



**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA FLUVIAL DEL ABANICO
DEL RÍO GUAYURIBA EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO Y ACACÍAS,
META**

JAIRO ARTURO BARRERA PONGUTÁ

Código: 11792228158

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2023

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA FLUVIAL DEL ABANICO
DEL RÍO GUAYURIBA EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO Y ACACÍAS,
META**

JAIRO ARTURO BARRERA PONGUTÁ

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Directora:

Dra Liliana Vanessa Celis Gil

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2023

Contenido

	Pág.	
1	Introducción	
2	Objetivos	10
2.1	Objetivo general	10
2.2	Objetivos específicos.....	10
3	Planteamiento del Problema	11
4	Justificación	12
5	Marco Teórico y Estado del conocimiento	13
5.1	Análisis multitemporal	13
5.2	Imágenes satelitales Landsat	14
5.3	Correcciones atmosféricas.....	16
5.4	Índices espectrales.....	16
6	Metodología	18
6.1	Localización del área de estudio	18
6.2	Delimitación y corte de las imágenes.....	22
6.3	Correcciones atmosféricas de imágenes	23
6.4	Cálculo de índices espectrales NDWI y BSI.....	28
6.5	Análisis multitemporal cualitativo de la dinámica fluvial	29
7	Resultados y discusión	31
7.1	Delimitación del área de estudio	31
7.2	Proceso de corrección atmosféricas	33
7.3	Cálculo de índices espectrales.....	35
7.4	Análisis multitemporal cualitativo de la zona de estudio.....	38
8	Conclusiones	45
9	Recomendaciones	47
10	Referencias	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Localización del área de estudio.....	18
Figura 2 Diagrama de proceso metodológico	20
Figura 3 Modelo de iteración en ArcGIS.....	22
Figura 4 Esquema de extracción por máscara de un ráster.....	23
Figura 5 Correcciones en el preprocesamiento	24
Figura 6 Datos para correcciones de las imágenes.	25
Figura 7 Esquema del modelo iterativo para cotar las bandas de cada temporalidad.....	32
Figura 8 Localización Geográfica área de estudio: Derecha escena completa, izquierda, imagen cortada, área de estudio, escala1:100000	33
Figura 9 Diseño de modelo para corrección Tao	34
Figura 10 Imagen de la banda 7, izquierda, banda si corrección, derecha, banda corregida a niveles de reflectancia.	35
Figura 11 NDWI de la zona de estudio del año 2018, se observa realce de las zonas húmedas en el cauce. 1:25000.....	35
Figura 12 BSI de la zona de estudio del año 2018, en color verde zonas de vegetación, color rojo suelo expuesto sin vegetación. 1:25000.	37
Figura 13 NDWI 2017 y BSI 2017, escala 1:25000	39
Figura 14 NDWI y BSI 2018, escala 1:25000	40
Figura 15 Imágenes NDWI y BSI 2019, escala 1:25000.....	40
Figura 16 NDWI y BSI 2020, escala 1:25000	41
Figura 17 NDWI y BSI 2021, escala 1:25000	42
Figura 18 NDWI y BSI 2022, escala 1:25000	43
Figura 19 NDWI y BSI 2023-02, escala 1:25000.....	43
Figura 20 NDWI y BSI 2023-02, escala 1:25000.....	43

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Imágenes empleadas para el estudio.....	21

Resumen

El estudio se centró en analizar los cambios en la dinámica fluvial del río Guayuriba y su llanura de inundación entre 2017 y 2023. Se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 y 9, y se aplicaron índices espectrales como el NDWI y BSI para evaluar el agua y el suelo expuesto. Se llevaron a cabo correcciones radiométricas y geométricas para mejorar la calidad de las imágenes. El análisis multitemporal reveló variaciones significativas en la vegetación, humedad y suelo expuesto a lo largo de los años. Esto proporcionó una comprensión detallada de los procesos fluviales y permitió identificar patrones de cambio. Las recomendaciones incluyen la ampliación temporal, la integración de datos climáticos y la participación comunitaria para futuras investigaciones. Este estudio sienta las bases para una gestión ambiental informada y adaptada a la evolución de la dinámica fluvial en la cuenca del río Guayuriba.

Abstract

The study focused on analyzing changes in the fluvial dynamics of the Guayuriba River and its floodplain between 2017 and 2023. Landsat 8 and 9 satellite images were used, and spectral indices like NDWI and BSI were applied to assess water and exposed soil. Radiometric and geometric corrections were conducted to enhance image quality. The multi-temporal analysis revealed significant variations in vegetation, moisture, and exposed soil over the years. This provided a detailed understanding of river processes and allowed for the identification of patterns of change. Recommendations include extending the temporal scope, integrating climate data, and involving community participation for future research. This study lays the groundwork for an informed environmental management strategy tailored to the evolving fluvial dynamics in the Guayuriba River basin.

1 Introducción

La comprensión de la dinámica fluvial reviste una importancia significativa en el contexto global. Los ríos desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas, la economía y la sociedad en general. Su estudio permite anticipar y mitigar posibles impactos de eventos naturales extremos, como inundaciones y sequías, así como planificar un uso sostenible de los recursos hídricos.

Colombia, cuenta con una extensa red hidrográfica y una geografía montañosa. Un ejemplo destacado son los ríos de piedemonte que confluyen en los llanos orientales, considerados como arterias fluviales de importancia para el país. Comprender su comportamiento natural es crucial para la gestión de recursos hídricos, la navegación y el control de inundaciones. Además, Colombia es propenso a fenómenos climáticos extremos como El Niño y La Niña, que pueden tener un impacto significativo en los ríos y sus alrededores. Estudios detallados permiten una mejor preparación y respuesta ante estos eventos. También es vital para el desarrollo sostenible de comunidades que dependen de estos recursos entre estos la explotación de recursos mineros.

El río Guayuriba, ubicado en el departamento del Meta, emerge como un elemento crucial en la geografía de la región. Su curso y su interacción con la llanura tiene una importancia crucial en el desarrollo y la economía local, este ha sido objeto de detallados estudios y enfrenta diversos desafíos que influyen y afectan tanto al entorno natural como a las comunidades locales.

Unos de los principales fenómenos son las inundaciones y la erosión, el río Guayuriba está sujeto a variaciones en el caudal según la temporada, lo que puede dar lugar a inundaciones en la llanura. Estos eventos pueden tener un impacto significativo en áreas urbanas y rurales, causando daños materiales y pérdidas económicas. Además, la dinámica fluvial puede provocar erosión en las orillas del río, afectando la estabilidad de terrenos circundantes.

La presencia del río Guayuriba es fundamental para la agricultura en la región del Meta. Muchas comunidades dependen del riego proporcionado por el río para sus cultivos, lo que hace que la variabilidad en el flujo de agua sea un factor crítico para la producción agrícola, además es fuente generadora de agregados para la contrición el cual es un potencial significativo para el desarrollo minero y energético de la región. Sin embargo, este tipo de desarrollo puede tener impactos ambientales y sociales importantes, como la alteración del cauce y la reubicación de comunidades cercanas.

Este trabajo aborda la dinámica fluvial del río Guayuriba a través de una serie de pasos metodológicos, en los cuales delimitan la zona para focalizar el análisis en el área de interés. Posteriormente, se aplican correcciones atmosféricas para mejorar la calidad y precisión de la información, Luego, se calculan dos índices espectrales que proporcionan información valiosa sobre la presencia de agua y suelos expuestos, respectivamente. Estos índices permiten identificar patrones significativos en la dinámica fluvial y por último se enfoca hacia un análisis multitemporal cualitativo, que implica comparar imágenes de diferentes momentos para identificar cambios en el tiempo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar los cambios en la dinámica fluvial del río Guayuriba entre los años 2017 y 2023, sobre el abanico aluvial, entre los municipios de Villavicencio y Acacías Meta.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar imágenes satelitales Landsat 8 y 9 de las fechas relevantes (2017 y 2023) que cubran el área de interés (río Guayuriba y su llanura de inundación), y realizar correcciones radiométricas y geométricas.

- Detectar los cambios de la dinámica fluvial, a partir de los índices espectrales de suelo desnudo (BSI) e índice de agua normalizado (NDWI), para las imágenes satelitales.

- Realizar análisis multitemporal para determinar los principales cambios que ha tenido el río Guayuriba en los últimos 7 años, sobre su llanura de inundación.

-Identificar los patrones de cambio y causas subyacentes que provocan las variaciones en el cauce natural del río partir de un análisis cualitativo en la zona de estudio.

3 Planteamiento del Problema

El río Guayuriba, situado en el departamento del Meta, enfrenta desafíos ambientales significativos que requieren una atención inmediata y un estudio detallado para comprender y abordar sus complejas dinámicas. Uno de los problemas fundamentales es la perturbación de su dinámica fluvial, que se manifiesta a través de diversos fenómenos, incluyendo inundaciones, erosión de las riberas y cambios en la calidad del agua. Este deterioro puede atribuirse en gran medida a la intensificación de actividades humanas en la región.

La deforestación, resultado de la expansión de la frontera agrícola y las prácticas no sostenibles, contribuye significativamente a la alteración del entorno fluvial. La pérdida de la cobertura forestal disminuye la capacidad del suelo para retener agua, aumentando el riesgo de inundaciones y erosión. La expansión urbana también juega un papel crucial, ya que implica cambios en el uso del suelo que pueden afectar negativamente la dinámica natural del río.

Además, la minería, con su extracción de material de arrastre, puede alterar la morfología del río, afectando su cauce y la estabilidad de las riberas. Este proceso, combinado con las prácticas de extracción no reguladas, tiene un impacto directo en la calidad del agua y en la capacidad del río para mantener su curso de manera saludable.

Los eventos climáticos extremos, como El Niño y La Niña, también desempeñan un papel crucial en la exacerbación de estos problemas. Cambios en los patrones de lluvia y variaciones en las temperaturas pueden intensificar los efectos de la actividad humana, exacerbando la frecuencia e intensidad de inundaciones y otros eventos relacionados con la dinámica fluvial.

4 Justificación

Para abordar la problemática de la dinámica fluvial en el río Guayuriba se sustenta en la importancia crítica de comprender los cambios en esta dinámica. Esta comprensión no solo es valiosa, sino también esencial por diversas razones en las que tenemos los siguientes puntos de vista.

Mitigación de Impactos Adversos: La dinámica fluvial puede dar lugar a eventos adversos, como inundaciones y erosión de las riberas. Comprender estos cambios es fundamental para anticipar y mitigar posibles impactos catastróficos en las áreas urbanas y rurales que podrían resultar afectadas. La identificación temprana de patrones de cambio permite implementar medidas preventivas y de respuesta adecuadas.

Gestión Sostenible de Recursos Hídricos: El río Guayuriba desempeña un papel crucial en la provisión de recursos hídricos en la región. Entender la dinámica fluvial es esencial para la gestión sostenible de estos recursos. Variaciones en el caudal, la calidad del agua y la morfología del río pueden afectar directamente a las comunidades que dependen de estos recursos para la agricultura, el suministro de agua potable y otras actividades económicas.

Planificación del Entorno Antrópico: La dinámica fluvial no solo afecta al entorno natural, sino que también tiene implicaciones directas en el entorno antrópico. La planificación urbana y rural, la ubicación de infraestructuras críticas y la gestión de riesgos están intrínsecamente ligadas a la dinámica fluvial. Un conocimiento detallado de estos procesos es esencial para la toma de decisiones informada y la planificación efectiva del desarrollo en la región.

5 Marco Teórico y Estado del conocimiento

El análisis multitemporal de la dinámica fluvial constituye áreas fundamentales en la evaluación del comportamiento natural de una fuente hídrica. En este contexto, el presente marco teórico se enfocará en las principales teorías y conceptos que sustentan la comprensión y aplicación de los objetivos propuestos en el proyecto Análisis Multitemporal De La Dinámica Fluvial Del Abanico Del Río Guayuriba En La Ciudad De Villavicencio y Acacías, Meta.

5.1 Análisis multitemporal

En el estudio realizado por Sandra Dudei Varón Gutiérrez, titulado Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia, revela que los ríos tropicales de piedemonte, según sus características sedimentológicas, hidrológicas e hidráulicas, tienden a formar cauces trenzados con múltiples canales que varían en número y tamaño en un lecho más amplio, siendo esta variación influenciada por las condiciones climáticas.

Los resultados del estudio realizado por Varón Gutiérrez sobre el río Guatiquía, muestran, por un lado, la dinámica de los cauces trenzados dentro del lecho mayor del sistema fluvial. Por otro lado, se evalúa la susceptibilidad de la ciudad de Villavicencio ante inundaciones, clasificando 64,7 hectáreas en una categoría de riesgo medio-alto y 17,9 hectáreas en una categoría de riesgo alto (Varón Gutiérrez, 2019).

Por otro lado, diversos autores proponen que, mediante el análisis de cambios en la morfología fluvial, se puede identificar algunos patrones de caudales, se evalúa variabilidad climática y la observación de eventos de inundación pasados, proporcionando información crucial para la toma de decisiones en la gestión de riesgos, la planificación urbana y la preservación de ecosistemas fluviales. Este enfoque no solo revela la dinámica a largo plazo de un río, sino que también puede ayudar a predecir y mitigar los impactos de eventos extremos, como inundaciones, en un contexto de cambio ambiental (Manuel et al., n.d.).

5.2 Imágenes satelitales Landsat

Uno de los mejores insumos para realizar un análisis multitemporal son las imágenes satelitales las cuales para este caso puntual se realizaron con productos del programa Landsat 8 y 9, estas son fuente de datos geospaciales utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la monitorización ambiental, la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la cartografía.

El satélite Landsat 8 está equipado con dos instrumentos de barrido: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). El sensor OLI presenta mejoras respecto a los instrumentos de misiones Landsat previas, al incluir dos nuevas bandas espectrales: una en el rango profundo del azul visible (banda 1), diseñada para aplicaciones en recursos hídricos y estudios costeros, y una nueva banda infrarroja (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Además, se añade una banda de control de calidad en cada producto de datos, brindando información detallada sobre la presencia de elementos como nubes, agua y nieve. Por otro lado, el sensor TIRS captura dos bandas espectrales en

longitudes de onda incluidas dentro de la misma banda en los sensores TM y ETM+ de misiones anteriores (Young et al., 2017).

Cuando un satélite como Landsat 8 captura imágenes, la radiación solar interactúa con la atmósfera antes de llegar a la superficie. Para obtener información precisa sobre la superficie terrestre, es esencial corregir estos efectos atmosféricos (Ariza, 2013) . Este proceso implica convertir los valores de radiación medidos en la parte superior de la atmósfera a niveles de reflectancia, que representan la cantidad de luz reflejada por la superficie sin interferencia de la atmósfera. Esto permite una interpretación más precisa de las condiciones del terreno y es esencial para aplicaciones como la detección de cambios en la cobertura del suelo y el monitoreo ambiental.

Según el estudio realizado por (Young et al., 2017) se deben aplicar varias correcciones para asegurar la calidad de los datos. La Corrección Radiométrica convierte los valores de píxeles a reflectancia en la superficie, utilizando coeficientes de calibración proporcionados en el metadato de cada imagen. Posteriormente, se debe hacer corrección geométrica, para enmendar cualquier distorsión espacial presente en las imágenes, esto se realiza utilizando información de órbita y datos del sensor. Además, se aplica la corrección atmosférica utilizando modelos atmosféricos para compensar los efectos de la atmósfera en la reflectancia de la superficie.

5.3 Correcciones atmosféricas

Según la investigación realizada por (Young et al., 2017) titulada “A survival guide to Landsat preprocessing expone” menciona que las principales correcciones atmosféricas prácticas a las imágenes Landsat son las siguientes. Corrección geométrica, corrección radiométrica absoluta, corrección solar, corrección atmosférica, corrección topográfica. Además, resalta que, al analizar múltiples imágenes, recomienda realizar una corrección relativa para normalizar los valores. Sin embargo, la calidad y disponibilidad de los productos de reflectancia superficial de alto nivel siguen mejorando y alentamos a los lectores a considerar el uso de estos productos teniendo en cuenta las suposiciones inherentes en su creación. En la guía muestra cómo reduce el potencial de confusión y ambigüedad que muchos científicos que enfrentan al determinar cómo preprocesar sus imágenes para el análisis. Un mejor entendimiento del preprocesamiento de Landsat puede mejorar la reproducibilidad y precisión a medida que los ecólogos y otros continúan desarrollando nuevas aplicaciones para los datos de teledetección. (Young et al., 2017)

5.4 Índices espectrales

Según (CONAE, 2016) los índices espectrales presentados se obtienen a partir de datos de reflectancia a tope de atmósfera (TOA). Los datos de las bandas del sensor OLI se pueden convertir a datos de reflectancia espectral TOA utilizando los factores de resaltado que se obtienen desde los metadatos.

Para este caso de estudio se realizará el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) y el Índice de Suelo Desnudo (BSI), son dos índices espectrales ampliamente utilizados en teledetección para el análisis de recursos hídricos y cobertura del suelo.

El NDWI se centra en la detección de agua y humedad en un área específica. Calculado a partir de mediciones de reflectancia en longitudes de onda sensible al agua y a la vegetación, el NDWI permite identificar cuerpos de agua y evaluar la humedad en el suelo. Este índice es crucial para el monitoreo de recursos hídricos y la gestión de ecosistemas acuáticos.

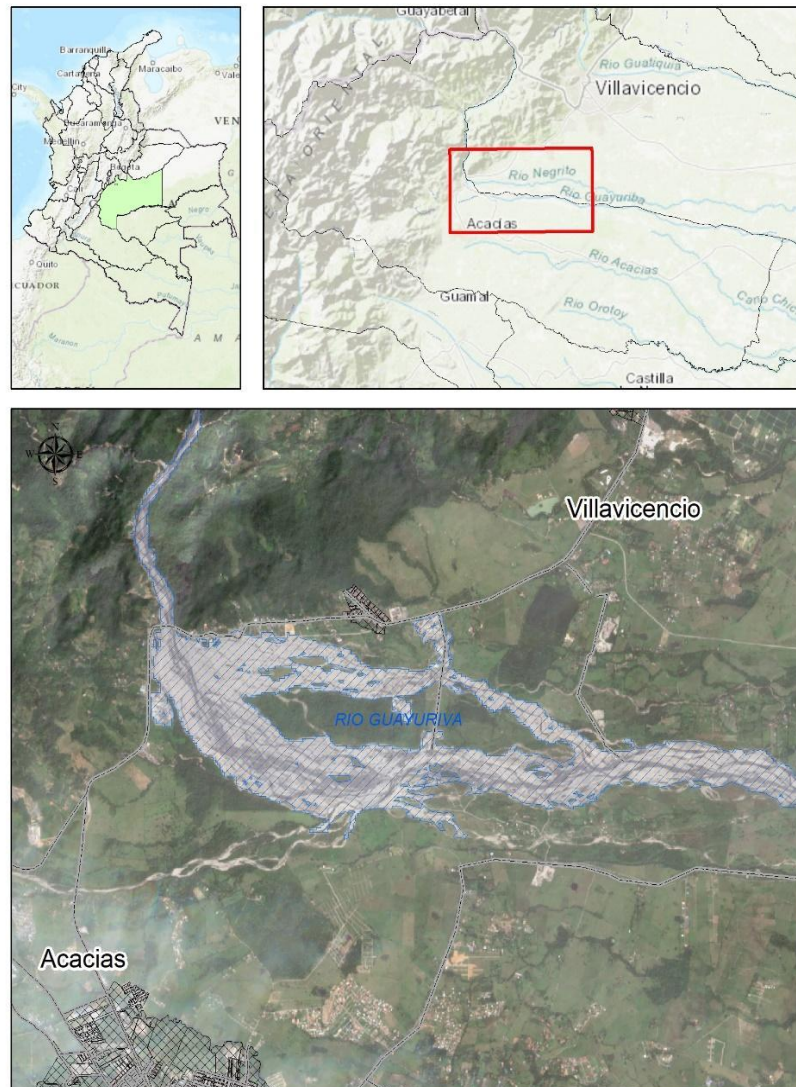
Por otro lado, el Índice de Suelo Desnudo (BSI) se enfoca en determinar la cantidad de suelo expuesto en una zona determinada. Al analizar combinaciones específicas de bandas espectrales, el BSI distingue entre áreas cubiertas por vegetación y áreas donde el suelo está al descubierto. Esto resulta fundamental en la monitorización de cambios en la cobertura del suelo y la evaluación de la erosión.

6 Metodología

6.1 Localización del área de estudio

El área de estudio, que comprende el sector de La Concepción, se encuentra estratégicamente situada a tan solo 19 kilómetros al sur de la ciudad de Villavicencio. Esta localización la coloca en una posición limítrofe con el municipio de Acacias (ver Figura 1)

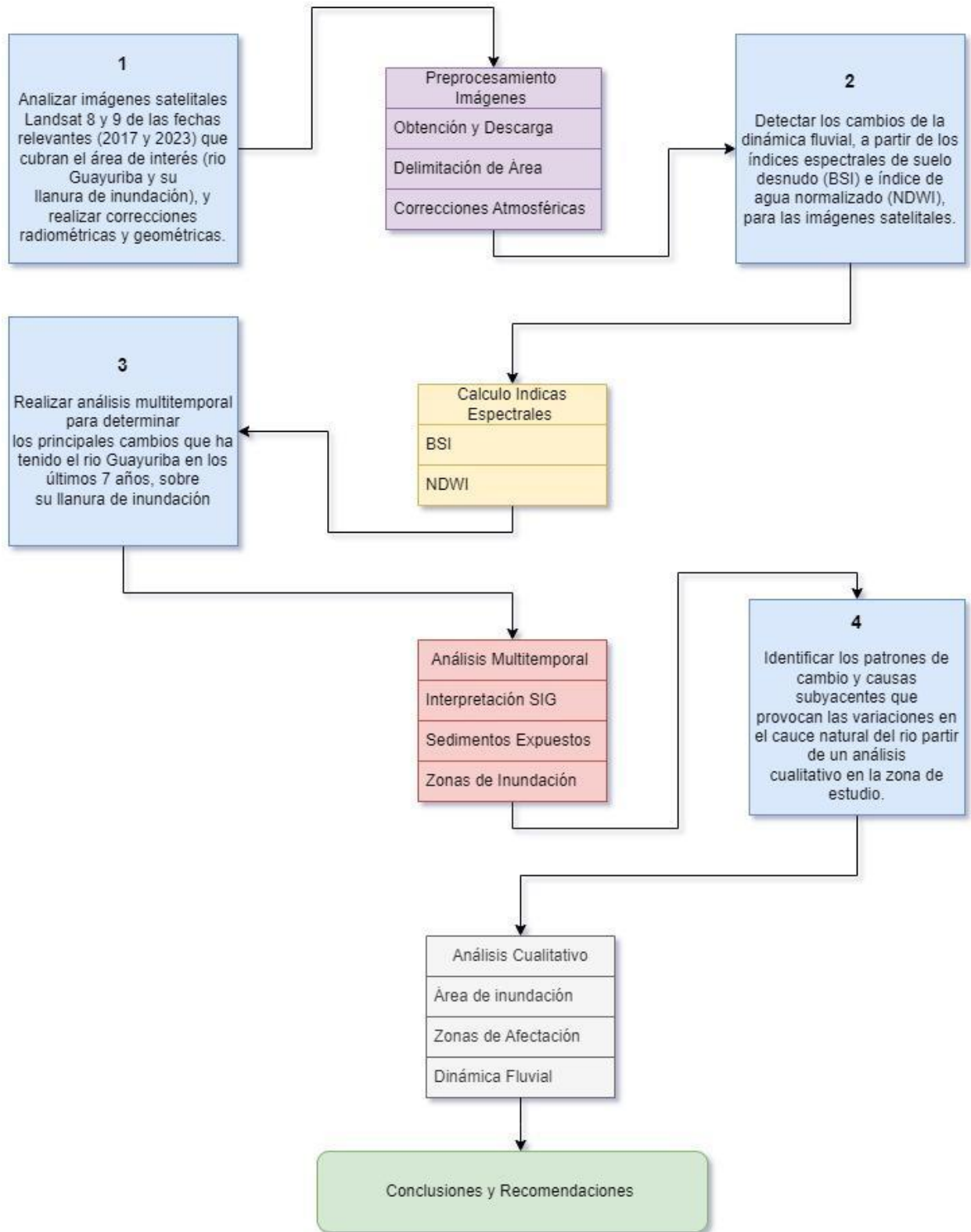
Figura 1 Localización del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

El diseño metodológico se enfocó en tres momentos, para realizar un adecuado análisis integral de la dinámica fluvial del río Guayuriba durante los últimos años, como se indica en la Figura 2. Primero, se llevó a cabo una investigación de los insumos necesarios, para este caso puntual la búsqueda de las imágenes de la temporalidad a analizar. Posteriormente, se realizó un postprocesamiento de las imágenes satelitales de alta resolución y datos topográficos para realizar las correcciones TOA y obtener niveles de reflectancia. Una vez realizada las correcciones, se procedió a realizar los índices espectrales para una mejor interpretación, y por último se realizó un análisis cualitativo en el cual se identificaron los principales factores que intervienen en la dinámica fluvial de río Guayuriba sobre su abanico fluvial y llanura aluvial.

Figura 2 Diagrama de proceso metodológico



Fuente: Elaboración propia

Preprocesamiento para el análisis de imágenes satelitales Landsat y correcciones radiométricas y geométricas.

La recopilación y análisis de imágenes del satélite Landsat involucra varios pasos clave. Primero, se adquirieron las imágenes satelitales a través del geoportal de EarthExplorer, donde se reciben y almacenan los datos transmitidos desde el satélite en órbita. Estos datos crudos se preprocesaron y se realizaron las correcciones radiométricas y geométricas para mejorar su calidad y precisión espacial, las imágenes empleadas para este estudio se describen en la Tabla 1.

Tabla 1 Imágenes empleadas para el estudio.

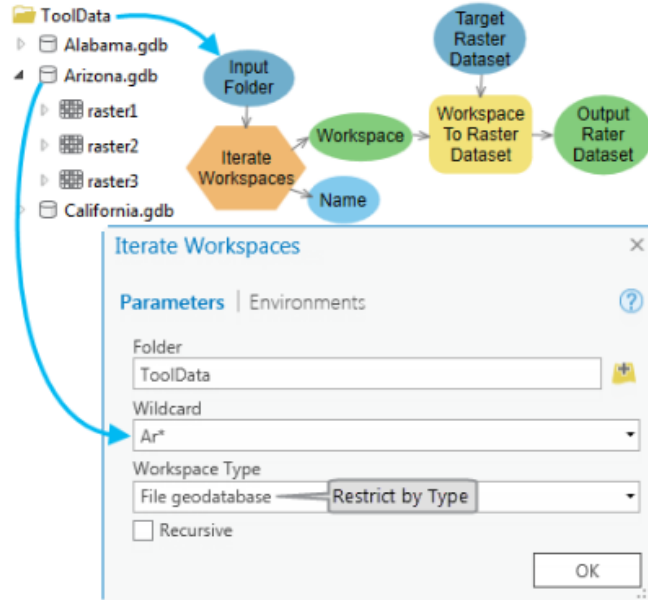
NOMBRE DE LA IMAGEN	RESOLUCIÓN m/pix	FECHA DE ADQUISICIÓN
LC08_L2SP_007057_20170814_20200903_02_T1	30	2017-08-14
LC08_L2SP_007057_20180918_20200830_02_T1	30	2018-09-18
LC08_L2SP_007057_20190225_20200829_02_T1	30	2019-02-25
LC08_L2SP_007057_20200212_20200823_02_T1	30	2020-02-12
LC08_L2SP_007057_20210926_20211001_02_T1	30	2021-09-26
LC09_L2SP_007057_20220108_20230502_02_T1	30	2022-01-08
LC08_L2SP_007057_20230204_20230209_02_T1	30	2023-02-02
LC08_L2SP_007057_20230916_20230925_02_T1	30	2023-09-16

Fuente: Elaboración propia

6.2 Delimitación y corte de las imágenes

Para un mejor manejo de la información se sometió las imágenes a un corte con la zona de estudio, empleando la herramienta "Iterate Rasters" la cual facilitó este proceso al permitir una iteración eficiente sobre las imágenes, garantizando una mayor eficiencia en el proceso de análisis (ver Figura 3).

Figura 3 Modelo de iteración en ArcGIS



Fuente: (Esri, 2023)

Esta herramienta es una función de ArcGIS que permite procesar una serie de archivos raster de manera secuencial o iterativa. Permite automatizar tareas que requieren el procesamiento de múltiples imágenes o capas raster, como aplicar operaciones, realizar análisis, o generar salidas en lotes, la iteración se realizó con la herramienta extract by mask,

La cual extrae las celdas de un ráster que corresponden a las áreas definidas por una máscara, para este caso el shp del área de estudio(Environmental Systems Research Institute, 2023).

Figura 4 Esquema de extracción por máscara de un ráster

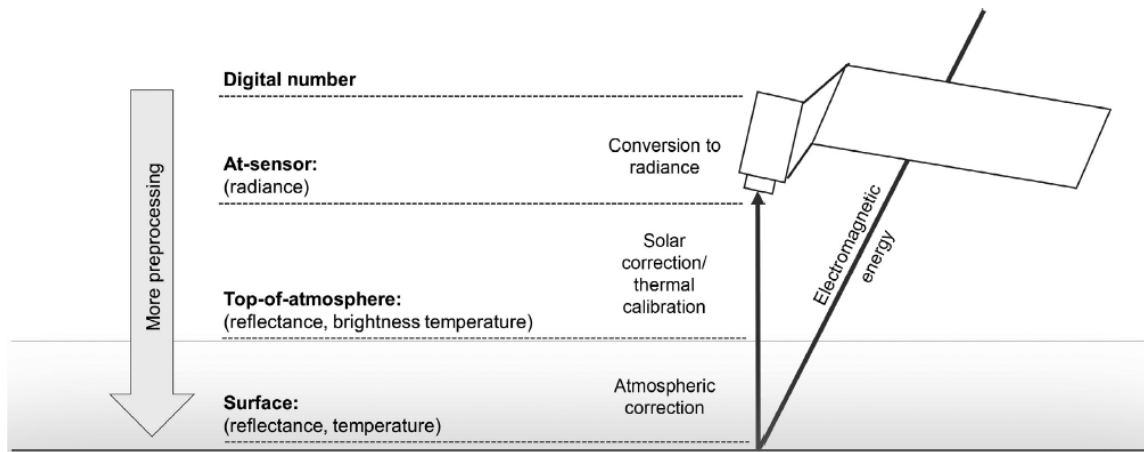


Fuente:(Esri, 2023)

6.3 Correcciones atmosféricas de imágenes

Para realizar un correcto análisis de los datos es necesario realizar correcciones, esto generalmente se requieren un preprocesamiento antes del análisis para tener en cuenta los efectos del sensor, solar, atmosféricos y topográficos, incluida la georreferenciación, la conversión a radiancia, la corrección solar, la corrección atmosférica, y corrección la corrección relativa.(Young et al., 2017), en esta sección, se proporcionamos una descripción de los pasos de preprocesamiento más comunes aplicados a los productos de Landsat y su importancia. Antes de preprocesar las imágenes de Landsat, es importante comprender las unidades comúnmente asociadas con estos datos: número digital (DN), radiancia y reflectancia para las bandas de visible a infrarrojo cercano (vis-SWIR) y para las bandas térmicas, DN, radiancia y temperatura. En la Figura 5 se aprecia el proceso que se debe tener en cuenta para el preprocesamiento.

Figura 5 Correcciones en el preprocesamiento



Fuente: A survival guide to Landsat preprocessing (Young et al., 2017)

Las unidades comunes de las imágenes de Landsat utilizadas en el análisis ecológico cambian a medida que se realiza cada paso de la corrección absoluta: conversión a radiancia, corrección solar/calibración térmica y corrección atmosférica (Young et al., 2017).

Se realizó el proceso de conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA) para asegurar que los datos de las imágenes Landsat 8 LDCM sean cuantificados y calibrados de manera precisa. Estos productos, proporcionados por el USGS EROS CENTER, son una representación cuantificada y escalada de los niveles digitales (ND) que corresponden a la información capturada por los sensores OLI y TIRS (Ariza, 2013). Estos datos, provenientes de las bandas de ambos sensores, se presentan en formato no cifrado de 16 bits, lo que proporciona una alta resolución y detalle en la información capturada. Sin embargo, para facilitar la interpretación y análisis, estos valores pueden ser reescalados para representar reflectancia y radiancia en el techo de la atmósfera TOA. Esto se logra utilizando los coeficientes radiométricos suministrados en el archivo de metadatos MTL.txt, lo que

asegura una interpretación precisa y consistente de los datos. Este proceso de conversión permite comparar y analizar los datos de manera más efectiva, proporcionando una base sólida para la investigación y el monitoreo.

Figura 6 Datos para correcciones de las imágenes.

```

RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2238E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2532E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1548E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7382E-03
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9593E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4820E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 4.9952E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1021E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3290E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.19172
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.66107
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.74164
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.69100
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.79646
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.41011
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.49760
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.10481
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.64513
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.10000

```

Fuente: Datos suministrados en el archivo de metadatos MTL.txt

Con la siguiente formula se realiza el reescalamiento a los valores de reflectancia.

Ecuación 1

$$L\lambda = ML Q \text{ cal} + AL$$

Donde:

$L\lambda$ = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μ m))

ML = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

AL = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)

Q cal = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Con la siguiente fórmula se realizó el reescalamiento a los valores de reflectancia y o radiancia TAO.

También se realizó la conversión a reflectancia TOA es un paso crucial en el procesamiento de los datos del sensor OLI de Landsat. Permite obtener valores de reflectancia en el techo de la atmósfera, lo que resulta fundamental para la precisión de las mediciones. Para llevar a cabo esta conversión, se utilizan los coeficientes de reflectancia reescalados, los cuales son proporcionados en el archivo de metadatos MTL. Esta metodología garantiza que los datos se interpreten de manera adecuada y consistente. La ecuación utilizada en este proceso es una herramienta matemática esencial que facilita la transformación de los niveles digitales (ND) en valores de reflectancia. Esta conversión es esencial para aplicaciones que requieren mediciones precisas de reflectancia en el contexto de estudios ecológicos y de monitoreo. Al llevar a cabo este proceso, se asegura la confiabilidad y utilidad de los datos para su posterior análisis y aplicación en investigaciones científicas.

Ecuación 2

$$P\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Donde:

$P\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que $P\lambda'$ no contiene una corrección por el ángulo solar.

M_p = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

A_p = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x , donde x es el número de la banda).

Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen. (Ariza, 2013)

La conversión a reflectancia TOA con corrección angular es un procedimiento esencial para obtener mediciones precisas de la reflectancia de una superficie terrestre captada por un sensor espacial. Este cálculo se ve influenciado tanto por las condiciones atmosféricas como por el ángulo desde el cual se observa la escena. Al tener en cuenta estos factores, se obtiene una estimación más precisa y representativa de la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA. La corrección para el ángulo solar es particularmente importante, ya que compensa las variaciones en la radiación solar incidente debido a la inclinación del sol en relación con la superficie terrestre. Esto asegura que las mediciones reflejen con mayor fidelidad las características de la cubierta, permitiendo un análisis más preciso y confiable de los datos satelitales.

Ecuación 3

$$P_{\lambda} = P_{\lambda'} / \cos(\theta_{sz}) = P_{\lambda'} / \sin(\theta_{se})$$

Donde:

P_{λ} = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

θ_{se} = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

θ_{sz} = Es el ángulo solar zenith local.

Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse como se indica en la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$\Theta_{sz} = 90^{\circ} - \Theta_{se}$$

6.4 Cálculo de índices espectrales NDWI y BSI

El NDWI, o Índice Diferencial de Agua Normalizado, es una herramienta valiosa en el análisis de imágenes satelitales para la detección de recursos hídricos. Se utilizó este índice, para identificar masas de agua, y evaluar la humedad en el suelo, esto resulta esencial para identificar la huella que deja el río a lo largo de la cuenca. Además, el NDWI facilita la delimitación precisa de cuerpos de agua, como lagos, ríos y embalses.

En nuestras opciones disponibles de las imágenes encontramos combinaciones de bandas NIR-Verde, NIR-SWIR, SWIR-Verde. Todas ellas pueden ser gestionadas a través de los Sistemas de Información Geográfica y empleando las correspondientes imágenes aéreas provenientes de satélites o drones dotados con sensores multiespectrales (Gis&Beers - 2016, 2017)

En este caso, la relación de bandas multiespectrales a analizar estará basada en la banda NIR- Near InfraRed (o infrarrojo cercano) y la banda SWIR- Short Wavelength InfraRed (infrarrojo corto). En la Ecuación 5 se presenta la relación entre sus diferencias y sumas:

Ecuación 5

$$\text{NDWI (Landsat 8)} = (B3 - B5) / (B3 + B5)$$

El Índice de Suelo Desnudo BSI, proporcionó información sobre la cantidad de suelo expuesto en un área determinada para este caso se quiere evaluar los sedimentos transportados y depositados por el río. Este índice es especialmente útil en la monitorización de cambios en la cobertura del suelo, se calcula a partir de combinaciones específicas de bandas espectrales de las imágenes satelitales, lo que permite distinguir entre áreas cubiertas por vegetación y áreas donde el suelo está expuesto sin vegetación, en la Ecuación 6 se presenta la relación entre la fracción de suma de las bandas.

Ecuación 6

$$\text{BSI (Landsta 8)} = (B6 + B4) - (B5 + B2) / (B6 + B4) + (B5 + B2)$$

Los índices proporcionan un realce espectral sobre la cantidad de suelo expuesto y permiten identificar masas de agua en un área determinada, para evaluar y monitorear cambios en la cobertura del suelo al distinguir áreas con y sin vegetación, también la influencia del río en la cuenca y facilita la delimitación precisa del río.

6.5 Análisis multitemporal cualitativo de la dinámica fluvial

Para el análisis se tuvo en cuenta un área que abarcó la cuenca del río Guayuriba en diferentes fechas y condiciones meteorológicas las cuales parten desde el año 2017 al 2023, se realizó un preprocesamiento anteriormente descrito, de las imágenes para corregir distorsiones atmosféricas y georreferenciarlas a los datos geoespaciales existentes.

El análisis multitemporal de la dinámica fluvial abarcó la comparación de datos o imágenes de diferentes momentos para estudiar cambios a lo largo del tiempo. Para llevar a

cabo este análisis, primero se adquieren datos relevantes que cubren el período de interés. Posteriormente, se aplican correcciones para mejorar la calidad y consistencia de las imágenes. Se eligen índices espectrales como NDWI o BSI para resaltar características fluviales específicas, y se calculan para cada fecha de interés. Luego, se emplean herramientas GIS, en las cual consiste en realizar una digitalización de los márgenes del cauce por medio del índice NDWI y las zonas donde se depositaron sedimentos expuestos, en áreas de antiguas inundaciones y margen del río, a partir de estas características identificadas en las imágenes e índices espectrales se realiza una comparación con los años anteriores y posteriores esto se evidencia en los resultados.

7 Resultados y discusión

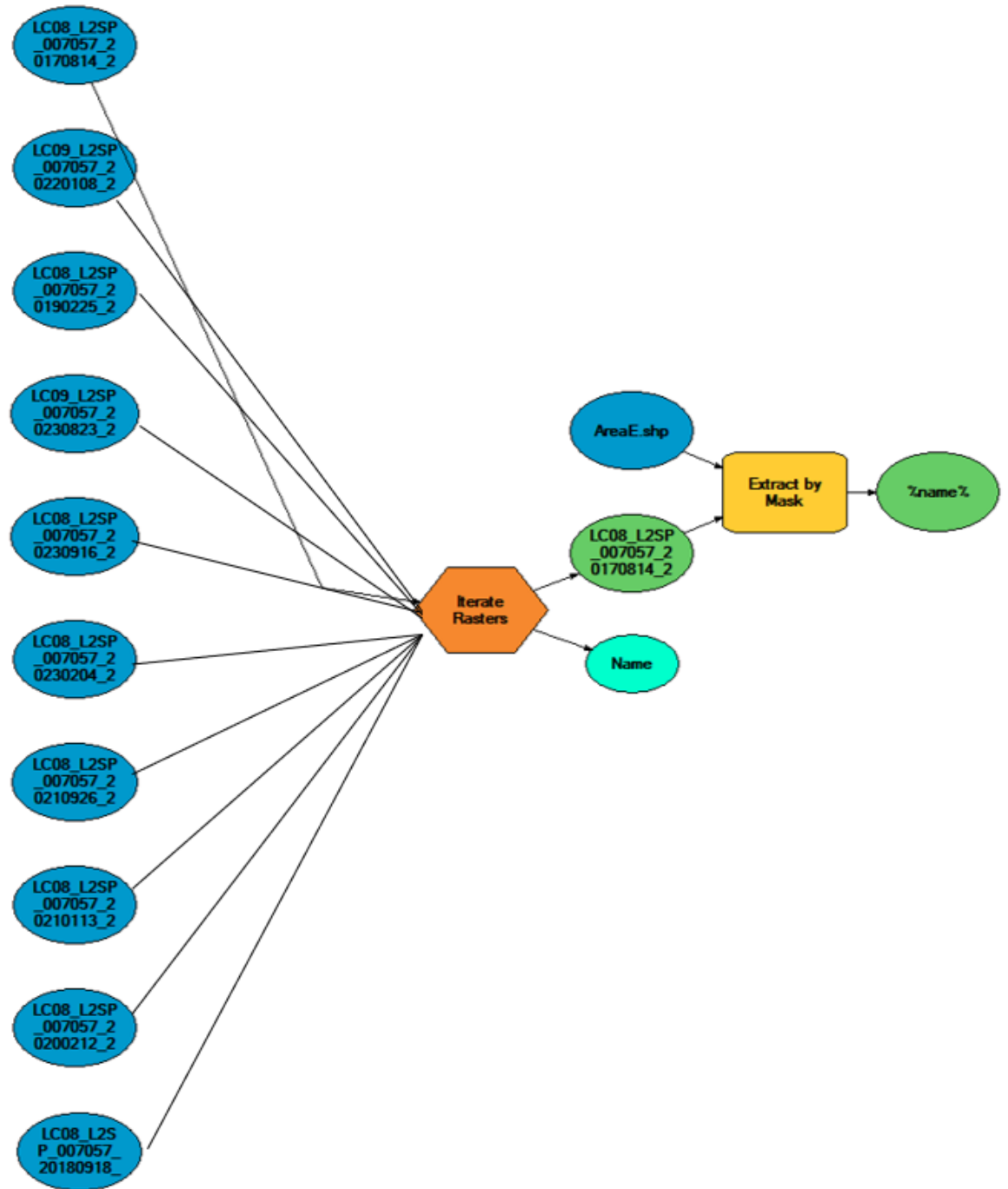
Se trabajaron múltiples imágenes para realizar una interpretación de la dinámica fluvial del río Guayuriba entre 2017 y 2023, se inició con la implementación de un riguroso proceso de preprocesamiento de las imágenes satelitales Landsat 8 y 9. Se realizaron correcciones radiométricas y geométricas para mejorar significativamente la calidad de las imágenes, y obtener niveles de reflectancia precisos. Estos niveles recalibrados proporcionaron una representación más fiel de la superficie terrestre, eliminando los efectos atmosféricos y permitiendo un análisis más preciso de los cambios en la dinámica fluvial.

Posterior a esto se calcularon índices espectrales relevantes, como el Índice de Suelo Desnudo (BSI) y el Índice de Agua Normalizado (NDWI), que servirán como herramientas clave en la identificación de patrones de cambio y en la comprensión de las causas subyacentes del objeto de este estudio; a continuación, se muestran los resultados obtenidos en los diversos procedimientos descritos en la metodología.

7.1 Delimitación del área de estudio

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes satelitales, se implementó un Model Builder, diseñado para realizar el recorte de todas las imágenes de Landsat 8 y 9 correspondientes al área de estudio definida por un polígono de tipo shapefile, como se indica en la Figura 7.

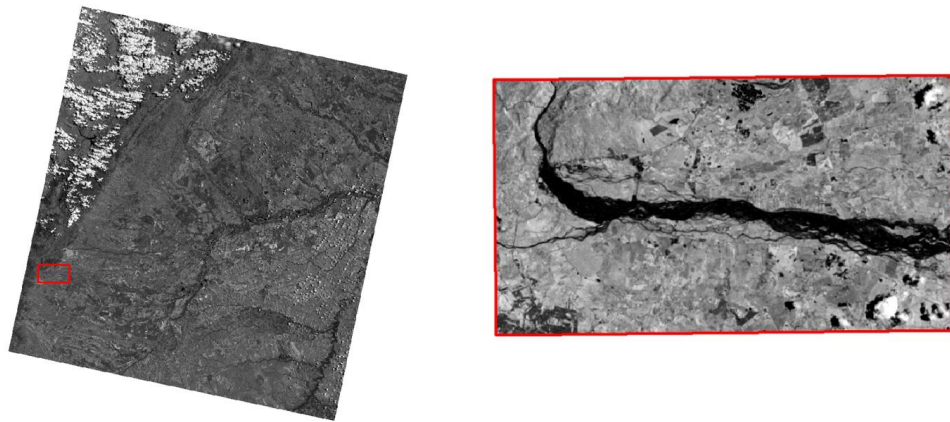
Figura 7 Esquema del modelo iterativo para cotar las bandas de cada temporalidad.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la imagen hacia la parte derecha, de color azul, se encuentran cargadas las carpetas las cuales contiene las bandas de la 1 a la 7 de cada año. En el centro de color naranja se encuentra la función Iterate Rasters, la cual permite automatizar el procesamiento de múltiples imágenes o capas raster de manera secuencial, conectado a la función extract by mask la cual genera a un corte a el raster a partir de un polígono tipo shp, en este proseo se obtuvieron las imágenes con el área determinada de estudio, esto permite un mayor manejo de la información y facilita su análisis.

Figura 8 Localización Geográfica área de estudio: Derecha escena completa, izquierda, imagen cortada, área de estudio, escala1:100000



Fuente: Elaboración propia.

7.2 Proceso de corrección atmosféricos

Se hicieron Preprocesamiento de imágenes Landsat para correcciones TOA con corrección angular y obtener niveles de reflectancia, según el gua Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM creado por el IGAC, el cual se llevó acababa con el diseño

de un Model Builder, este permitió realizar la corrección de manera automática facilitado el proceso, a continuación, se presenta el diseño de modelo.

Figura 9 Diseño de modelo para corrección Tao



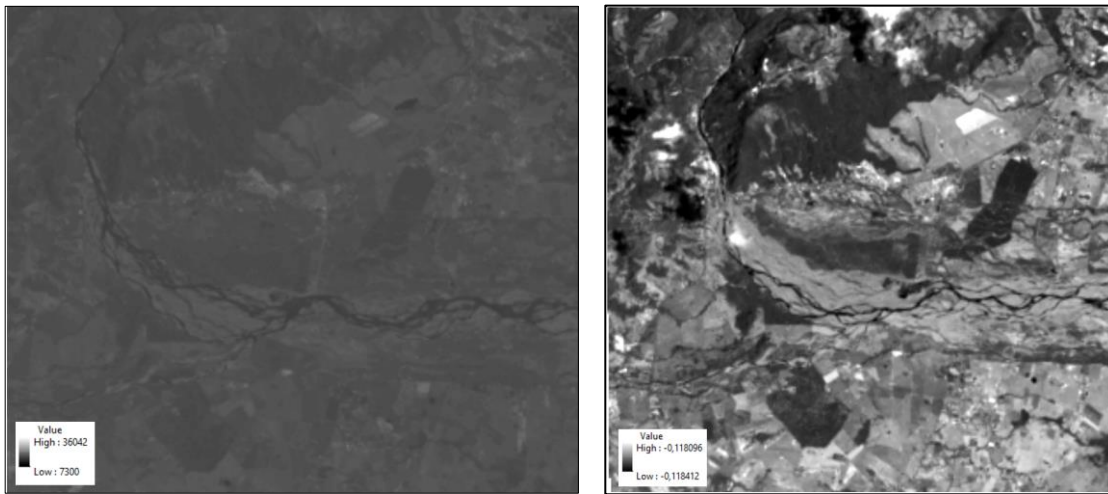
Fuente: Resultados del estudio.

Con el anterior modelo se lleva a cabo la corrección de Radiación de la Parte Superior de la Atmósfera TOA, que ajusta los valores de píxeles teniendo en cuenta la interacción de la radiación solar con la atmósfera. este proceso elimina los efectos atmosféricos que podrían distorsionar la información de la superficie terrestre.

Luego, se convierten los valores TOA a niveles de reflectancia, que proporcionan una medida más precisa de la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre,

independientemente de las condiciones atmosféricas en el momento de la captura de la imagen, a continuación, se muestra un ejemplo de la corrección de la banda 7.

Figura 10 Imagen de la banda 7, izquierda, banda si corrección, derecha, banda corregida a niveles de reflectancia.

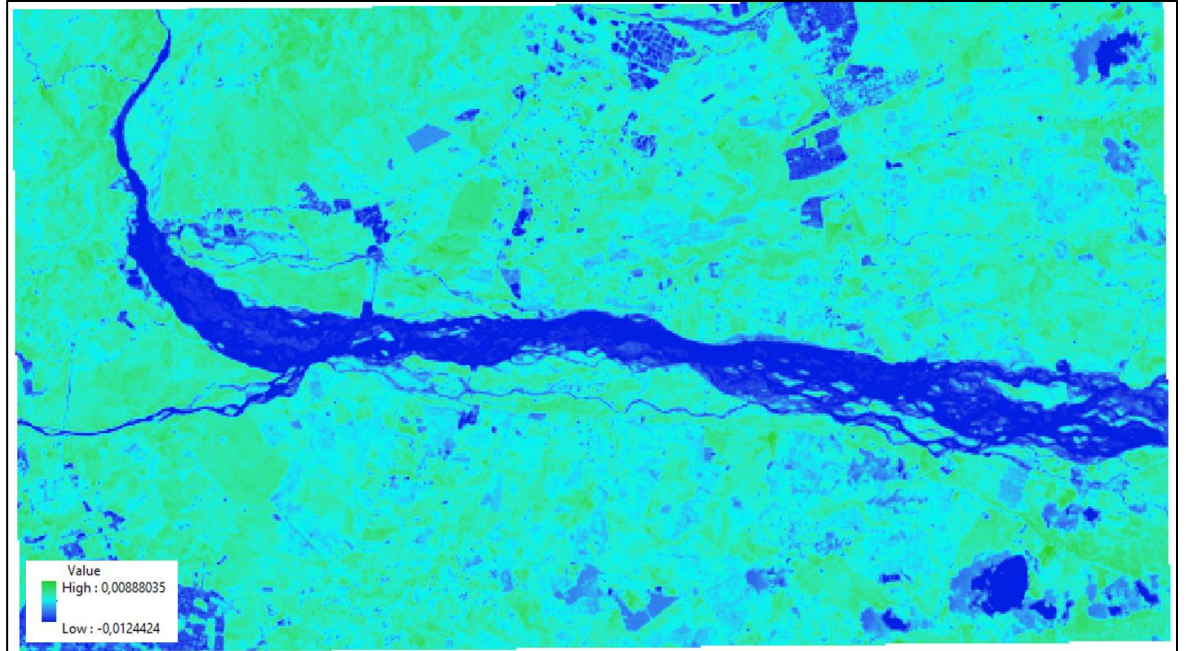


Fuente: Resultados del estudio.

7.3 Cálculo de índices espectrales

El NDWI, o Índice Diferencial de Agua Normalizado, se utilizó para identificar masas de agua del cauce natural y las zonas donde la humedad en el suelo es alta, este realce muestra claramente en que sectores confluye el agua y pronostica los posibles flujos naturales que tomaría el cauce, esto resulta esencial para identificar la huella que deja el río a lo largo de la llanura de inundación. Además.

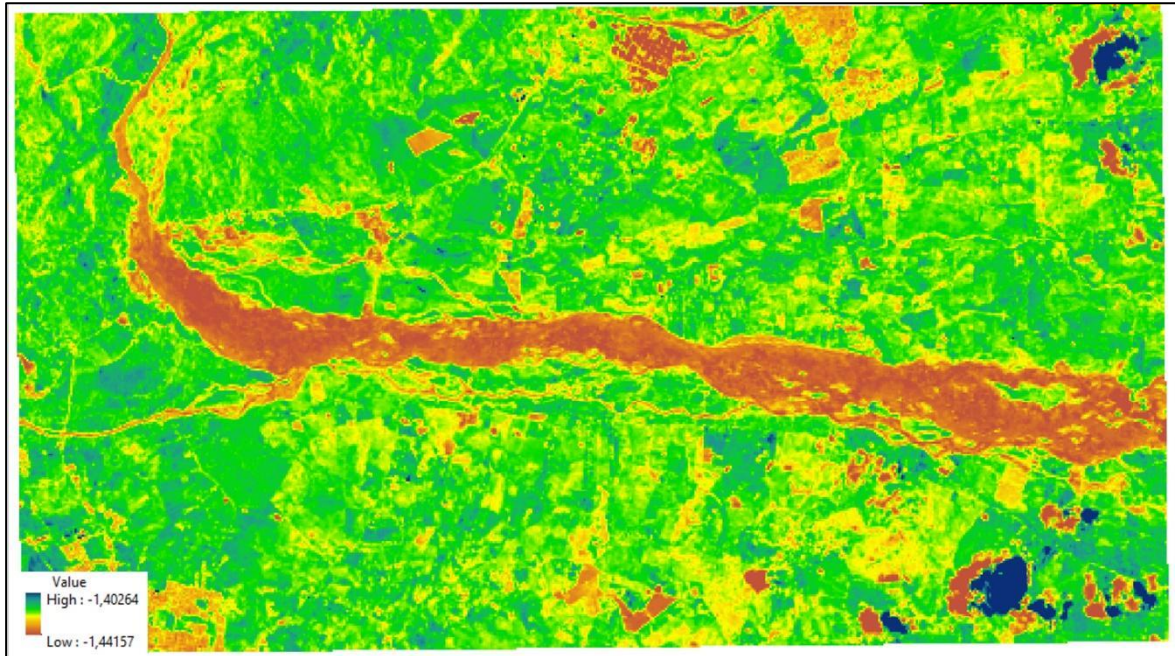
Figura 11 NDWI de la zona de estudio del año 2018, se observa realce de las zonas húmedas en el cauce. 1:25000.



Fuente: Resultados del estudio.

El Índice de Suelo Desnudo BSI, proporcionó información sobre la cantidad de suelo expuesto en un área determinada para este caso se evaluaron los sedimentos transportados y depositados por el río, este índice nos muestra las zonas que dejó depositado en épocas anteriores, como cauces, terrazas o playas donde alguna vez subió el nivel del río y quedaron depositados, y se observa el contraste entre áreas cubiertas por vegetación y áreas donde el suelo está expuesto sin vegetación.

Figura 12 BSI de la zona de estudio del año 2018, en color verde zonas de vegetación, color rojo suelo expuesto sin vegetación. 1:25000.



Fuente: Resultados del estudio.

A manera general la implementación en el análisis multitemporal con ayuda de los índices espectrales fueron determinantes en evaluación de la dinámica fluvial de los últimos 7 años en la zona de estudio, proporcionaron un enfoque analítico más detallado y preciso sobre la zona de interés. Al resaltar las variaciones en la vegetación, humedad y suelo expuesto, los índices espectrales permitieron un mejor entendimiento de los cambios en la dinámica fluvial a lo largo del período de estudio. Esto se traduce en una capacidad mejorada para identificar patrones, tendencias y eventos significativos en el entorno fluvial, lo que a su vez facilita la realización de un análisis multitemporal más robusto y fundamentado en datos analíticos.

7.4 Análisis multitemporal cualitativo de la zona de estudio

Durante el estudio, se llevó a cabo un análisis multitemporal abarcando el período comprendido entre 2017 y 2023, a partir de los índices propuestos, esto mostró una alta eficiencia, realzando detalles y mostrando la presencia y variaciones en el contenido de agua y sedimentos expuestos en cada temporalidad a lo largo de diferentes intervalos temporales. Al aplicar este índice en diversas fechas, se pudo detectar y cuantificar cambios significativos en la distribución y la dinámica natural que presenta el río en su cauce. Este enfoque multitemporal proporcionó una visión dinámica y detallada de la evolución del entorno fluvial a lo largo de los años, permitiendo una comprensión más completa de los procesos hidrológicos y una base sólida para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y planeación de las posibles afectaciones que este tenga con el entorno antrópico de su rivera.

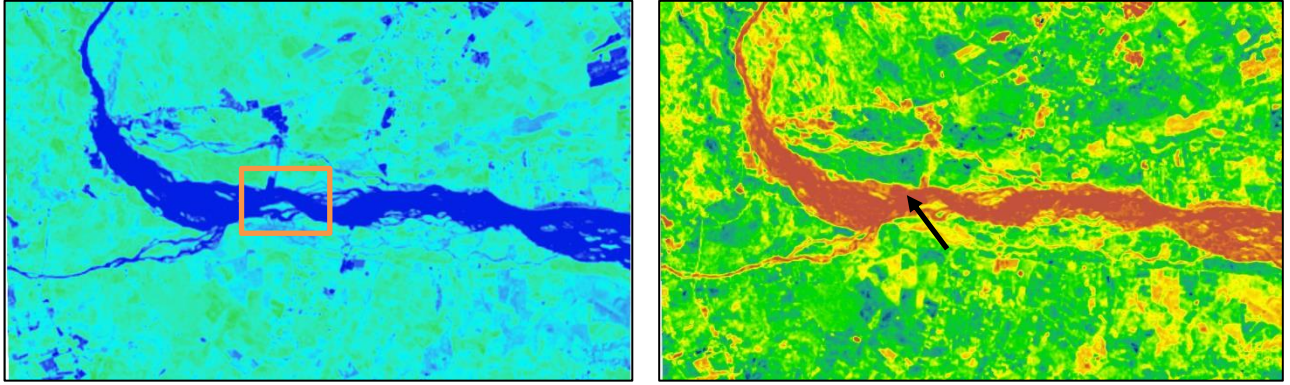
A continuación, se detalla esta evaluación por cada año a partir de la información obtenida y procesada, empezando del año 2017 y finalizando con el año 2023, el cual para este último se tomaron dos escenas de diferente temporalidad el primero del mes de febrero y el último del mes de septiembre.

Análisis para el año 2017

En el año 2017, se observa un ligero estrechamiento en la confluencia del río con un afluente. Este fenómeno puede ser indicativo de una variación en la tasa de sedimentación en esa área específica. Posiblemente, condiciones hidrogeomorfológicas locales contribuyeron a la acumulación de sedimentos en este punto, lo que a su vez redujo el ancho

del cauce. Además, es importante considerar que cambios en los patrones de precipitación y en el flujo de agua de los afluentes pueden haber influenciado este fenómeno.

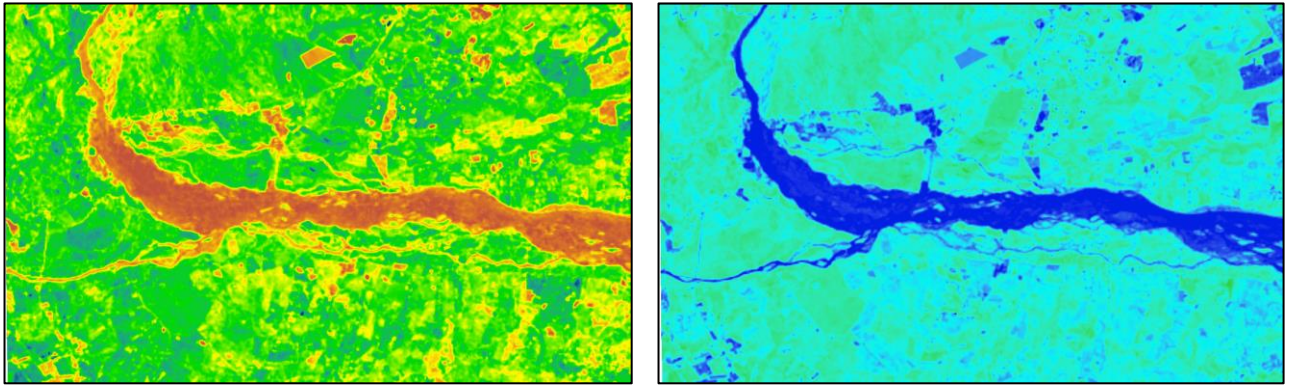
Figura 13 NDWI 2017 y BSI 2017, escala 1:25000



Análisis para el año 2018

En el año siguiente, 2018, se evidencia una ampliación del cauce en el mismo sector previamente mencionado. Esta expansión podría estar relacionada con un incremento en el flujo de agua proveniente del afluente, posiblemente como respuesta a condiciones climáticas o hidrológicas particulares en ese período. También es plausible que procesos de erosión hayan contribuido a esta expansión, removiendo sedimentos y ampliando el cauce, al igual se resalta que el afluente presenta una mayor área de acumulación de sedimentos en la desembocadura del río.

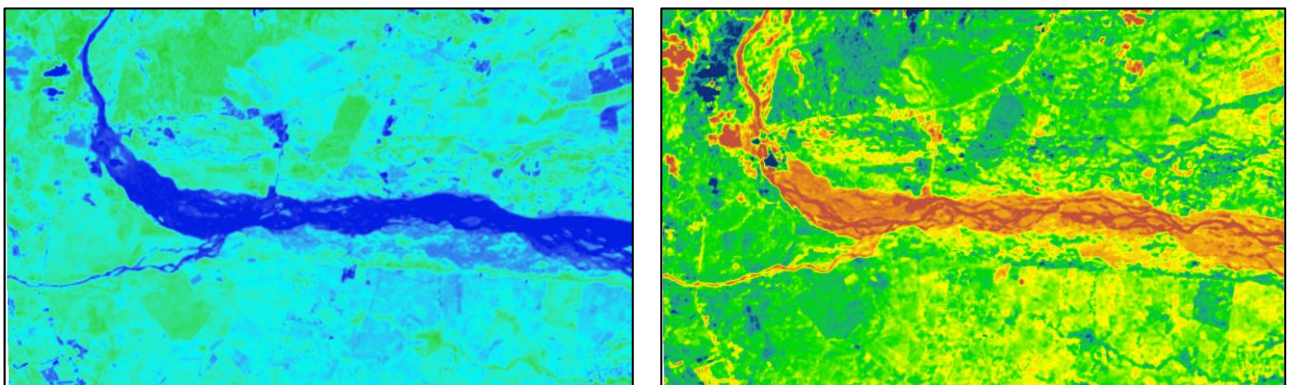
Figura 14 NDWI y BSI 2018, escala 1:25000



Análisis para el año 2019

El año 2019 destaca por la formación de una isla de tamaño considerable en el abanico fluvial. Este fenómeno indica un alto nivel de sedimentación en esa zona específica. Es probable que condiciones hidrodinámicas y de sedimentación, posiblemente influenciadas por eventos de precipitación intensa, hayan propiciado la acumulación de sedimentos y, por ende, la formación de la isla, esta acumulación de gran cantidad de material de arrastre provoca un cambio de la dinámica del río.

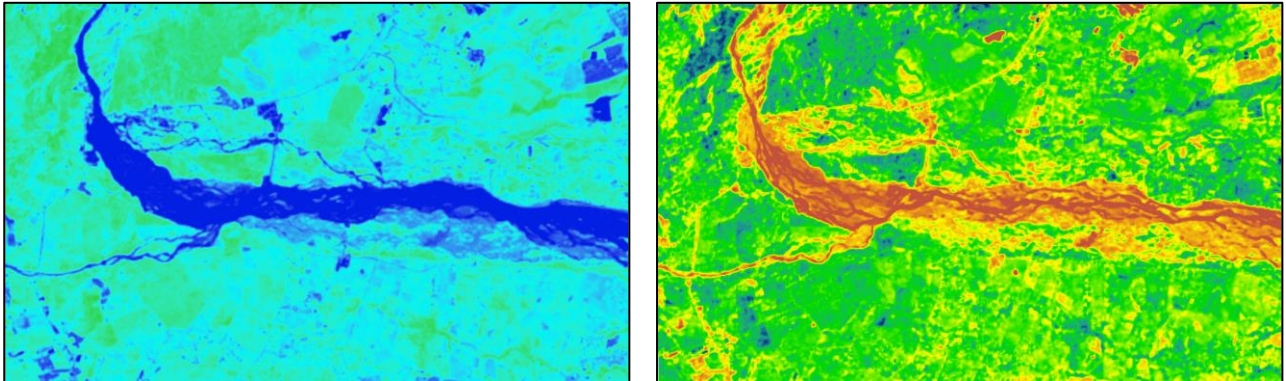
Figura 15 Imágenes NDWI y BSI 2019, escala 1:25000



Análisis para el año 2020

En 2020, se observa una erosión en el costado izquierdo del cauce. Este proceso puede estar asociado a cambios en la dinámica del flujo de agua o a condiciones geomorfológicas que favorecieron la erosión de ese sector, posiblemente la formación por acumulación de sedimentos del islote provocó un cambio en la dirección del agua. La erosión probablemente resultó en una ampliación del cauce, alterando la geometría del río y creando socavación.

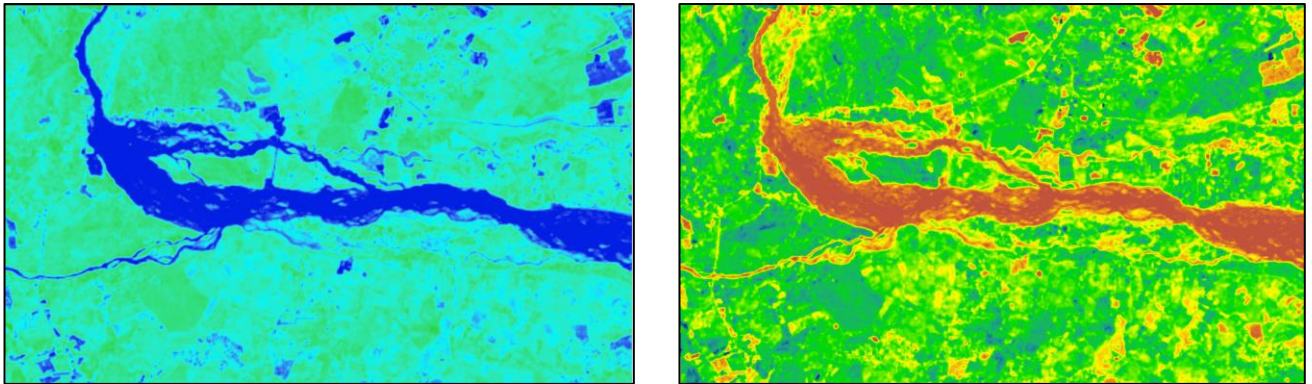
Figura 16 NDWI y BSI 2020, escala 1:25000



Análisis para el año 2021

La imagen de 2021 muestra un cambio drástico, con la formación rápida de un canal extendido que transporta una gran cantidad de agua y sedimentos. Esto indica un evento hidrológico significativo, posiblemente asociado a precipitaciones intensas o eventos de inundación. La formación de este canal puede tener un impacto sustancial en la dinámica fluvial y en la distribución de agua en la llanura de inundación.

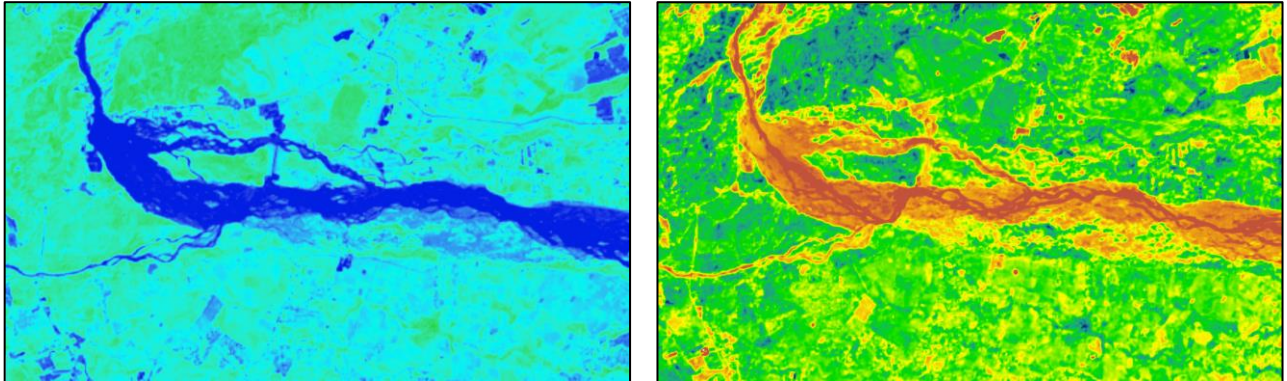
Figura 17 NDWI y BSI 2021, escala 1:25000



Análisis para el año 2022

Para el año 2022, se evidenció un impacto significativo en el entorno debido al canal que se formó. La gran cantidad de sedimentos y material arrastrado por el agua ha provocado erosión en los suelos circundantes. Esta erosión puede tener consecuencias importantes, como la pérdida de suelo fértil y la alteración de la topografía local. Además, los sedimentos arrastrados por el canal han invadido áreas antrópicas en el sector, lo que puede resultar en problemas para las comunidades y la infraestructura que se encuentre en esta zona.

Figura 18 NDWI y BSI 2022, escala 1:25000



En las imágenes correspondientes al mes de marzo de 2023, se observa claramente una notable acumulación de sedimentos. Estos sedimentos cubren una extensa área, dejando expuestas zonas que normalmente estarían sumergidas o cubiertas por agua. Este fenómeno es resultado de periodos de lluvias intensas, lo que ha llevado a un aumento considerable en el flujo de agua y, por ende, en el arrastre de sedimentos. Esta situación tiene implicaciones importantes para la dinámica fluvial y el ecosistema de la zona, así como para posibles impactos en comunidades y actividades humanas que puedan estar presentes en el área afectada.

Figura 19 NDWI y BSI 2023-02, escala 1:25000

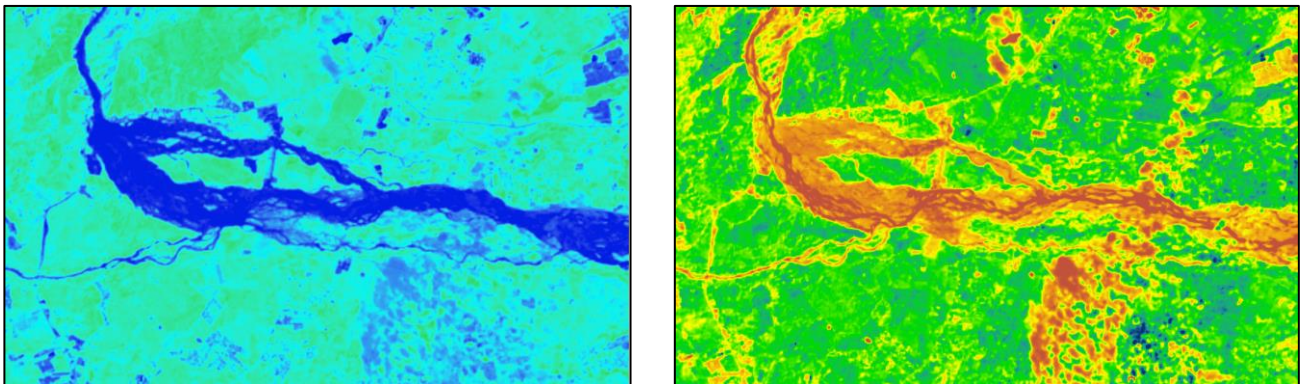
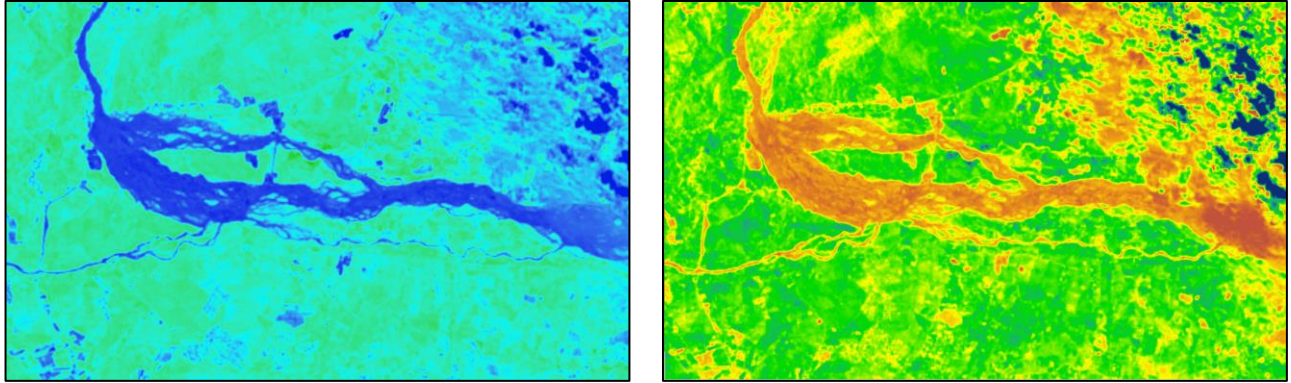


Figura 20 NDWI y BSI 2023-02, escala 1:25000



Este estudio revela una notable evolución en la dinámica del río Guayuriba durante el período comprendido entre 2019 y 2023. Uno de los cambios más prominentes es la formación de un extenso canal en el lado derecho del río aguas arriba. Este rasgo representa una transformación significativa en la morfología fluvial, indicando un proceso dinámico de ajuste y redistribución de caudales.

Esta apertura de canal puede estar asociada a diversos factores, como variaciones en los regímenes de precipitación, procesos geomorfológicos locales o influencias antropogénicas. La presencia de este nuevo canal implica un rediseño en la configuración del lecho fluvial, lo que a su vez puede tener implicaciones importantes para el ecosistema circundante y las comunidades que dependen de este recurso hídrico.

Este fenómeno destaca la importancia de realizar análisis multitemporales para comprender la dinámica fluvial y sus potenciales impactos en el entorno. Asimismo, subraya la necesidad de una vigilancia continua y monitoreo de los sistemas fluviales, especialmente en áreas susceptibles a cambios significativos.

8 Conclusiones

La obtención y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 para las fechas de interés (2017 y 2023) en el área del río Guayuriba y su llanura de inundación resultó fundamental para este estudio. La aplicación de correcciones radiométricas y geométricas fue esencial para mejorar la calidad de las imágenes y garantizar la fiabilidad de la información obtenida. Estos procesos permitieron una interpretación más precisa y detallada de los cambios en la dinámica fluvial a lo largo del tiempo. Los índices espectrales generados a partir de estas imágenes proporcionaron información valiosa sobre la presencia de agua, humedad del suelo y la exposición de suelo desnudo, aspectos cruciales para comprender la interacción entre el río y su entorno. En última instancia, la combinación de la tecnología satelital con técnicas de procesamiento avanzadas ha determinado la comprensión de la dinámica fluvial en la cuenca del río Guayuriba.

El cálculo de índices espectrales como el Índice de Suelo Desnudo (BSI) y el Índice de Agua Normalizado (NDWI) a partir de las imágenes satelitales fue esencial para este estudio. Estos índices proporcionan una valiosa herramienta para detectar y analizar cambios en la dinámica fluvial. El BSI permitió cuantificar la cantidad de suelo expuesto, ofreciendo información crítica sobre los sedimentos transportados por el río. Por otro lado, el NDWI facilitó la identificación precisa de masas de agua y evaluación de la humedad del suelo, aspectos clave para comprender la interacción entre el río y su entorno. La aplicación de estos índices en el análisis multitemporal contribuyó significativamente a una comprensión más profunda y detallada de la dinámica fluvial en la cuenca del río Guayuriba. Esto subraya la importancia y eficacia de los índices espectrales en la monitorización y gestión de

ecosistemas fluviales, y destaca su relevancia en la toma de decisiones ambientales informadas.

El análisis cualitativo de las imágenes y los índices espectrales fue crucial para identificar patrones de cambio y comprender las razones subyacentes en la dinámica fluvial. Esta evaluación detallada permitió discernir tendencias y eventos significativos en la zona de estudio. Además, proporcionó una visión más profunda de cómo factores como la precipitación, la vegetación y la topografía influyen en la evolución del río Guayuriba y su llanura de inundación. Este enfoque cualitativo enriqueció la comprensión global de los procesos fluviales.

9 Recomendaciones

Teniendo en cuenta el alcance del proyecto y los resultados obtenidos, se plantean algunas recomendaciones con el fin de ahondar y cuantificar los procesos naturales que conlleva la dinámica fluvial de las cuencas hidrológicas del sector, y se exponen a continuación.

Ampliación Temporal, se recomienda extender el período de análisis a un rango aún más amplio para capturar tendencias a largo plazo y eventos climáticos extremos que puedan tener un impacto significativo en la dinámica fluvial. Incorporación de datos climáticos, Integrar datos climáticos detallados, como patrones de precipitación y temperatura, para evaluar su influencia directa en la dinámica fluvial y en la distribución de agua en la llanura de inundación.

Utilizar modelos hidrológicos para simular el flujo del río y prever posibles escenarios futuros en respuesta a cambios ambientales y climáticos que puedan afectar las zonas antrópicas circunvecinas. Integración de tecnologías emergentes, como la teledetección de alta resolución y la inteligencia artificial, para mejorar la precisión y la eficiencia en el análisis de imágenes satelitales.

10 Referencias

- Ariza, A. (2013). *Productos LDCM-Landsat 8*.
- Carmen Eliana Martínez León. (2023). Evaluación De Susceptibilidad Por Inundacion Ante El Aumento De Caudal Del Rio Guayuriba Mediante Análisis De Sensores Remotos Y La Extracción De Materiales De Arrastre Como Medida De Control. *Trabajo de Grado*.
- CONAE. (2016). *Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI*.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri). (2023, January 3). *Extracto por máscara (analista espacial)*. <https://Pro.Arcgis.Com/En/pro-App/Latest/Tool-Reference/Spatial-Analyst/Extract-by-Mask.Htm>.
- Esri, E. S. R. I. I. (2023). Referencia de la herramienta de geoprocésamiento ArcGIS. <https://Www.Esri.Com/En-Us/Arcgis/Products/Arcgis-pro/Overview>.
- Gis&Beers - 2016. (2017, November 5). *Cálculo del índice NDWI*. <https://Www.Gisandbeers.Com/Calculo-Del-Indice-Ndwi-Diferencial-de-Agua-Normalizado/>.
- Suwanlee, S. R., Keawsomsee, S., Pengjunsang, M., Homtong, N., Prakobya, A., Borgogno-Mondino, E., Sarvia, F., & Som-ard, J. (2023). Monitoring Agricultural Land and Land Cover Change from 2001–2021 of the Chi River Basin, Thailand Using Multi-Temporal Landsat Data Based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/rs15174339>
- Varón Gutiérrez, S. D. y V. C. Germán. (2019). Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 152–174.
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ecy.1730>