cotas de elevación. A continuación, se muestra el procedimiento en la herramienta model builder de Arcgis Pro 3.3.

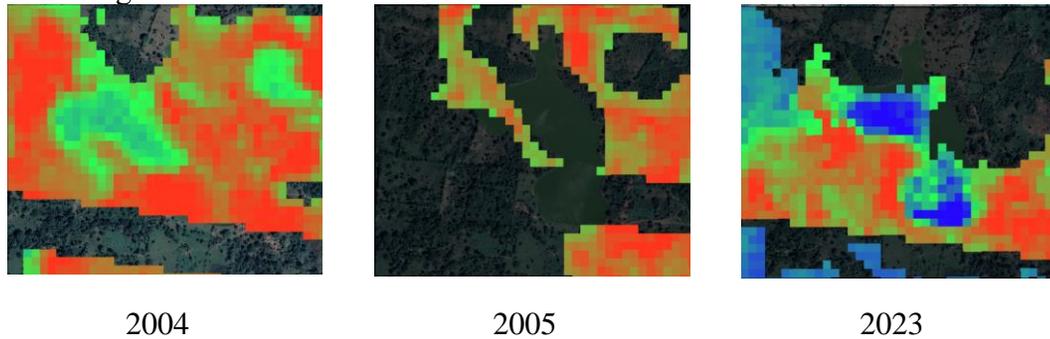


5. Análisis y resultados

5.1 Determinación del Periodo de Tiempo de Inicio de Llenado Embalse Artificial las Parcelas – Análisis de Imágenes Satelitales de Landsat y NDWI

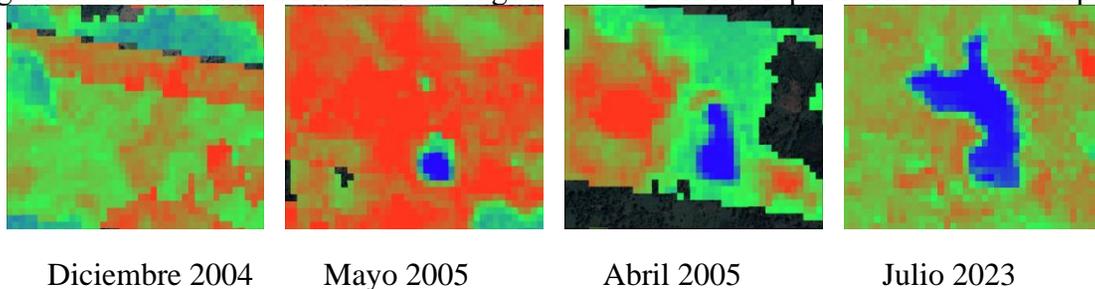
Durante la etapa de preprocesamiento de las imágenes satelitales de la misión Landsat en la Plataforma Google Earth Engine, se encontraron 252 imágenes compuestas con periodicidad mensual y 12 imágenes compuestas con periodicidad anual. La principal dificultad encontrada en este procedimiento fue la falta de información del píxel de las imágenes originada por la alta cobertura de nubes en la región, haciendo que muchas de las fotografías satelitales analizadas contarán con datos parciales o no suficientes para el análisis propuesto como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Imágenes Satelitales Landsat con índice NDWI no funcionales.



Durante el análisis de las imágenes satelitales con periodicidad anual, se identificó la existencia del cuerpo de agua desde el año 2005, mientras que para la periodicidad mensual se identificó que el primer mes donde se evidencia la existencia del cuerpo de agua obedece al mes de mayo del año 2005 como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Presencia de lámina de agua de embalse las parcelas en el tiempo.



A partir del mes de mayo del año 2005, se encontraron 44 imágenes funcionales que contaban con presencia de la lámina de agua del embalse y con la calidad suficiente para su posterior procesamiento. Se presenta en la Tabla 1 la relación entre imágenes con índice NDWI funcionales que cuentan con la presencia del cuerpo de agua Las Parcelas.

Tabla 1. Funcionalidad de imágenes satelitales con índice NDWI y presencia de cuerpo de agua Las Parcelas.

Año	Periodo Imagen Compuesta												Anualizada
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2004	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2005	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI
2006	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI
2007	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2008	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
2009	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
2010	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
2011	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
2012	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
2013	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI
2014	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI
2015	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
2016	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
2017	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
2018	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI
2019	SI	SI	NO	SI	SI	SI							
2020	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI
2021	NO	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI
2022	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
2023	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI
2024	NO	SI	NO	SI	No data		SI						

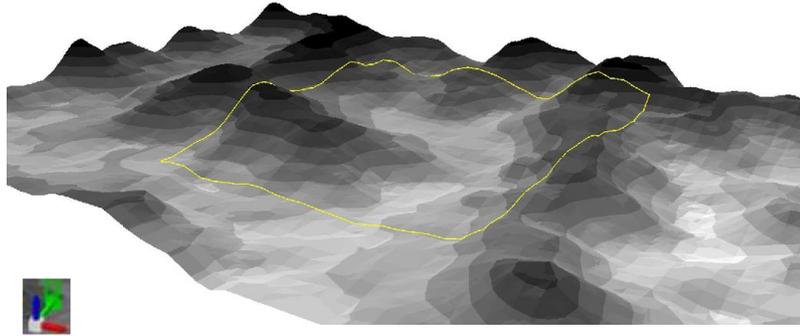
5.2 Análisis del Volumen de Agua usando el DEM de NASADEM e Imágenes Satelitales Lansant con Índice NDWI

Para el análisis del volumen de agua del embalse artificial Las Parcelas, se usó tanto del modelo digital de elevación como de las imágenes satelitales con índice NDWI, a continuación, se describe lo encontrado:

5.2.1 Análisis del Modelo de Elevación Digital DEM

El análisis del volumen del embalse artificial fue realizado mediante el uso un DEM para el año 2000 de NASADEM y sin considerar la geometría de la represa artificial construida para el represamiento del agua ni el efecto que conlleva el arrastre, sedimentación y depósito de material en el fondo del embalse como se muestra a continuación en la Figura 5.

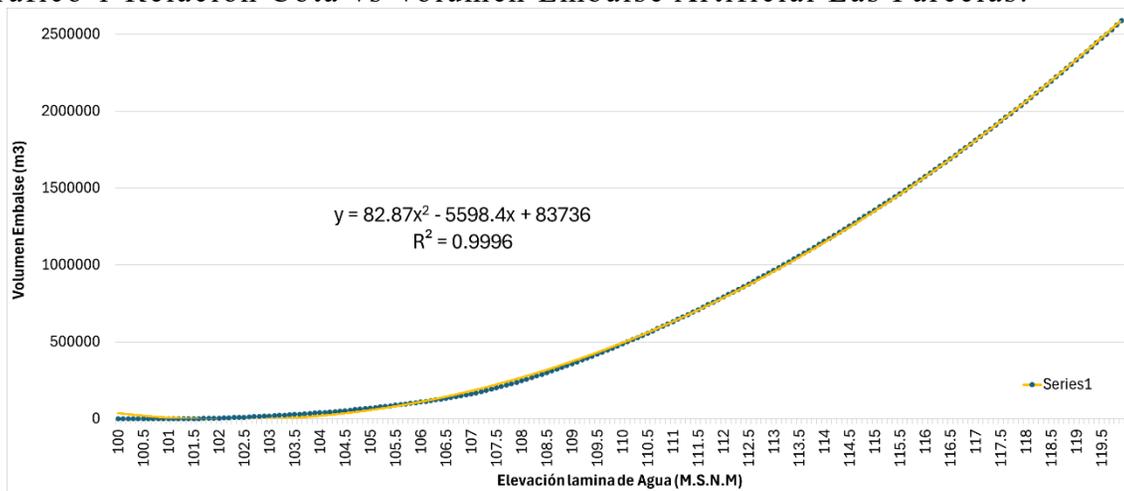
Figura 5. Superficie del Modelo de elevación digital del embalse las parcelas año 2000.



Mediante el uso del software de ArcGIS Pro 3.3 como fue descrito en la metodología anteriormente, se determinó el volumen (m^3) del embalse con relación a la cota de la lámina de agua (m.s.n.m) como se muestra en el, el cual se identificó que la línea de tendencia de los datos denominada como Series1 cuenta con comportamiento polinómico de grado 2 con R^2 de 0.9996 descrito por la ecuación:

$$Volumen (m^3) = 82.87x^2 - 5598.4x + 83736$$

Gráfico 1 Relación Cota vs Volumen Embalse Artificial Las Parcelas.



5.2.2 Evolución Temporal del Volumen del Embalse Artificial Las Parcelas (2005 – 2024)

Una vez determinadas las imágenes satelitales con índice DWI funcionales para el análisis como se mostró en la Tabla 1, se determinó el volumen correspondiente del embalse para cada uno de los períodos cubiertos, dando como resultado la Tabla 2 que se presenta a continuación:

Tabla 2. Parámetros de análisis del embalse artificial Las Parcelas.

ID	5	6	11	20	36	48	60	72	84	96	106
Año	2005	2005	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Mes	5	6	11	8	No data	12	Anual	Anual	Anual	Anual	10
Área (Ha)	1.9	4.4	6.5	11.5		10.3	11.4	10.2	9.3	10.5	15.1
Cota (m.s.n.m)	103.1	105.9	107	108.7		108.1	108.7	108.1	107.7	108.2	110.90
Volumen (m3)	20569	105170	161338	323235		258124	323235	258124	219467	268492	616931

ID	108	116	119	120	121	126	129	135	136	141	143
Año	2013	2014	2014	2014	2015	2015	2015	2016	2016	2016	2016
Mes	12	8	11	12	1	6	9	3	4	9	11
Área (Ha)	12.9	14.2	15.9	14.2	15.0	15.2	12.9	13.4	13.2	13.8	14.4
Cota (m.s.n.m)	109.5	110.20	111.40	110.3	110.80	110.90	109.5	109.80	109.70	110.00	110.40
Volumen (m3)	420670	514895	694321	529012	601893	616931	420670	460032	446742	487119	543282

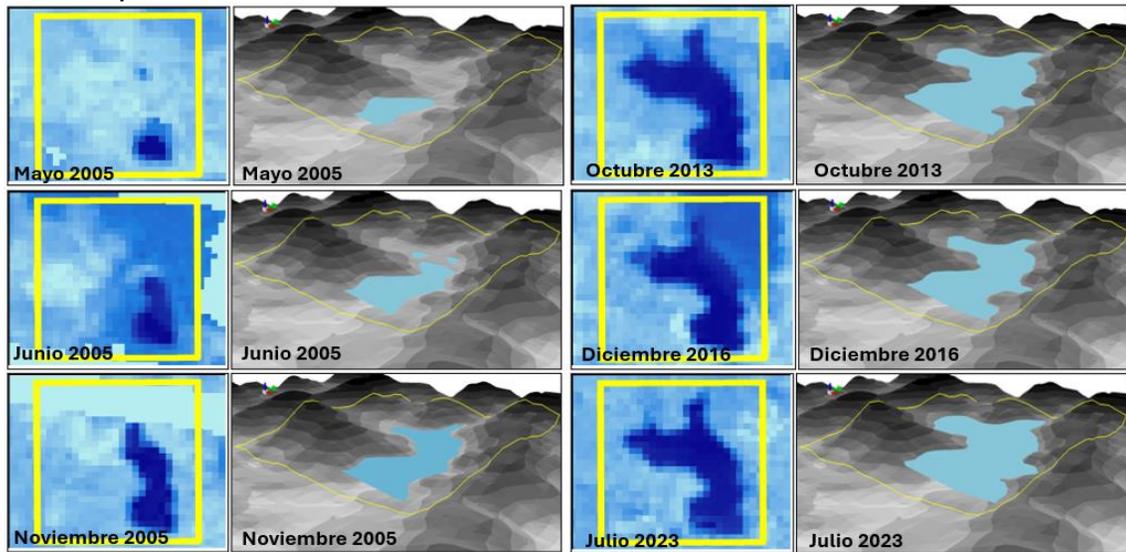
ID	144	156	164	169	170	179	180	181	182	183	184
Año	2016	2017	2018	2019	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2020
Mes	12	12	8	1	2	11	12	1	2	3	4
Área (Ha)	11.8	14.9	13.9	12.8	15.8	12.5	15.0	14.1	13.8	12.7	12.1
Cota (m.s.n.m)	108.8	110.7	110.1	109.50	111.30	109.2	110.80	110.20	110.00	109.40	109.10
Volumen (m3)	334770	587010	500931	420670	678560	382824	601893	514895	487119	407886	370544

ID	185	190	192	194	197	198	200	206	213	217	218
Año	2020	2020	2020	2021	2021	2021	2021	2022	2022	2023	2023
Mes	5	10	12	2	5	6	8	2	9	1	2
Área (Ha)	14.8	13.5	14.1	13.4	14.1	14.3	14.6	13.7	15.1	14.8	14.6
Cota (m.s.n.m)	110.6	109.90	110.20	109.70	110.20	110.30	110.5	110.00	110.9	110.60	110.50
Volumen (m3)	572281	473491	514895	446742	514895	529012	557704	487119	616931	572281	557704

ID	221	223	230	238
Año	2023	2023	2024	2024
Mes	5	7	2	10
Área (Ha)	14.8	16.7	16.4	14.5
Cota (m.s.n.m)	110.60	112	111.7	110.50
Volumen (m3)	572281	791832	742446	557704

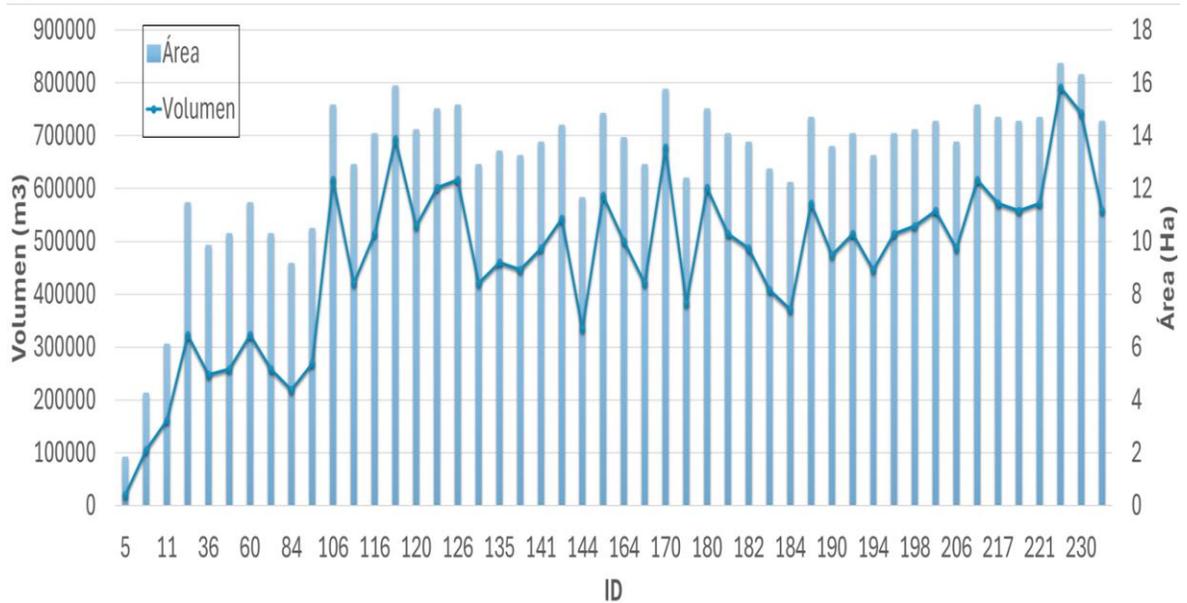
La teledetección satelital es una poderosa herramienta para mapear zonas inundadas (Notti et al.,2018), El análisis de los datos de la imagen satelital con NDWI permitió identificar con precisión las etapas iniciales del llenado del embalse, iniciando entre el periodo de enero del 2005 y mayo del 2005, mes para el cual el embalse artificial ya contaba con un volumen de agua aproximado de 20569 m³, alcanzando su primer pico significativo en el mes de octubre de 2013 con 616931 m³. El resultado obtenido es concordante con la afirmación de que la teledetección puede ser utilizada para determinar una posible ubicación para la construcción de un embalse de agua (Khojiakbar et al.,2019). A partir del año 2013 y con base a los meses evaluados, el volumen crítico mínimo del embalse artificial se presentó en diciembre del 2016 con 334770 m³ y su volumen máximo a julio de 2023 con 791832 m³ como puede apreciarse en la Figura 6 que se presenta a continuación:

Figura 6. Evolución de la lámina de agua del embalse artificial Las Parcelas en el tiempo.



Mientras que en el Gráfico 2 puede observarse el comportamiento del volumen en unidad de metros cúbicos desde el mes de mayo del año 2005 hasta el mes de octubre del año 2024 como se presenta a continuación:

Gráfico 2. Variabilidad de volumen del embalse artificial las parcelas año 2005 - 2024.



6. Conclusiones

- El análisis espacial de las variaciones en el volumen de agua se llevó a cabo utilizando el modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM con una resolución de 30 metros y los datos de las imágenes satelitales de la misión Landsat con una resolución de 30 metros, junto con el índice NDWI. Este enfoque permitió calcular la evolución temporal de la superficie inundada, el volumen y la altura de la lámina de agua desde mayo de 2005 hasta octubre de 2024. Los resultados indican que el periodo de llenado del embalse comenzó entre enero y mayo de 2005. Además, se determinaron los volúmenes y cotas máximas y mínimas de la lámina de agua durante el periodo evaluado. El volumen crítico mínimo del embalse artificial se registró en diciembre de 2016, con 334770 m³ y una cota de 108.8 m.s.n.m, mientras que el volumen máximo se alcanzó en julio de 2023, con 791832 m³ y una cota de 112 m.s.n.m.
- El análisis del modelo de elevación digital (DEM) de NASADEM permitió establecer una relación matemática entre el volumen de agua del embalse artificial Las Parcelas y la cota de la lámina de agua, sin considerar la geometría de la represa ni los efectos derivados de procesos como el arrastre, la sedimentación y el depósito de material en el fondo del embalse. La ecuación polinómica de segundo grado obtenida es la siguiente:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = 82.87y^2 - 5598.4y + 83736 \quad R^2 = 0.9996$$

Donde y representa la cota de la lámina de agua en m.s.n.m. Esta relación proporciona una herramienta útil para estimar el volumen del embalse en función de la cota, lo que facilita su monitoreo y gestión eficiente a lo largo del tiempo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el modelo no incorpora factores geométricos ni dinámicas de sedimentación, lo que podría influir en la precisión de los resultados en condiciones específicas.

- Este enfoque metodológico ofrece una herramienta integral para analizar la evolución de embalses artificiales, empleando técnicas avanzadas de teledetección y análisis geoespacial. Este tipo de análisis resulta crucial para optimizar la gestión de los recursos hídricos, la planificación de infraestructuras y la sostenibilidad ambiental, especialmente en regiones donde los embalses artificiales desempeñan un papel esencial en la regulación y distribución del agua. Una mejora en la resolución de las imágenes satelitales y el modelo de elevación digital permitiría obtener resultados más detallados y precisos en el análisis del embalse, ya que una mayor resolución facilita la identificación de cambios más sutiles en la superficie del agua, mejorando la capacidad para monitorear su evolución temporal y estimar de manera más exacta el volumen de agua almacenado.

7. Referencias

Agudelo, R. C. (2022). Dispositivos paramilitares en la configuración de estructuras económicas y dinámicas de guerra en el Urabá Antioqueño. Universidad de Barcelona.

Amani, M., Kakooei, M., Ghorbanian, A., Warren, R., Mahdavi, S., Brisco, B., ... & Post, R. (2022). Forty years of wetland status and trends analyses in the Great Lakes using Landsat archive imagery and Google Earth Engine. *Remote sensing*, 14(15), 3778.

Bacalhau, J.´., Neto, A. R.´,taux, J.-F.´.,-Nguyen, M. B., & Moreira, D. M. (2022). Bathymetry of reservoirs using altimetric data associated to optical images. *Advances in Space Research*.

Bajaj, M., Sasaki, N., Tsusaka, T. W., Venkatappa, M., Abe, I., & Shrestha, R. P. (2024). Assessing changes in mangrove forest cover and carbon stocks in the Lower Mekong Region using Google Earth Engine. *Innovation and Green Development*.

Banerjee, A., Ariz, D., Turyasingura, B., Pathak, S., Sajjad, W., Yadav, N., & Kirsten, K. L. (2024). Long-term climate change and anthropogenic activities together with regional water resources and agricultural productivity in Uganda using Google Earth Engine. *Physics and Chemistry of the Earth*.

Beleño, J. A., Ayala, C. A., & Herrera, L. K. (2024). Participación sociopolítica en el escenario de posconflicto: caso Urabá Antioqueño. *Revista Notas Históricas y Geográficas*.

Cao, H., Han, L., & Li, L. (2022). Changes in extent of open-surface water bodies in China's Yellow River Basin (2000–2020) using Google Earth Engine cloud platform. *Anthropocene*, 39, 100346.

Capolupo, A. (2021). Improving the accuracy of global DEM of differences (DoD) in Google Earth engine for 3-D change detection analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 12332-12347.

Cheng, C., Zhang, F., Li, X., Tan, M. L., Kumar, P., Johnson, B. A., . . . Liu, C. (2023). Variations in water storage of Bosten Lake, China, over the last two decades based on multi-source satellite data. *Journal of Hydrology*.

Crippen, R., Buckley, S., Agram, P., Belz, E., Gurrola, E., Hensley, S., ... & Tung, W. (2016). NASADEM global elevation model: Methods and progress. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 125-128.

Demir, S., Bas, L., & ayiğit. (2024). Digital Mapping Burn Severity in Agricultural and Forestry Land over a Half-Decade Using Sentinel Satellite Images on the Google Earth Engine Platform: A Case Study in Isparta Province. *Trees, Forests and People*.

Du, Y., Sun, L., Dong, K., & Li, B. (2023, October). Comparison between contour volume method and DEM grid method in calculating reservoir capacity based on LIDAR data. In

2023 2nd International Conference on Optical Imaging and Measurement (ICOIM) (pp. 237-241). IEEE.

Elsonbaty, L., Fawzy, H. E.-D., Moghazy, H. M., Rashed, G., & Hamed, M. (2023). Vertical accuracy assessment for open-source digital elevation models using GPS control points and watershed basins delineation using GIS. *Alexandria Engineering Journal*.

Fernando, W. A., & Senanayake, I. (2024). Developing a two-decadal time-record of rice field maps using Landsat-derived multi-index image collections with a random forest classifier: A Google Earth Engine based approach. *Information Processing in Agricu*.

Gobernación de Antioquia. (Sin fecha). Gobernación de Antioquia. Obtenido de <https://corregimientos.antioquia.gov.co/corregimiento-el-tomate/#:~:text=A1%20norte%20de%20la%20cabecera,con%20el%20distrito%20de%20Turbo>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27.

Han, K., Kim, S., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2024). Enhanced water level monitoring for small and complex inland water bodies using multi-satellite remote sensing. *Environmental Modelling and Software*.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R. H., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., . . . Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*.

Huang, X., Xiong, L., Jiang, Y., Li, S., Liu, K., Ding, H., & Tang, G. (2023). Mapping gully affected areas by using Sentinel 2 imagery and digital elevation model based on the Google Earth Engine. *Catena*.

Kariminejad, N., Jafari, M., Domazetović, F., & Quesada-Román, A. (2024). An Overview of the Importance of DEM Resolution in Soil Erosion Assessment. *Papers in Applied Geography*, 1-10.

Khojiakbar, K., Masharif, B., Jamshid, C., Aziz, J., & Azat, K. (2019). Water reservoir area and volume determination using geoinformation technologies and remote sensing. *Methods*, 16, 17.

Kislik, C., Dronova, I., Grantham, T. E., & Kelly, M. (2022). Mapping algal bloom dynamics in small reservoirs using Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. *Ecological Indicators*, 140, 109041.

Liang, J., Chen, C., Song, Y., Sun, W., & Yang, G. (2023). Long-term mapping of land use and cover changes using Landsat images on the Google Earth Engine Cloud Platform in bay area - A case study of Hangzhou Bay, China. *Sustainable Horizons*.

Liu, X., Hu, G., Chen, Y., Li, X., Xu, X., Li, S., ... & Wang, S. (2018). High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. *Remote sensing of environment*, 209, 227-239.

Luna, I. J. C., Murguía, M. L., Pati, F. M., & Valdivia, H. S. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la subcuenca del río Coroico-provincia Caranavi en los años 1989-2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25-44.

Naranjo Bedoya, K., Aristizábal Giraldo, E. V., & Morales Rodelo, J. A. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvias en la región Andina colombiana. *Ingeniería y Ciencia*, 15(29), 11-42.

NASA JPL (2020). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-12-30 from doi:10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001.

Nguyen, B. Q., Vo, N. D., Le, M. H., Nguyen, Q. D., Lakshmi, V., & Bolten, J. D. (2023). Quantification of global Digital Elevation Model (DEM)—A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101282.

Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., & Galve, J. P. (2018). Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote sensing*, 10(11), 1673.

Pérez, A. K. C. (2021). Usando múltiples trazadores para comprender el funcionamiento de acuíferos freáticos heterogéneos en zonas húmedas tropicales: caso del Golfo de Urabá, Colombia (Doctoral dissertation, Universidad de Antioquia).

Pinkeaw, S., Boonrat, P., Koedsin, W., & Huete, A. (2024). Semi-automated mangrove mapping at National-Scale using Sentinel-2, Sentinel-1, and SRTM data with Google Earth Engine: A case study in Thailand. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*.

Połomski, M., & Wiatkowski, M. (2023). Impounding Reservoirs, Benefits and Risks: A Review of Environmental and Technical Aspects of Construction and Operation. *Sustainability*, 15(22), 16020.

Song, X. P., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*.

Tran, T. N. D., Nguyen, Q. B., Vo, N. D., Marshall, R., & Gourbesville, P. (2022). Assessment of terrain scenario impacts on hydrological simulation with SWAT model. Application to lai Giang catchment, vietnam. In *Advances in Hydroinformatics: Models for*

Complex and Global Water Issues—Practices and Expectations (pp. 1205-1222). Singapore: Springer Nature Singapore.

U.S. Geological Survey (USGS). (2024). Landsat 8 satellite imagery [Imagen satelital]. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/landsat>

Vargas, T. B., Duque, J. C. D., Uribe, C. M., Giraldo, D. G., Yepes, P. P. V., & Zuñiga, V. P. (2020). Delimitación de las potenciales zonas de recarga-caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Revista Politécnica*, 16(32), 41-55.

Villarreal, C. A., Garzón, C. G., Mora, J. P., Rojas, J. D., & Ríos, C. A. (2022). Workflow for capturing information and characterizing difficult-to-access geological outcrops using unmanned aerial vehicle-based digital photogrammetric data. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100292.

West, H., Quinn, N., Horswell, M., 2019. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sens. Environ.* 232, 111291.

Yang, J.-H., Gao, Y.-C., Jia, L., Wang, W.-J., Wu, Q.-B., Zvomuya, F., . . . He, H.-L. (2024). Enhanced detection of freeze–thaw induced landslides in Zhidui county (Tibetan Plateau, China) with Google Earth Engine and image fusion. *KeAi*.

Zhao, B., & Wang, L. (2024). Surface water monitoring from 1984 to 2021 based on Landsat time-series images and Google Earth Engine. *Heliyon*.