



Análisis multitemporal del espejo de agua en la ciénaga de Zapatosa ubicada en los departamentos del Cesar y Magdalena, durante el periodo 2015 – 2017 y 2021.

Nubia Emmily Reyes Mendoza

Código: 11792218978

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Bogotá D.C., Colombia

2023

Análisis multitemporal del espejo de agua en la ciénaga de Zapatosa ubicada en los departamentos del Cesar y Magdalena, durante el periodo 2015 – 2017 y 2021.

Nubia Emmily Reyes Mendoza

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Ambiental

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Bogotá, Colombia

2023

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|-----------|
| 1. Introducción..... | 7 |
| 2. Marco Teórico y Estado del Conocimiento | 10 |
| 2.1 Marco Teórico | 10 |
| 2.2 Estado del conocimiento | 12 |
| 3. Objetivos..... | 16 |
| 3.1 Objetivo General | 16 |
| 3.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 4. Metodología..... | 17 |
| 4.1 Área de estudio..... | 17 |
| 4.2 Descarga y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 | 18 |
| 4.3 Procesamiento de Imágenes | 20 |
| 5. Resultados y Discusión | 27 |
| 6. Conclusiones..... | 36 |
| 7. Recomendaciones..... | 37 |
| 8. Referencias | 38 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Localización complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: Propia | 17 |
| Figura 2 Zona de trabajo - Path 008 - Row:054. Fuente: https://earthexplorer.usgs.gov/ .. | 19 |
| Figura 3 Reportes considerados. Fuente: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov | 19 |
| Figura 4 Procesamiento de las imágenes multiespectrales | 20 |
| Figura 5 Procesamiento y recorte de las imágenes para época de lluvias | 21 |
| Figura 6 Procesamiento y recorte de las imágenes para época seca | 21 |
| Figura 7 Imágenes con mejor resolución – Pansharpen para época de lluvias | 22 |
| Figura 8 Imágenes con mejor resolución – Pansharpen para época seca | 22 |
| Figura 9 Recorte de nubes para las imágenes en época de lluvias..... | 23 |
| Figura 10 Recorte de nubes para las imágenes en época seca. | 23 |
| Figura 11 Model maker para cálculo de correlación y covarianzas..... | 24 |
| Figura 12 Mejor combinación de bandas considerando OIF para época de lluvias | 24 |
| Figura 13 Mejor combinación de bandas considerando OIF para época seca | 25 |
| Figura 14 Selección de polígonos de muestra de cuerpos de agua para crear las firmas espectrales | 25 |
| Figura 15 Espejo de agua en épocas de lluvia – 11 junio de 2015. | 27 |
| Figura 16 Espejo de agua en épocas de lluvia – 04 julio de 2017. | 28 |
| Figura 17 Espejo de agua en épocas de lluvia – 29 junio de 2021. | 28 |
| Figura 18 Variación para los periodos de lluvia | 29 |
| Figura 19 Espejo de agua en época seca – 06 diciembre de 2015. | 29 |
| Figura 20 Espejo de agua en época seca – 26 febrero de 2017..... | 30 |
| Figura 21 Espejo de agua en época seca – 21 febrero de 2021..... | 30 |
| Figura 22 Variación para los periodos secos | 31 |
| Figura 23 Variación para los periodos estudiados – época de lluvias | 31 |
| Figura 24 Comparativo espejo de agua en épocas de lluvia - años 2015 – 2017 y 2021. .. | 32 |
| Figura 25 Variación para los periodos estudiados – época seca. | 33 |
| Figura 26 Comparativo espejo de agua en época seca - años 2015 – 2017 y 2021. | 33 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Características de las imágenes seleccionadas para el análisis | 18 |
|--|----|

Resumen

Teniendo en cuenta la gran importancia de los ecosistemas de humedales en el territorio Colombiano, así como la problemática ambiental y social que se ha venido desencadenando a lo largo de los últimos años en las zonas contiguas a los espejos de agua, el presente proyecto se enfoca en el análisis multitemporal y espacial del Complejo Cenagoso Zapatosa, de los departamentos del Cesar y Magdalena, realizado para las épocas de lluvia y secas de los periodos 2015 – 2017 y 2021, cuyo ecosistema es característico del Caribe Colombiano y se considera como uno de los humedales más importantes del país; sin embargo, se ha visto afectado considerablemente por las intervenciones antrópicas que alteran su capacidad para regular caudales que no permiten el normal flujo de agua entre las corrientes y las ciénagas, generando así en época de lluvias inundaciones en centros poblados, y en épocas de sequía desabastecimiento de agua para desarrollar las actividades propias de la región.

La metodología utilizada emplea el uso de imágenes satelitales Landsat 8 las cuales son procesadas mediante los software ERDAS IMAGINE y ArcGis Pro, identificando los espejos de agua en los periodos definidos, y realizando un análisis comparativo para cada época, donde se evidencia en el año 2017 un incremento considerable con relación al año 2015 y una leve reducción en el año 2021 con relación al periodo analizado inmediatamente anterior, teniendo para la época de lluvias un área de 34.682,17 ha en el año 2015, es decir un 26,25% del total del área evaluada del CCZ, en el año 2017 alcanzó un área de 50.760,11 ha correspondientes al 38,42% del área de estudio y para el año 2021 se contó con 46.646,81 ha proporcional al 35,30% del área del CCZ; de igual forma para la época seca se obtuvo para el año 2015 un área de 29.768,26 ha correspondientes al 21,88% del área evaluada del CCZ, para el año 2017 con un 27,26% del área de interés representada en 37.084,95 ha y finalmente se alcanzó un área de 34.285,95 ha para el año 2021 correspondientes al 25,20% del área considerada para esta época.

Palabras Clave:

Imágenes Satelitales Landsat 8, Análisis Multitemporal, Complejo Cenagoso, Humedales, Detección de cambios.

Abstract

The “Complejo Cenagoso Zapatosa” marshes in the departments of Cesar and Magdalena are considered to be one of the most important wetlands in Colombia. Due to environmental and sociological problems which have been unleashed upon the region over the last years it has been considerably affected by anthropoid interventions that alter its capacity to regulate its water flows. The implications of those changes are water shortages during times of drought and floodings during rainy seasons in populated areas. This thesis focuses on the multi temporal and spatial analysis of the Zapatosa Cenotage Complex. The analysis is carried out for the dry seasons between 2015 and 2017 as well as for the dry season of 2021.

The methodology used for this thesis employs the use of Landsat 8 satellite images which are processed using ERDAS IMAGINE and ArcGis Pro software. The processed data is used to identify the marshes in the defined periods and to perform a comparative analysis for each period.

A considerable increase is evident in the year 2017 compared to 2015 and a slight reduction in the year 2021 compared to the immediately preceding period analyzed, having for the rainy season an area of 34. 682.17 ha in 2015, i.e. 26.25% of the total evaluated area of the CCZ, in 2017 it reached an area of 50. 760.11 ha corresponding to 38.42% of the study area and for the year 2021 it had 46,646.81 ha proportional to 35.30% of the CCZ area; likewise for the dry season it obtained for the year 2015 an area of 29. 768.26 ha corresponding to 21.88% of the evaluated area of the CCZ, for the year 2017 with 27.26% of the area of interest represented in 37,084.95 ha and finally an area of 34,285.95 ha was reached for the year 2021 corresponding to 25.20% of the area considered for this time.

Keywords:

Landsat 8 Satellite Images, Multitemporal Analysis, Surface water, Wetlands, Change detection.

1. Introducción

El agua es un componente esencial de los ecosistemas para el desarrollo sostenible de la vida en la tierra. Sustenta la variación climática y equilibra los ecosistemas, los ciclos del carbono, etc. Esto es importante igualmente para los humanos como para otras formas de vida. Su presencia conduce al crecimiento de bosques y pastizales, o viceversa, mientras que su exceso o deficiencia puede provocar cambios extremos en los usos del suelo y desastres. Por lo anterior, la identificación de cuerpos de agua es considerado un proceso esencial en la investigación científica y de ingeniería (Acharya et al., 2016).

Las ciénagas o marismas son ecosistemas de aguas tranquilas asociadas a ríos y sus llanuras aluviales, pueden ser de agua dulce o salada y proporcionan hábitat para insectos, aves, pequeños mamíferos, anfibios y algunas especies acuáticas (Porto & Gardey, 2009), suministrando alimento y refugio para el crecimiento poblacional, específicamente para especies de peces (Cruz Santos et al., 2011).

La identificación de los espejos de agua se puede utilizar de diversas maneras, como evaluación de áreas de agua (Rover et al., 2012), demarcación de llanuras aluviales o regiones inundadas (Jain et al., 2005), inventarios de humedales (Rebelo et al., 2009), y detección de cambios (Rokni et al., 2014); además la disponibilidad de agua ayuda en la estimación del riego para tierras agrícolas, la productividad, la energía hidroeléctrica, entre otros. La delimitación de las áreas de llanura aluvial puede ser esencial para la planificación del uso de la tierra y la prevención de daños futuros (Acharya et al., 2016).

A nivel ambiental, las ciénagas son reguladoras del ciclo hidrológico y se pueden considerar como zonas de amortiguamiento y protección contra de inundaciones. También aportan nutrientes de alto rendimiento que alimentan a diversas especies de la flora y fauna. Igualmente, forman corredores biológicos para el apareamiento, reproducción y alimentación de especies migratorias y riofílicas (La Economía de Las Ciénagas Del Caribe Colombiano, 2011).

La investigación en las últimas décadas sobre la transformación en las ciénagas se ha convertido cada vez en un tema más importante. El estudio del impacto del cambio climático en los ecosistemas, principalmente en el aumento del nivel del mar sobre las ciénagas, marismas o humedales costeros, la significativa evidencia de la importancia ecológica en general de las ciénagas y humedales, así como el aumento en la disponibilidad de herramientas y sistemas de monitoreo, y el avance en instrumentos de teledetección, están impulsando a la generación, contribución y difusión de estudios sobre cambios en las ciénagas y humedales (Camelo Mendoza et al., 2016).

El Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) está ubicado en los departamentos de Cesar y Magdalena, en la región caribe de Colombia entre la depresión Momposina y el delta del río Magdalena. Es alimentado por los ríos Cesar y Magdalena, y por caños como Largo, Jobito, Blanca Pía, Platanal, Las Vegas, Mochila San Pedro, Viejo y Tamalacué, además de

corrientes como La Mula, Anime Grande, Animito y Rodeo Hondo y quebradas como La Floresta, Alfaro y Quebradientes. Los municipios que conforman este complejo son Tamalameque, Curumaní, Chimichagua y Chiriguaná en el Cesar y El Banco en el Magdalena (Viloria, 2008).

El CCZ interviene a manera de reservorio, almacenando grandes cantidades de agua en época de lluvias y en época seca la devuelve a la depresión Momposina del Bajo Magdalena. El complejo cenagoso se estima que cuenta con una capacidad para almacenar aproximadamente 1.000 millones de metros cúbicos de agua los cuales provienen de los ríos Magdalena y Cesar, así como de corrientes menores (Rangel-Ch et al., 2013). Su capacidad para regular caudales durante épocas de elevadas precipitaciones se ha visto considerablemente afectada por las intervenciones antrópicas como la construcción de diques artificiales, y el taponamiento de quebradas y caños que no permiten el normal flujo de agua entre las corrientes y las ciénagas, generando así en época de lluvias inundaciones en centros poblados, y en épocas de sequía desabastecimiento de agua para desarrollar las actividades propias de la región. (La Economía de Las Ciénagas Del Caribe Colombiano, 2011).

Considerando lo anterior, las inmediaciones de la ciénaga Zapatosa no son ajenas a tales fenómenos y se encuentran constantemente inundadas debido a las alta precipitaciones en el territorio colombiano, provocando procesos de inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales (Viloria, 2008).

En las últimas décadas, se han venido desarrollando y perfeccionando varias metodologías de procesamiento de imágenes para extraer las características propias del agua a partir de datos satelitales; tal como las técnicas de banda única que utilizan un valor de umbral seleccionado para extraer dicha característica. Cabe indicar que se presentan comúnmente errores debido a la mezcla de píxeles de agua con los de diferentes tipos de cobertura (Du et al., 2012). El enfoque multibanda combina diferentes bandas de reflectancia para mejorar la extracción de las características del agua superficial (Du et al., 2012). Los métodos multibanda para clasificación utilizados para extraer las características de agua superficial son normalmente más precisos que los métodos de banda única (Du et al., 2012). La detección de cambios en el agua superficial generalmente se realiza extrayendo las características del agua individualmente de las imágenes satelitales de múltiples fechas, antes de hacer comparaciones para detectar sus cambios (Alesheikh et al., 2007; H. Xu, 2006; Zhang et al., 2009; Y. B. Xu et al., 2010).

Teniendo en cuenta el significativo crecimiento de la problemática ambiental (crisis del agua, variabilidad climática, conflictividad socio-natural, pobreza, entre otros), la complejidad de lograr un desarrollo sostenible aumenta. Los fenómenos de sequía e inundación son cada vez más frecuentes y la mayoría de las poblaciones se ven afectadas por esta amenaza y por sus condiciones de vulnerabilidad (Álvarez Londoño, 2017).

Debido a lo anterior, se propone realizar el presente estudio el cual tiene como propósito principal, la caracterización de los cambios en los espejos de agua del Complejo Cenagoso Zapatosa – CCZ, a partir de imágenes satelitales tanto en épocas de estiaje como en épocas

de altas precipitaciones, mediante procesamiento y análisis de imágenes Landsat 8, y con el fin de delimitar e identificar el cuerpo de agua y su área de inundación, así como los cambios que han sufrido durante los periodos 2015 – 2017 y 2021, considerando los procesos de inundación e intervención antrópica por los que atraviesa esta región.

Por último, esta investigación puede ser una fuente base de información con enfoque hacia los ecosistemas de humedales, para aquellas entidades o personas que trabajen en la conservación, protección y planificación del medio ambiente, específicamente para el CCZ; así mismo sirve como insumo para impulsar el interés sobre este tipo de ecosistemas, y generar estrategias de conservación y preservación de la biodiversidad.

2. Marco Teórico y Estado del Conocimiento

2.1 Marco Teórico

- *Humedales*

Según la Convención sobre Humedales de Importancia Internacional - RAMSAR, un humedal es una marisma, ciénaga, turbera o extensión superficial cubierta de agua, natural o artificial, permanente o temporal, estancada o flotante, dulce, salobre o salada, que incluye superficies de agua de mar cuya profundidad no sobrepasa los seis (6) metros en marea baja. Además, son sitios clave en varias rutas migratorias de numerosas aves (Ramsar, 2015).

Las ciénagas son humedales de importancia ambiental porque cumplen funciones, como el control de inundaciones al retener grandes volúmenes de agua, la regulación de caudales en los ríos, la suspensión de sedimentos cuando se presentan procesos de decantación y deposición de materiales que purifican el agua. Como se ha indicado anteriormente, estos ecosistemas son el hábitat de una amplia diversidad de flora y fauna, y tienen gran importancia económica, por cuanto generan bienestar e ingresos a quienes se benefician directamente (La Economía de Las Ciénagas Del Caribe Colombiano, 2011).

Los humedales sanos y naturales son esenciales para la supervivencia humana, sin embargo, se enfrentan a un sin número de desafíos. La Convención de Ramsar es el único acuerdo legal internacional que se enfoca en realizar labores a nivel mundial para promover la conservación y el uso racional de los humedales, garantizando que estos desempeñen un papel central en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el Acuerdo de París sobre Cambio Climático, las Metas de Biodiversidad de Aichi y otros compromisos relacionados. La Perspectiva mundial de los humedales describe el estado y las tendencias de los humedales en todo el mundo, así como los desafíos y las respuestas (Ramsar, 2018).

El sistema o Complejo Cenagoso de Zapatosa tiene una extensión aproximada de 360 km² y consigue alcanzar hasta los 500 km² en época de elevadas precipitaciones. Está ubicado en el municipio de El Banco, departamento del Magdalena, y en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Chiriguaná, Curumaní, en el departamento del Cesar. Está conformado por varias ciénagas y lagunas que forman parte de la Depresión Momposina, así mismo recoge las aguas de los ríos Magdalena, Cesar y otras corrientes menores como caños y quebradas. Debido a los diversos problemas que se presentan en el sector, como la pobreza, falta de oportunidades laborales y bajo capital humano, los recursos naturales de este complejo cenagoso se han visto afectados y cada vez se agotan más a causa de las dificultades que han obligado a que más personas practiquen la pesca artesanal como fuente de ingreso y sustento económico (La Economía de Las Ciénagas Del Caribe Colombiano, 2011).

Los humedales son ecosistemas con vulnerabilidad natural a los cambios climáticos, según el tercer informe del IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, han sido poco estudiados en su relación con el cambio del clima. Aunque, hoy existe un amplio conocimiento que, a pesar de las incertidumbres, permite el acercamiento

al conocimiento de la acción del cambio climático sobre los humedales (de Alicante et al., 2005).

- *Teledetección*

La teledetección se considera como una técnica utilizada para obtener datos de la superficie terrestre, a partir de sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y los sensores crea un intercambio de datos que son procesados posteriormente y así extraer información interpretable de la Tierra (Instituto Geográfico Nacional, 2019).

La idea de utilizar datos satelitales para la observación de la tierra y el mapeo a partir de cartografía antes del año 1972 era un concepto imaginario, lo que conllevó al programa Landsat a constituirse en una serie de misiones satelitales de observación del planeta administradas por la NASA en conjunto con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). (Ariza Alexander, 2013).

El programa Landsat ha revolucionado la forma en que se observa y se estudia el planeta, teniendo que esta serie de datos dio inicio en 1972 y a hoy se ha constituido en la más larga de la historia, continuando con el registro satelital de los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Es un sistema satelital diseñado y operado para observar repetidamente la cobertura de la tierra con una moderada resolución; en total, cada píxel de la imagen cubre aproximadamente un campo de béisbol. El programa en su octava versión se denomina Landsat Data Continuity Mission - LDCM), siendo el octavo satélite de observación de esta serie y continuando con el legado de los archivos satelitales anteriores, por lo que lo convierte en la misión de resolución intermedia más antigua. Este programa mantiene la misma calidad de sus siete programas anteriores por cuanto amplía, avanza y mejora el registro de imágenes multiespectrales, (Ariza Alexander, 2013).

El objetivo principal de la misión Landsat 8 es extender el registro Landsat hacia el futuro y mantener la continuidad de las observaciones para que los datos de Landsat 8 sean consistentes y comparables con los de los sistemas Landsat anteriores (Roy et al., 2014).

El satélite Landsat 8 lleva una carga útil de dos sensores, el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), que se describen en detalle en Irons et al. (2012). Las bandas espectrales OLI y TIRS siguen siendo comparables en gran medida con las bandas Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+), sin embargo, el OLI tiene dos bandas adicionales de longitud de onda reflectante, una nueva banda azul con longitud de onda más corta (entre 0.43 y 0.45 μm) que ayuda a mejorar la receptibilidad de la clorofila y demás materiales de aguas costeras, así como para recuperar algunas propiedades de aerosoles atmosféricos, también cuenta con una nueva banda de onda corta infrarroja (entre 1.36 y 1.39 μm) para la detección de nubosidad. Las otras bandas OLI son espectralmente más estrecha en la mayoría de los casos que las bandas ETM+. En particular, la banda OLI de infrarrojo cercano (NIR) está más cerca en anchura de la banda MODIS NIR y evita la característica de absorción de vapor de agua de 0.825 μm que ocurre en la banda ETM+ NIR. El TIRS detecta la radiación emitida en dos bandas infrarrojas térmicas de 100 m, comparada con la banda ETM+ de alta y baja ganancia infrarroja térmica única de 60 m. La

resolución espacial reducida de TIRS no es óptima, pero fue necesaria por restricciones de costos de ingeniería. Sin embargo, las dos bandas térmicas TIRS permiten la corrección atmosférica de la longitud de onda térmica y una recuperación más fiable de la temperatura y la emisividad de la superficie (Roy et al., 2014).

- *Estudio de la dinámica de los humedales a partir del uso de productos de sensores remotos*

Para realizar estudios de los humedales es importante realizar análisis multiespectrales, considerando imágenes satelitales clasificadas para obtener información de áreas y diversas coberturas, mediante la interpretación de las diferentes coberturas en las bandas espectrales se pueden determinar las características ambientales y físico - químicas que exponen contrastes débiles o fuertes según la región del espectro observado en superficie (Etter A et al., 2017).

Generalmente las características espectrales del agua cuentan en el espectro infrarrojo con propiedades de radiación electromagnética, permitiendo identificarlas con mayor precisión. Considerando lo anterior, se hace preciso realizar la clasificación usando imágenes de satélite Landsat 8, para analizar información geográfica del sector de interés. Además, se deben considerar aspectos como la necesidad del usuario, la escala del área de estudio y el objetivo de la investigación que influyen en la selección de datos de percepción remota, el diseño del procedimiento de clasificación y la calidad de los resultados de la clasificación, están dados con la correcta determinación de dichos factores y/o aspectos. (Lu & Weng, 2007, P.824).

El software examina cada uno de los pixeles de las imágenes para determinar qué valores han cambiado, y determinar factores como la definición de coberturas a comparar, la selección de elementos y la escala, entre otros, para evaluar las variaciones existentes entre imágenes. Por lo general las áreas modificadas se resaltan en un color diferente. Este procedimiento se utiliza para mapear grandes áreas e identificar cambios significativos, como en este caso la delimitación de áreas afectadas por inundaciones (Saquis, 2016).

2.2 Estado del conocimiento

Con relación a los antecedentes en la temática de estudio, a continuación, se relacionan algunos avances e investigaciones en el ámbito desde lo internacional, seguido por estudios nacionales enfocados en análisis multitemporales de humedales.

En el estudio de (Rokni et al., 2014), en el lago Urmia – Irán – Asia Central, el cual ha estado en una situación crítica en los últimos años por la disminución de las aguas superficiales y aumento de la salinidad. Este estudio modeló los cambios espaciotemporales del lago Urmia en el período 2000-2013 utilizando las imágenes multitemporales Landsat 5-TM, 7-ETM+ y 8-OLI. Los resultados indican una tendencia decreciente en la superficie del lago en el período del 2000 al 2013, cuando el lago perdió alrededor de un tercio de su superficie en comparación con el año 2000.

El estudio de (Kaplan & Avdan, 2017), analiza dos áreas de estudio con diferentes características, una región montañosa y otra urbana, ambas ubicadas en Macedonia – Europa, donde se indica que el análisis de cuerpos de agua por medio de imágenes satelitales con un método basado en píxeles o índices no puede eliminar otros objetos que tienen un albedo bajo, como sombras y áreas construidas, dado que sus diferencias espectrales no pueden separarse, por lo que en este artículo se ha utilizado un método que combina un índice basado en píxeles y otro basado en objetos en una imagen de satélite Sentinel-2 con una resolución de 10 m. El método utiliza la segmentación de imágenes, en una imagen multiespectral que contiene 13 bandas. También utiliza índices para extraer cuerpos de agua, como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

El trabajo realizado por (Ortiz Cogollo, 2021) tiene como objeto analizar los cambios en los cuerpos de agua de la Depresión Momposina para los años 1997, 2010 y 2021, enmarcado dentro del ordenamiento territorial y ambiental, y se centró en conocer las hectáreas que se han transformado en los cuerpos de agua que conforman la Depresión Momposina y las posibles razones, a través del análisis de imágenes satelitales. De igual forma, contribuir al conocimiento e insumo de información de carácter ambiental para definir una adecuada planificación en este complejo de humedales.

Según el estudio de (Parra & Hernández T., 2010), donde se tuvo como prioridad el inventario de humedales lénticos de tipo natural, como madres viejas, ciénagas, lagunas y zonas de inundación generadas por intervención humana como cultivos de arroz, ubicados en el valle del río Cauca, los cuales tienen influencia directa con este río, específicamente en las zonas contiguas, las cuales se encuentran susceptibles a inundaciones en época de lluvias, considerando que las crecientes periódicas del río determinan aumentos en los niveles de los humedales del valle y de las áreas aledañas a éstos. Así mismo, cuando llega la época seca, el nivel de las aguas desciende considerablemente y la extensión de los hábitats se reduce.

Por otra parte, (Castillo & Rodríguez, 2017) en la laguna de Fúquene ubicada en los valles de Ubaté y Chiquinquirá, siendo uno de los ecosistemas acuáticos más importantes del altiplano cundiboyacense, se encontraron procesos de desecación y eutrofización de sus aguas, a causa de la carga orgánica y de nutrientes vertida de manera descontrolada sobre el cuerpo de agua, y que han ocasionado fuertes impactos ambientales sobre este ecosistema. Una de las principales evidencias ha sido el progresivo descenso en los niveles y espejo de agua, lo que favorece al crecimiento de diversos tipos de cobertura vegetal acuática. Se utilizaron herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica para analizar la dinámica temporal y espacial de esta vegetación.

González & González, realizaron un análisis multitemporal para el periodo de 1985 a 2015, del espejo de agua en la laguna de Fúquene - Cundinamarca, identificando la pérdida de áreas y el cambio ecosistémico que ha sufrido el cuerpo hídrico, considerando la desecación acelerada a causa de la desmedida intervención antrópica. Basado en imágenes satelitales Landsat se determinaron las coberturas entre el periodo de 1985 a 2015, evidenciando notables cambios del área que representa la lámina de agua, además se realizó el análisis para el mismo periodo de variables climáticas de precipitación, temperatura y evaporación,

para evaluar la incidencia sobre el ecosistema causada por los efectos del cambio climático (Abdul Majid et al., 2015).

En la Laguna de Tota (Rey, 2020), realizó a un análisis multitemporal para el periodo de 1989 a 2019, con el procesamiento de imágenes satelitales obteniendo diversas coberturas y calculando el área correspondiente al espejo de agua de la laguna. La variación física se evidenció considerablemente en la clasificación, identificando siete (7) zonas en las cuales la disminución del área del espejo de agua de la laguna desde el año 1989 hasta el año 2019 fue de alrededor de 4 Km², contando inicialmente en el año 1989 con un área de 55.8 Km² y un área final en el año 2019 de 51.8 Km².

Seguidamente y dada la problemática que existe en Colombia de los humedales, el trabajo de (Acosta & Morales, 2021) comprende el análisis espacial y temporal del complejo cenagoso del Bajo Sinú en el departamento de Córdoba para épocas secas durante los periodos de 2014, 2017 y 2020, considerado como uno de los espejos naturales de agua más importantes del departamento, se ha visto bastante afectado en el retroceso espacial a medida que pasan los años durante los periodos secos. La metodología empleada describe el uso de imágenes Landsat 8 para épocas secas, procesadas con el software ERDAS IMAGINE 2014 y ArcMap 10.7, identificando inicialmente el espejo de agua en cada periodo y posteriormente realizando un análisis comparativo, se demuestra la disminución que sufre el complejo cenagoso, en 2014 el área era de 6126,1 ha, luego en 2017 el área disminuyó a 4871,7 ha y finalmente para el año 2020 el espejo de agua contaba con un área de 3840,0 ha, reduciéndose en total para el periodo de estudio en aproximadamente 2286,1 ha.

De igual forma (Jorge E., 2016), realizó un análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia, cuantificando las áreas de humedal que han sufrido transformaciones por intervención antrópica. Se identificaron los factores responsables de dicha transformación, explorando la asociación con otros factores socioeconómicos utilizando datos espaciales y métodos cuantitativos. Los resultados muestran que en el país la mayor parte de las áreas de humedal transformadas están dedicadas a la ganadería y la agricultura, y en menor medida a la minería, urbanización, construcción de vías y obras civiles. Las relaciones entre la transformación de humedales y los factores de cambio varían a lo largo del territorio, y es un tema que debe ser considerado en el manejo y protección de estos ecosistemas.

Por último, la investigación de (Mejía Ávila et al., 2019) pretendió caracterizar la zona de influencia de la ciénaga Grande del Bajo Sinú, aplicando índices hídricos derivados de series históricas de imágenes Landsat con el fin de cuantificar el impacto causado por las actividades antrópicas en los humedales. Este trabajo se enfocó específicamente en el Complejo de Humedales del Bajo Sinú (BSWC) ubicado en la costa norte del Caribe colombiano, donde se modeló la dinámica espaciotemporal de la BSWC para tres períodos específicos (1991, 2003 y 2015) y durante dos estaciones: seca y húmeda. Usando datos de imágenes Landsat 4 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM) y Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) (Oli-Tirs), evaluando siete diferentes índices de agua seleccionando el que mejor describía los cambios en el BSWC.

El Instituto Humboldt en apoyo con otras entidades realizó el análisis de las actividades que causan mayor impacto sobre los humedales, exponiendo a través de mapas en escala 1:100.000 publicados en los años 2005 y 2012 (Medina Lozano & Gonzalez, 2014), elaborados con imágenes satelitales de los años 2000, 2005 a 2009 y 2010, por lo que la temporalidad de los cambios de algunas zonas no es la misma que para otras, dependiendo de la imagen insumo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar los cambios espaciales y temporales en los espejos de agua que conforman el complejo cenagoso Zapatosa localizado en los departamentos del Magdalena y Cesar, durante los periodos 2015-2017 y 2021.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar espacialmente los espejos de agua en el complejo cenagoso Zapatosa durante los periodos 2015-2017 y 2021 en temporada seca y lluviosa.

Analizar la dinámica del espejo de agua en el complejo cenagoso Zapatosa en temporada seca y lluviosa para los periodos 2015-2017 y 2021.

4. Metodología

4.1 Área de estudio

El Complejo Cenagoso de Zapatos (CCZ) se encuentra localizado en la región del Caribe colombiano, en los departamentos del Cesar y Magdalena, entre la depresión Momposina y el delta del río Magdalena (Figura 1). Es alimentado por los ríos Cesar y Magdalena, y por corrientes menores como La Mula, Anime Grande, Animito y Rodeo Hondo, caños como Largo, Blanca Pía, Jobito, Las Vegas, Platanal, Mochila San Pedro, Viejo y Tamalacué y quebradas como Quebradientes, La Floresta y Alfaro. Los municipios que conforman dicho complejo cenagoso son Tamalameque, Chimichagua, Curumaní y Chiriguaná en el Cesar y El Banco en el Magdalena (Viloria, 2008).

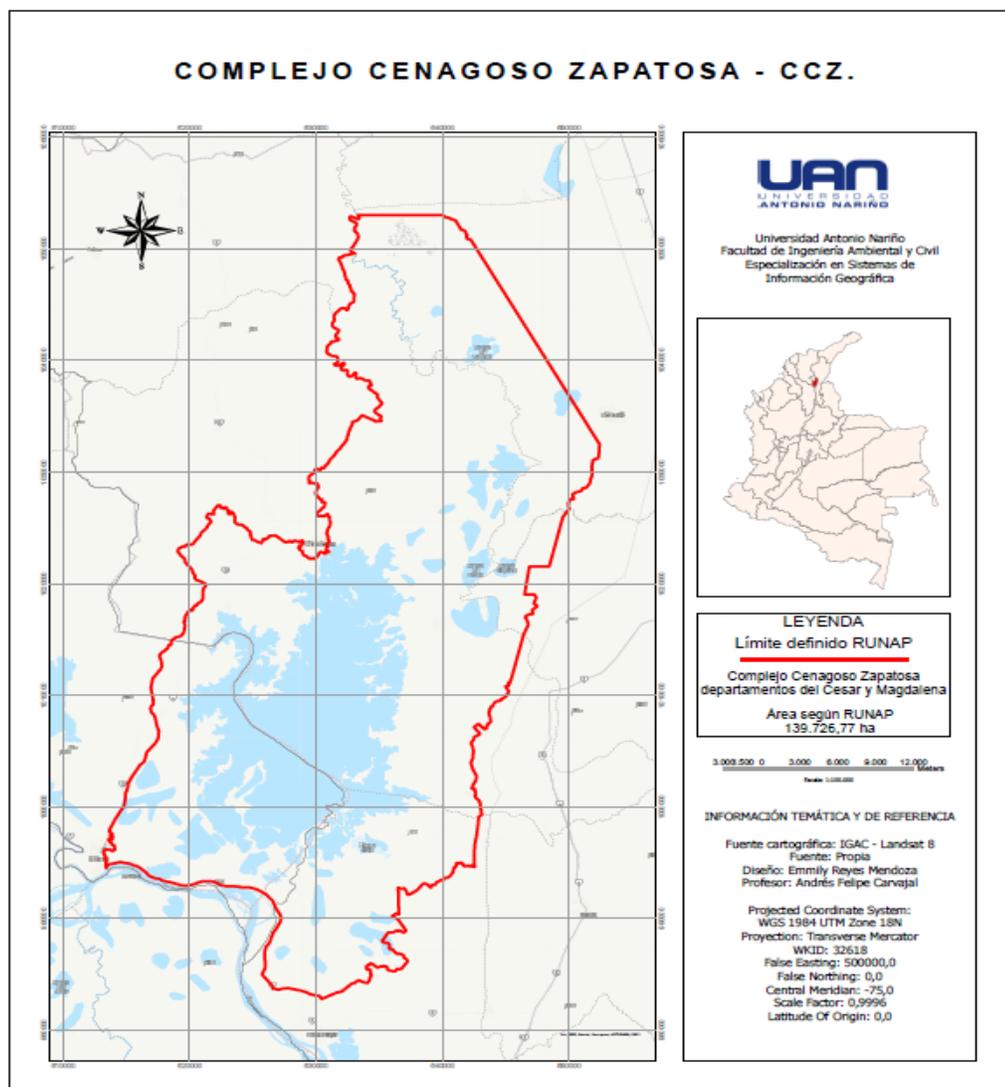


Figura 1 Localización complejo Cenagoso de Zapatos. Fuente: Propia

Este sistema cenagoso está formado por varias ciénagas como Bartolazo, La Palma, Pancuiche, Pancuichito, Santo Domingo y Tío Juancho, entre otras; así como por numerosas islas, como Barrancones, Concoba, Colchón Grande, Palospino, Delicias, Loma de Caño, Las Negritas y Punta de Piedra. La precipitación anual oscila entre 1600 y 2000 mm y la temperatura entre 28 y 32 °C, presentando un clima cálido (Viloria, 2008).

El área tiene una extensión total de 141.434,38 ha, se encuentra bajo jurisdicción de los departamentos de Magdalena y Cesar, en los municipios de El Banco (Magdalena) que abarca una extensión de 25.571,34 ha; mientras que, en el departamento del Cesar, el área total es de 115.863,04 ha, distribuidas así: Chimichagua con 66.318,58 ha, Chiriguaná con 26.858,04 ha, Curumaní con 3.564,15 ha y Tamalameque, con 19.121,93 ha, respectivamente.

4.2 Descarga y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8

Para seleccionar las imágenes Landsat 8, se evaluaron algunos criterios como: nubosidad inferior al 30%, Path y Row (Figura 2), que cubriera totalmente la zona de interés, épocas de la toma de las imágenes (temporada seca y temporada de lluvias) para los años 2015 – 2017 y 2021 (Tabla 1). Las descargas fueron realizadas desde la página <https://earthexplorer.usgs.gov> con las siguientes características: Path 008 – Row 054, fecha de las imágenes correspondientes a los meses de mayor variabilidad climática, considerando los episodios fríos y cálidos por temporada, de acuerdo con lo reportado por el Centro de Predicción Climatológica (Figura 3). (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Cabe indicar que los periodos considerados para el respectivo análisis corresponden a pronósticos definidos por el Centro de Predicción del Clima, basados en un umbral +/- 0,5°C para el Índice Oceánico del Niño (Oceanic Niño Index, ONI), teniendo para el año 2015 una época principalmente de estiaje con valores que oscilan entre 0.5 y 2.6 °C, para el año 2017 se puede considerar un año medianamente estable teniendo valores entre -1.0 y 0.3°C, y finalmente para el año 2021 se tienen valores entre -1.0 y -0.4 °C que corresponden a condiciones de elevadas y constantes precipitaciones. Por lo anterior, los resultados de este trabajo aportan un análisis de información a nivel general de la variación espacio-tiempo de la cobertura (lámina) de agua en el área de estudio.

| Sensor | Fecha | Path/Row | Resolución |
|-------------------------------|----------------------|----------|--|
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 13 de junio 2015 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 06 de diciembre 2015 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 26 de febrero 2017 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 04 de julio 2017 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 21 de febrero 2021 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |
| Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1 | 08 de julio 2021 | 008/054 | 30 m. multiespectral – 15 m. pancromática |

Tabla 1 Características de las imágenes seleccionadas para el análisis

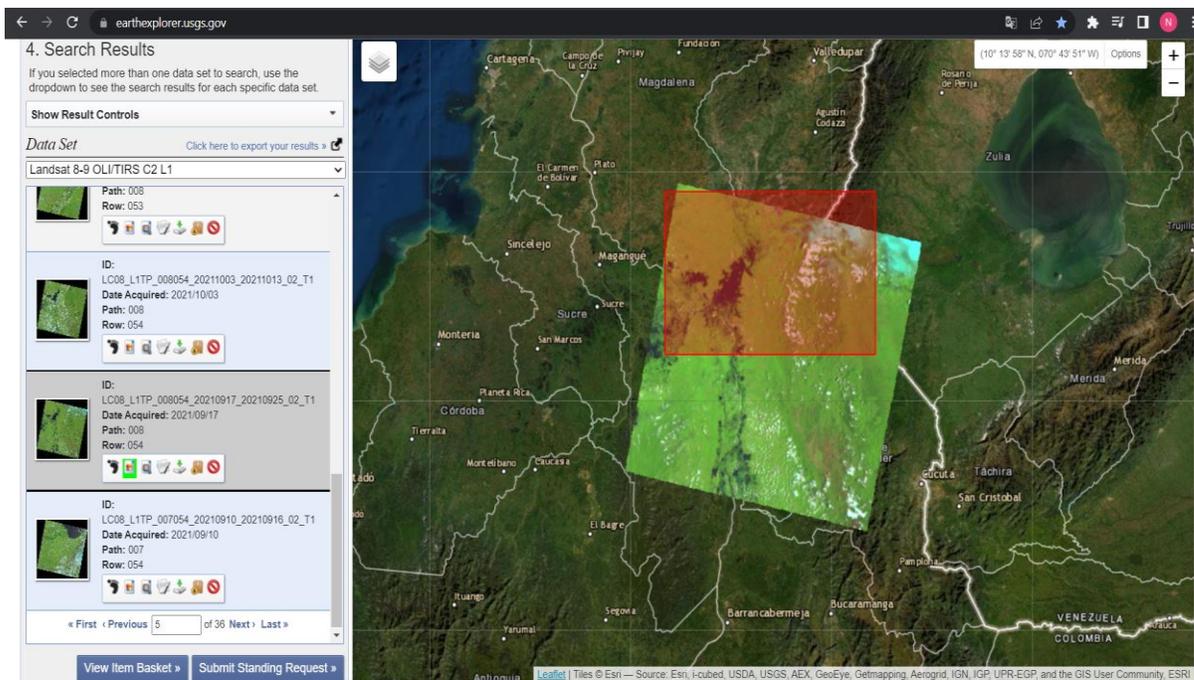


Figura 2 Zona de trabajo - Path 008 - Row:054. Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

National Weather Service
Climate Prediction Center

Cold & Warm Episodes by Season

Notice: This page is updated automatically on the first Thursday of each month. Because of the high frequency filter applied to the ERSSTv5 data (Huang et al. 2017, J.Climate), ONI values may change up to two months after the initial "real time" value is posted. Therefore, the most recent ONI values should be considered an estimate.

DESCRIPTION: Warm (red) and cold (blue) periods based on a threshold of +/- 0.5°C for the Oceanic Niño Index (ONI) [3 month running mean of ERSST.v5 SST anomalies in the Niño 3.4 region (5°N-5°S, 120°-170°W)], based on centered 20-year base periods updated every 5 years.

For historical purposes, periods of below and above normal SSTs are colored in blue and red when the threshold is met for a minimum of 5 consecutive overlapping seasons. The ONI is one measure of the El Niño-Southern Oscillation, and other indices can confirm whether features consistent with a coupled ocean-atmosphere phenomenon accompanied these periods.

| Year | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | 1.5 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | -0.2 | -0.7 | -1.0 | -1.3 | -1.6 | -1.6 | -1.6 | -1.6 |
| 2011 | -1.4 | -1.2 | -0.9 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.5 | -0.6 | -0.8 | -1.0 | -1.1 | -1.0 |
| 2012 | -0.9 | -0.7 | -0.6 | -0.5 | -0.3 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | -0.2 |
| 2013 | -0.4 | -0.4 | -0.3 | -0.3 | -0.4 | -0.4 | -0.4 | -0.3 | -0.3 | -0.2 | -0.2 | -0.3 |
| 2014 | -0.4 | -0.5 | -0.3 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| 2015 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.9 | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 2.6 |
| 2016 | 2.5 | 2.1 | 1.6 | 0.9 | 0.4 | -0.1 | -0.4 | -0.5 | -0.6 | -0.7 | -0.7 | -0.6 |
| 2017 | -0.3 | -0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | -0.1 | -0.4 | -0.7 | -0.8 | -1.0 |
| 2018 | -0.9 | -0.9 | -0.7 | -0.5 | -0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.8 |
| 2019 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.5 |
| 2020 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | -0.1 | -0.3 | -0.4 | -0.6 | -0.9 | -1.2 | -1.3 | -1.2 |
| 2021 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.5 | -0.4 | -0.4 | -0.5 | -0.7 | -0.8 | -1.0 | -1.0 |
| 2022 | -1.0 | -0.9 | -1.0 | -1.1 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | | | | | |

Figura 3 Reportes considerados. Fuente: <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>

4.3 Procesamiento de Imágenes

Después de descargar las imágenes, con el programa ArcGIS Pro, se procedió a combinar las bandas multiespectrales (B1 a B7) aplicando el proceso <<Composite Bands>>, de la herramienta <<Data Management Tools>> <<Raster Processing>>. Seguidamente se ajustó la resolución espacial de las imágenes espectrales y la pancromática de 30 a 15 metros mediante la herramienta <<Resample>>, posteriormente usando el programa ERDAS IMAGINE 2014, se realizó el reescalamiento de 16 a 8 bits mediante la herramienta <<Resample>>, y finalmente se realizó la proyección de las imágenes al sistema UTM WGS 84 North – UTM Zone 18 (Range 78W – 72W), seleccionando la opción <<Raster – Spatial>> luego <<Reproject>> ajustando nuevamente el tamaño de píxeles de las imágenes multiespectrales, el cual será de 15 metros correspondiendo con la resolución espacial de la imagen pancromática de Landsat 8. (Figura 4).

Para el caso de la zona de interés, se realizó el recorte de las imágenes multiespectrales y pancromáticas, considerando el límite del complejo cenagoso Zapatosa definido en el RUNAP (Registro Único de Áreas Protegidas), el cual fue aprobado mediante Acuerdo de Comisión Conjunta No. 001. CORPOCESAR - CORPAMAG “POR LA CUAL SE DELIMITA, RESERVA Y DECLARA EL DISTRITO REGIONAL DE MANEJO INTEGRADO COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA CCZ”, mediante la herramienta <<Data Management Tools>> <<Raster Processing>> <<Clip Raster>> de ArcGIS Pro. (Figura 5 y Figura 6).

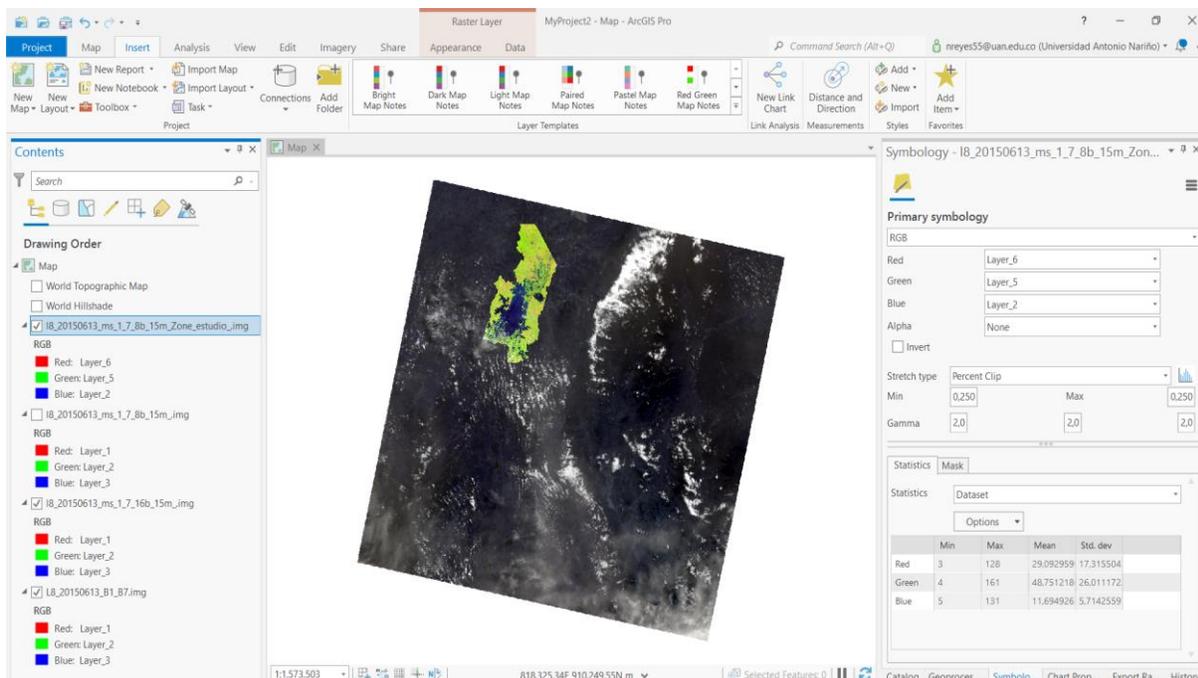


Figura 4 Procesamiento de las imágenes multiespectrales

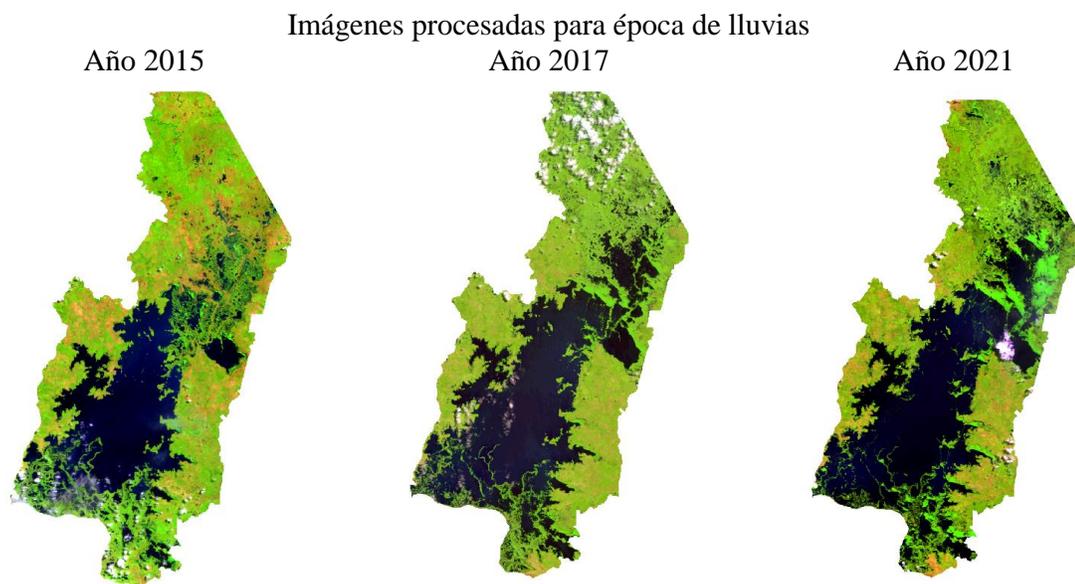


Figura 5 Procesamiento y recorte de las imágenes para época de lluvias

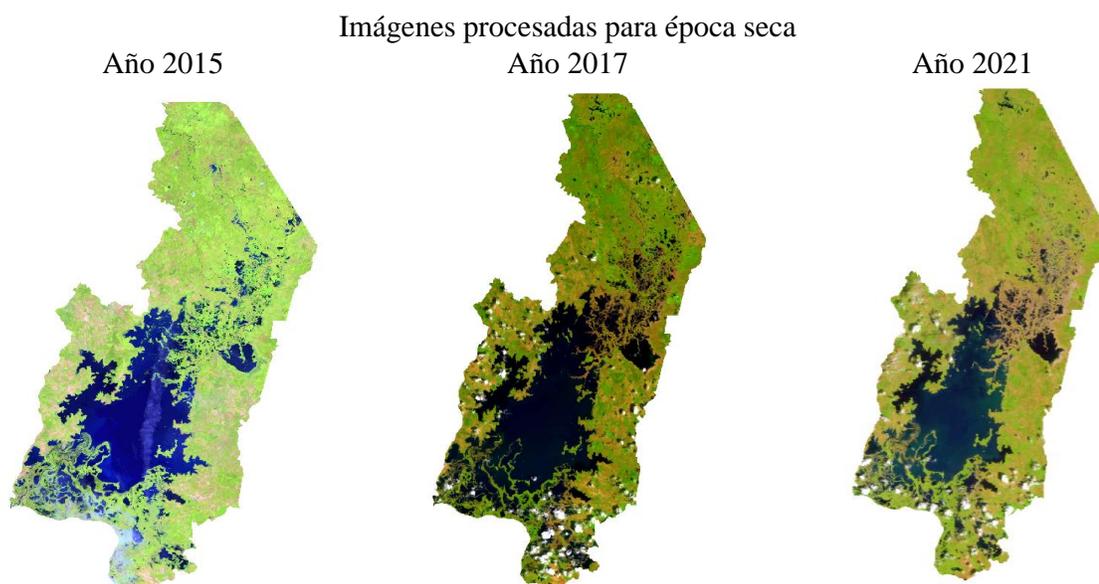


Figura 6 Procesamiento y recorte de las imágenes para época seca

Posteriormente, se procedió a realizar el proceso de Pan Sharpening para mejorar las imágenes utilizando la banda pancromática de alta resolución combinándola con las bandas multiespectrales, este proceso se realizó en ERDAS IMAGINE 2014 con la herramienta <<Raster>> <<Pan Sharpen>><<Resolution Merge>>. (Figura 7 y Figura 8).

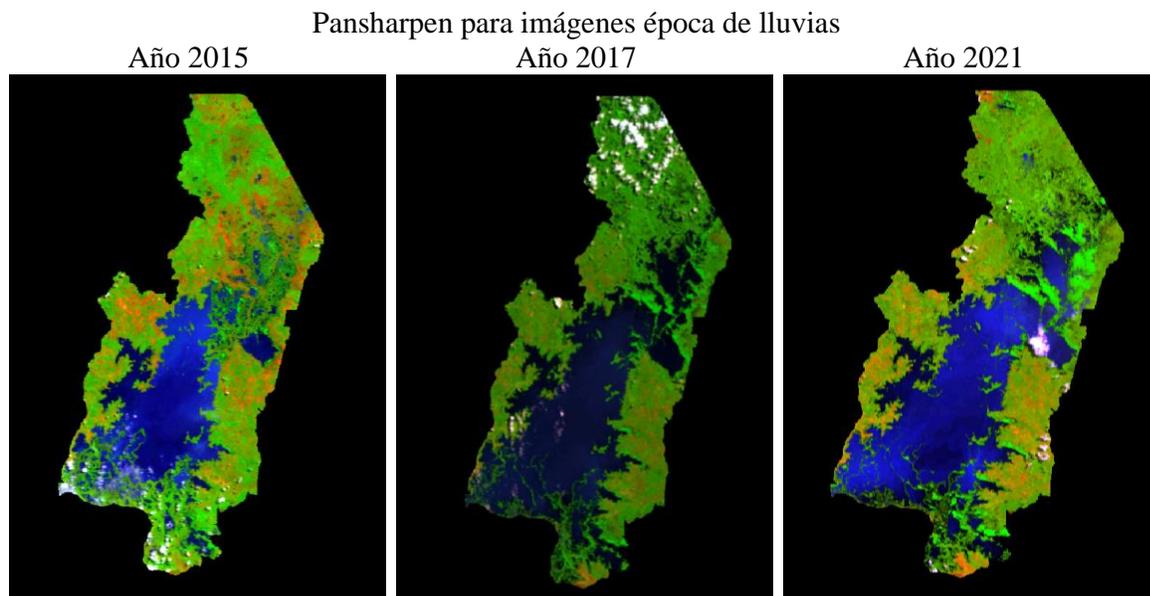


Figura 7 Imágenes con mejor resolución – Pansharpen para época de lluvias

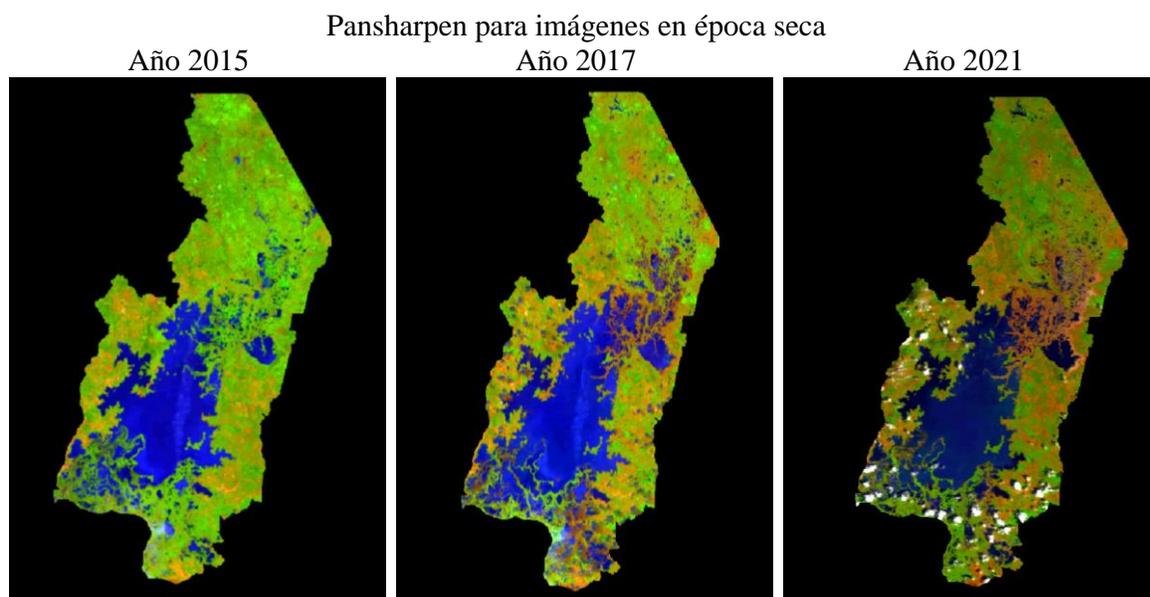


Figura 8 Imágenes con mejor resolución – Pansharpen para época seca

Considerando que en las imágenes se presenta una cantidad considerable de nubes, se optó por extraer mediante una máscara tanto para el análisis de las imágenes en época seca como de lluvia. Cabe indicar que el área inicial del complejo cenagoso Zapatosá tomando como base el polígono según el RUNAP es de 139.726,77 ha.

Para las imágenes de épocas lluviosas se extrajo un total de 7.587,98 ha correspondientes a las nubes, quedando finalmente un área de estudio de 132.128,79 ha. (Figura 9).

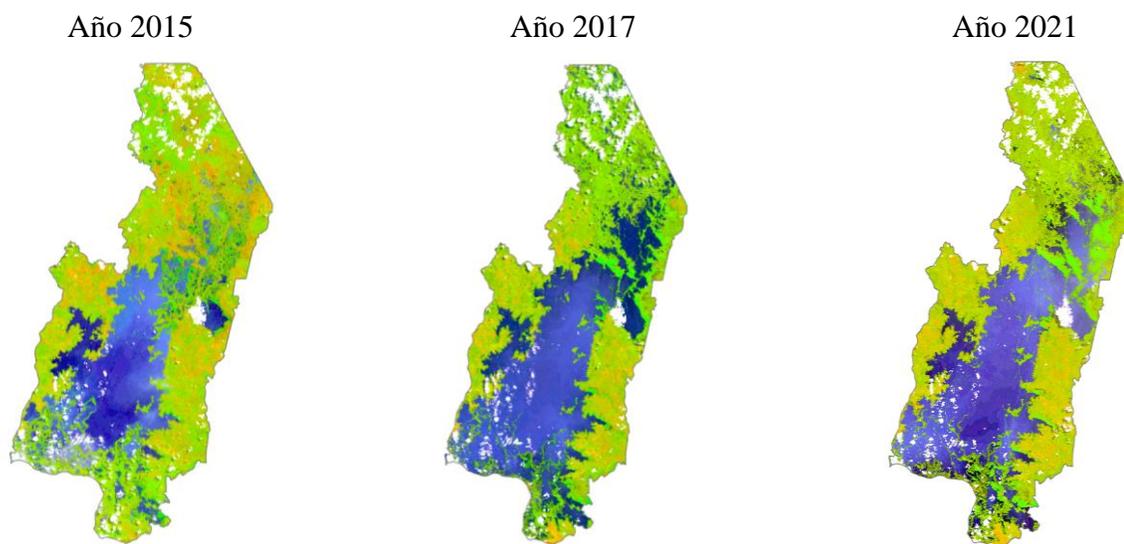


Figura 9 Recorte de nubes para las imágenes en época de lluvias.

Así mismo para las imágenes de épocas secas se extrajo un área de 3.696,34 ha que correspondían a nubes, definiendo un área de estudio de 136.030,43 ha para dicha época. (Figura 10).

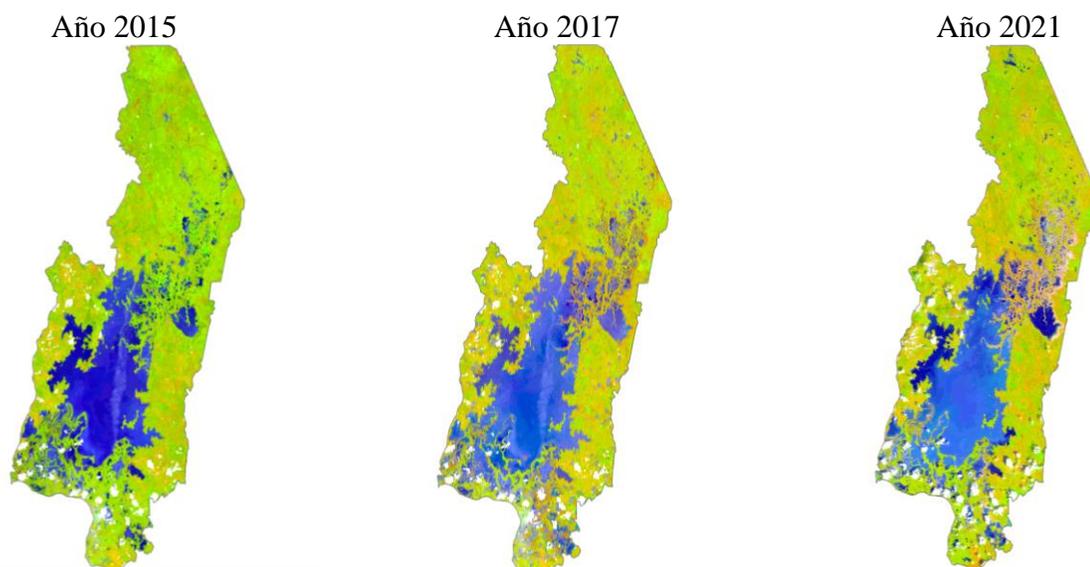


Figura 10 Recorte de nubes para las imágenes en época seca.

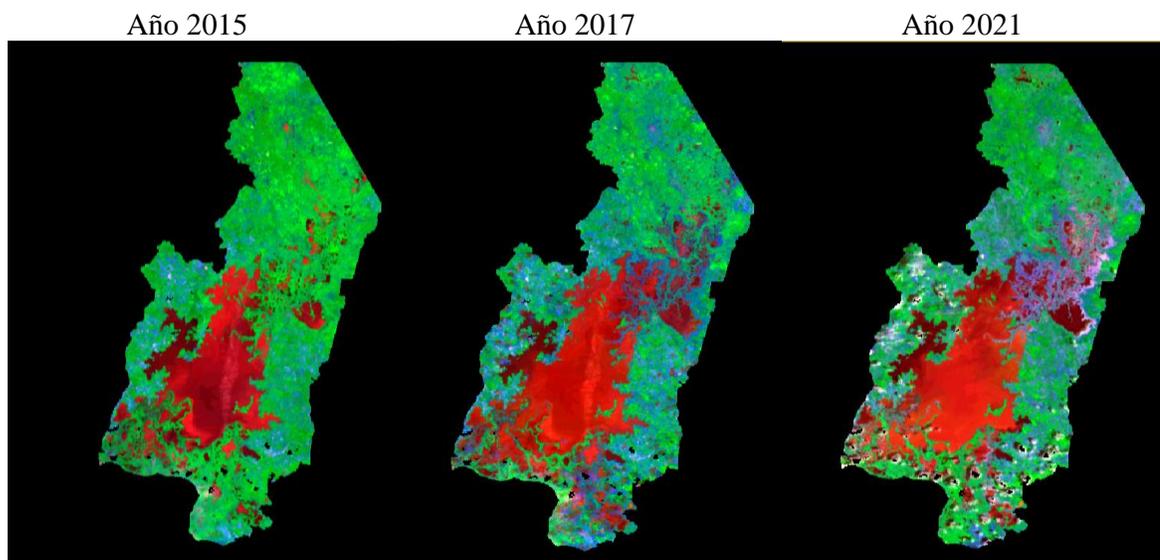


Figura 13 Mejor combinación de bandas considerando OIF para época seca

Con el cálculo del OIF ideal, se despliega la combinación indicada para la delimitación de los cuerpos de agua y se procede a realizar la clasificación supervisada, en la que se requiere tomar las muestras de firmas espectrales <<**Raster**>> <<**Supervised**>> <<**Signature Editor**>>, y sin cerrar la ventana <<**Drawing**>> <<**Grow**>>, se crearon los polígonos de muestras y se fueron adicionando a las firmas de cada periodo (más de 30 muestras por cada periodo) para realizar el geoproceso <<**Raster**>> <<**Supervised**>> <<**Supervised Classification**>> (Figura 14).

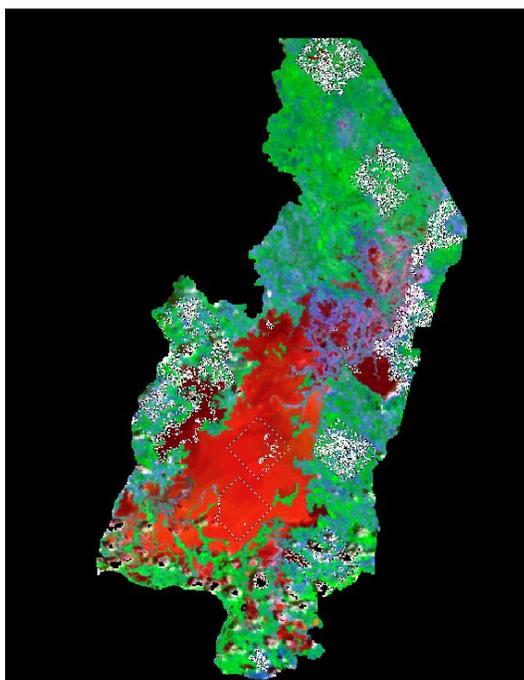


Figura 14 Selección de polígonos de muestra de cuerpos de agua para crear las firmas espectrales

Los resultados obtenidos se trabajaron en el software ArcGis Pro, donde se hizo necesario convertir los ráster a vector mediante la herramienta <<**Conversion Tools**>> <<**Raster to Polygon**>>, con el fin de evaluar los cambios de los espejos de agua en hectáreas para los periodos 2015, 2017 y 2021 para las épocas tanto de lluvias como seca. Cabe indicar que se corrigieron algunos errores enfatizando en la cobertura de agua del complejo cenagoso y finalmente se suavizaron los polígonos mediante la herramienta <<**Editor**>> <<**Modify Features**>> <<**Generalize**>> <<**Smooth**>>. Finalmente, se realizó el cálculo de las áreas correspondientes a los espejos de agua para cada periodo tanto en épocas de lluvia como seca.

5. Resultados y Discusión

De acuerdo con el análisis luego de realizar la clasificación supervisada para los cuerpos de agua en los periodos evaluados tanto para épocas de lluvia como seca, se determinaron cambios significativos considerando los resultados en hectáreas.

Cada periodo fue analizado de acuerdo con la metodología descrita con anterioridad, obteniendo los mapas para los años 2015, 2017 y 2021 tanto para época de lluvia como seca, siendo posteriormente analizados los cambios en los espejos de agua y comparando los periodos considerados.

Para la época de lluvias del año 2015 el insumo de trabajo fue una Imagen Landsat 8 del 11 de junio, de la cual se obtuvo un área para los espejos de agua de 34.682,17 ha (Figura 15). Para el año 2017 el espejo de agua tenía una cobertura de 50.760,11 ha (Figura 16). Finalmente, para el año 2021 el recubrimiento en hectáreas fue de 46.646,81ha (Figura 17).

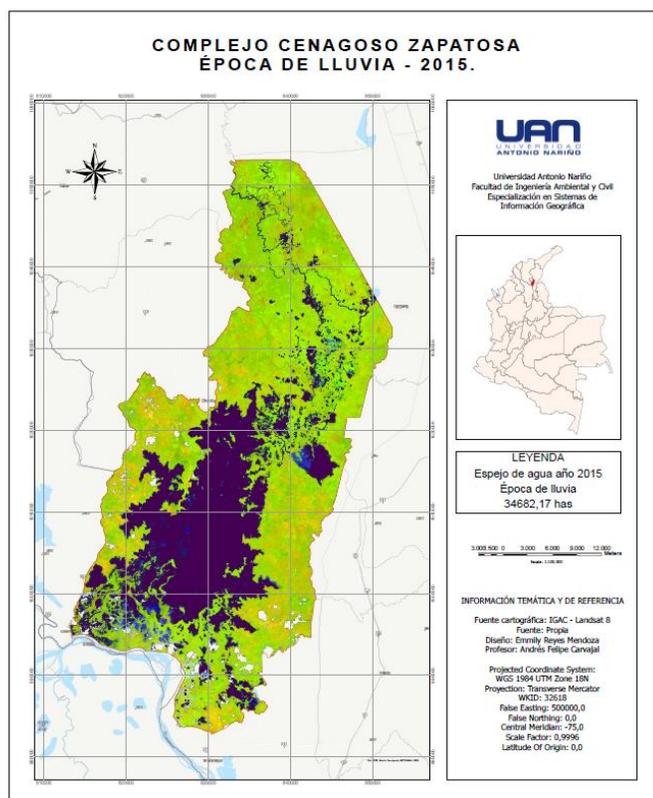


Figura 15 Espejo de agua en épocas de lluvia – 11 junio de 2015.

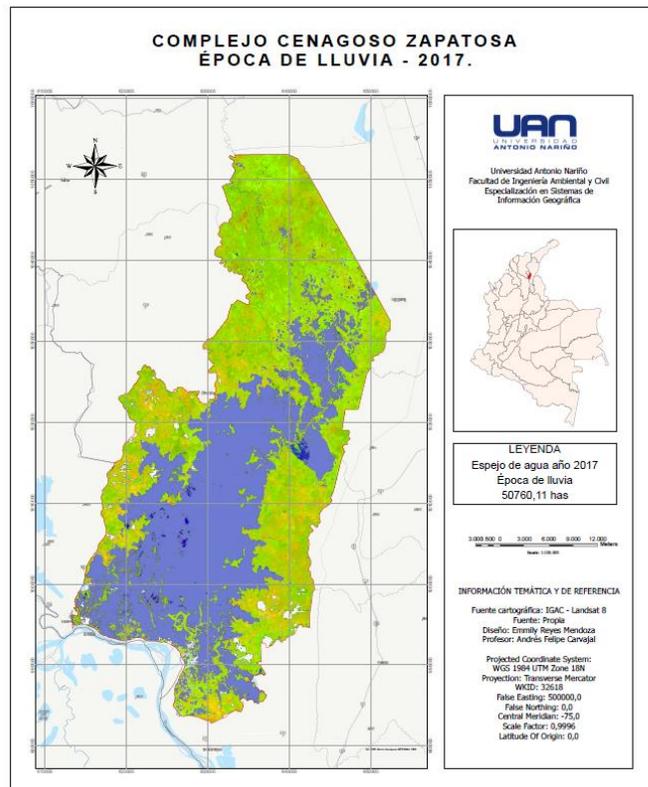


Figura 16 Espejo de agua en épocas de lluvia – 04 julio de 2017.

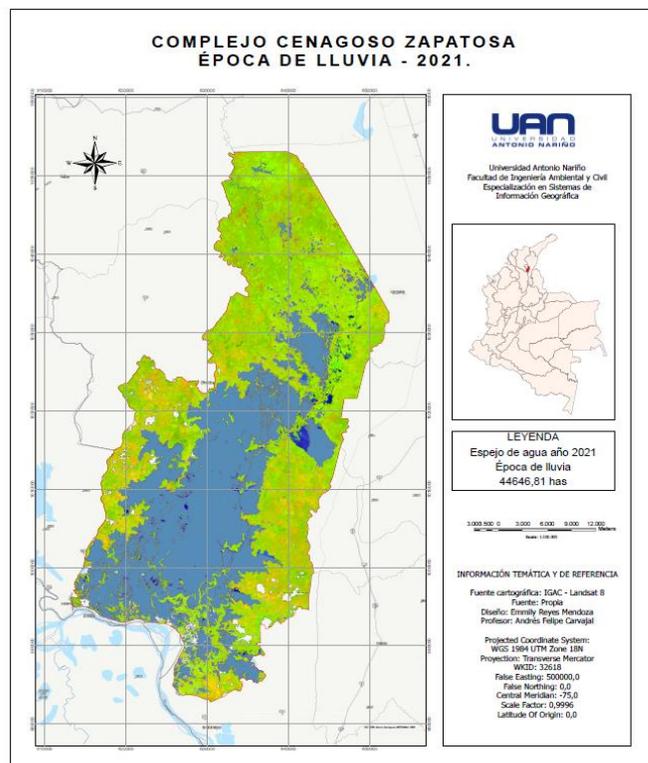


Figura 17 Espejo de agua en épocas de lluvia – 29 junio de 2021.

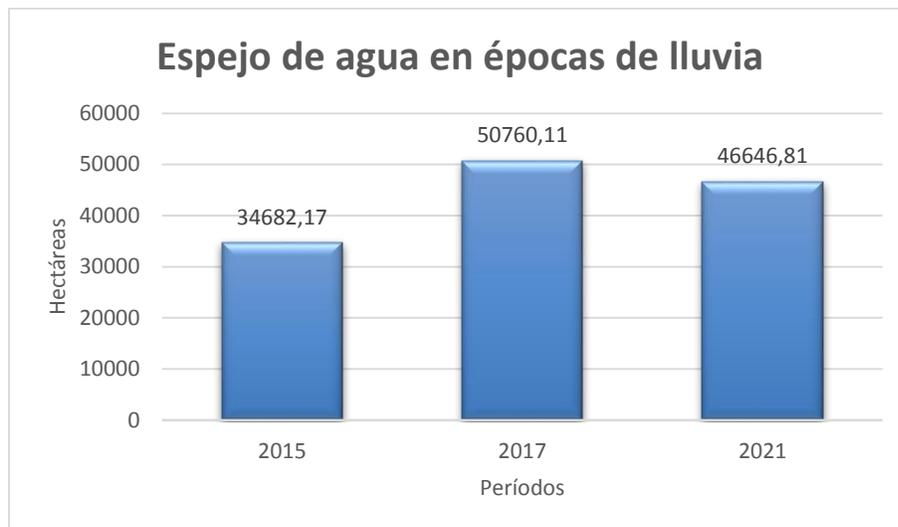


Figura 18 Variación para los periodos de lluvia

Así mismo, en la época seca para el año 2015 se obtuvo un área de 29.768,26 ha para los espejos de agua (Figura 19). Para el año 2017 se definió una cobertura de 37.084,95 ha correspondientes a los espejos de agua (Figura 20). Finalmente, para el año 2021 se delimitó un área de 34.285,56 ha (Figura 21).

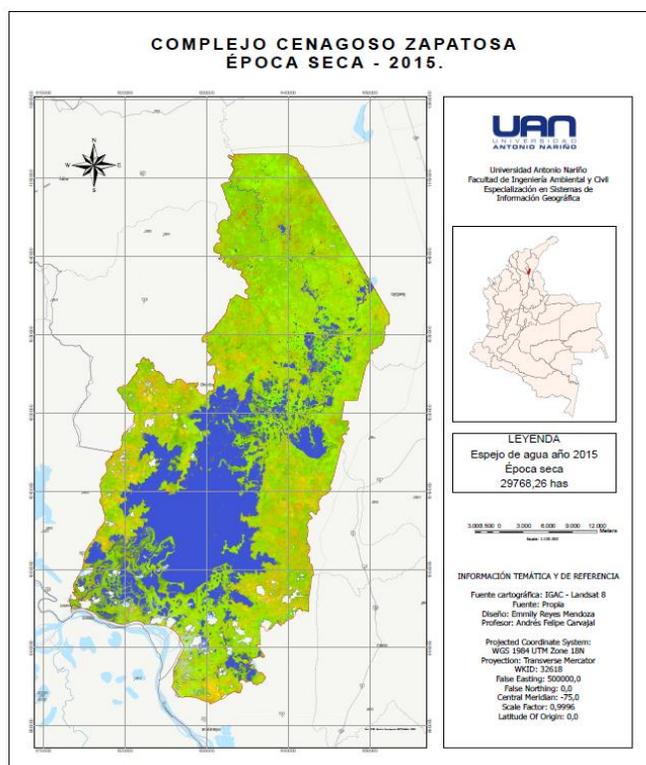


Figura 19 Espejo de agua en época seca – 06 diciembre de 2015.

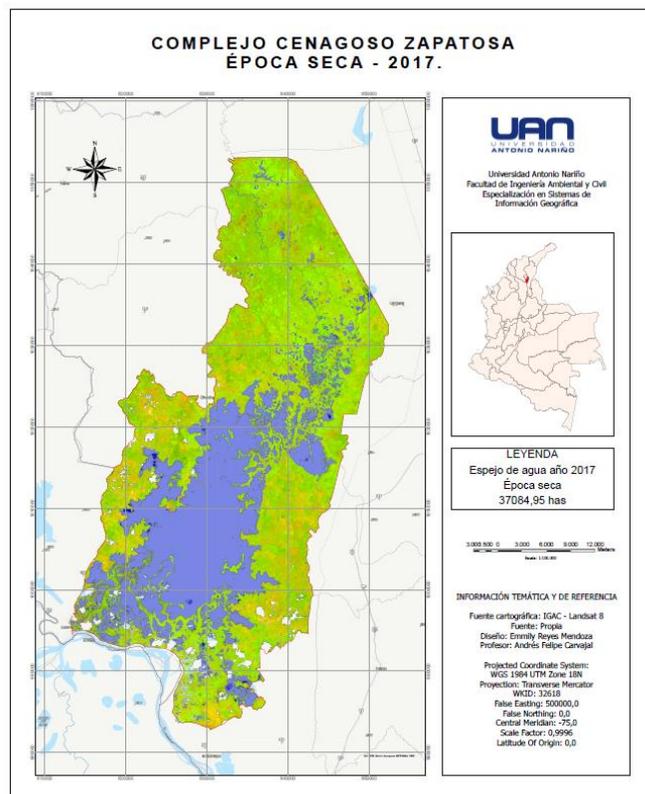


Figura 20 Espejo de agua en época seca – 26 febrero de 2017.

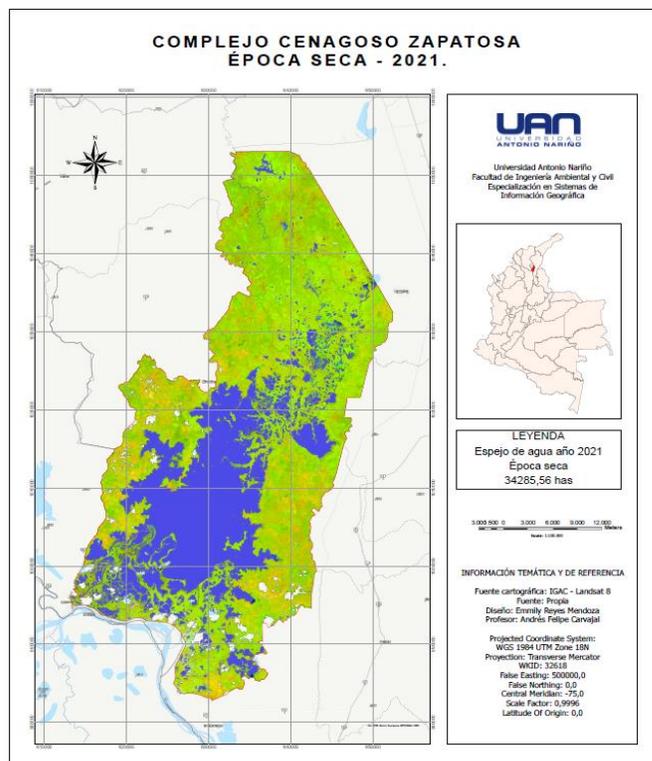


Figura 21 Espejo de agua en época seca – 21 febrero de 2021.



Figura 22 Variación para los periodos secos

Al obtener los resultados en hectáreas de los cuerpos de agua para cada periodo estudiado, se realizaron análisis espaciales comparativos de los espejos de agua tanto en época de lluvia como en época seca en el Complejo Cenagoso Zapatosa durante los años 2015, 2017 y 2021 (Figura 24 y Figura 26), evidenciando inicialmente el aumento considerable en las áreas para el año 2017; así mismo, se observó que en la época de lluvia los mayores contrastes espaciales se presentan hacia el sector centro oriental y sur occidental; así mismo se pudo establecer que en el año 2017 los espejos de agua aumentaron un 46,36% y en el 2021 un 34,50% con respecto al año 2015, de igual forma se evidencia una disminución del 8,10% en el año 2021 con respecto al 2017, esto puede deberse a la intervención antrópica, crecimiento de la tarulla (planta acuática) y ampliación de las fronteras agrícolas y ganaderas.

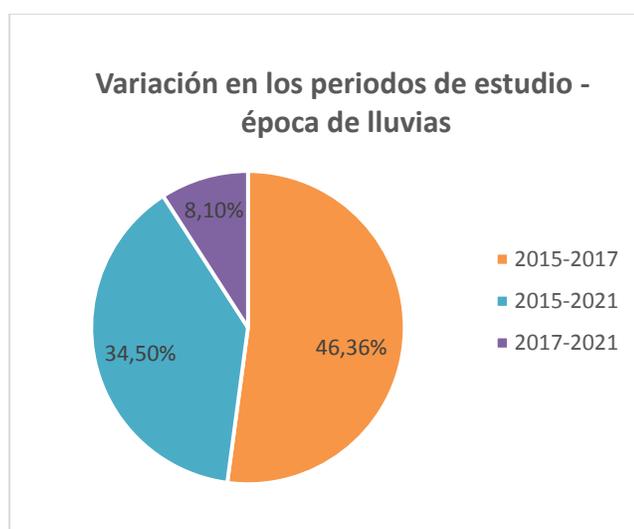


Figura 23 Variación para los periodos estudiados – época de lluvias

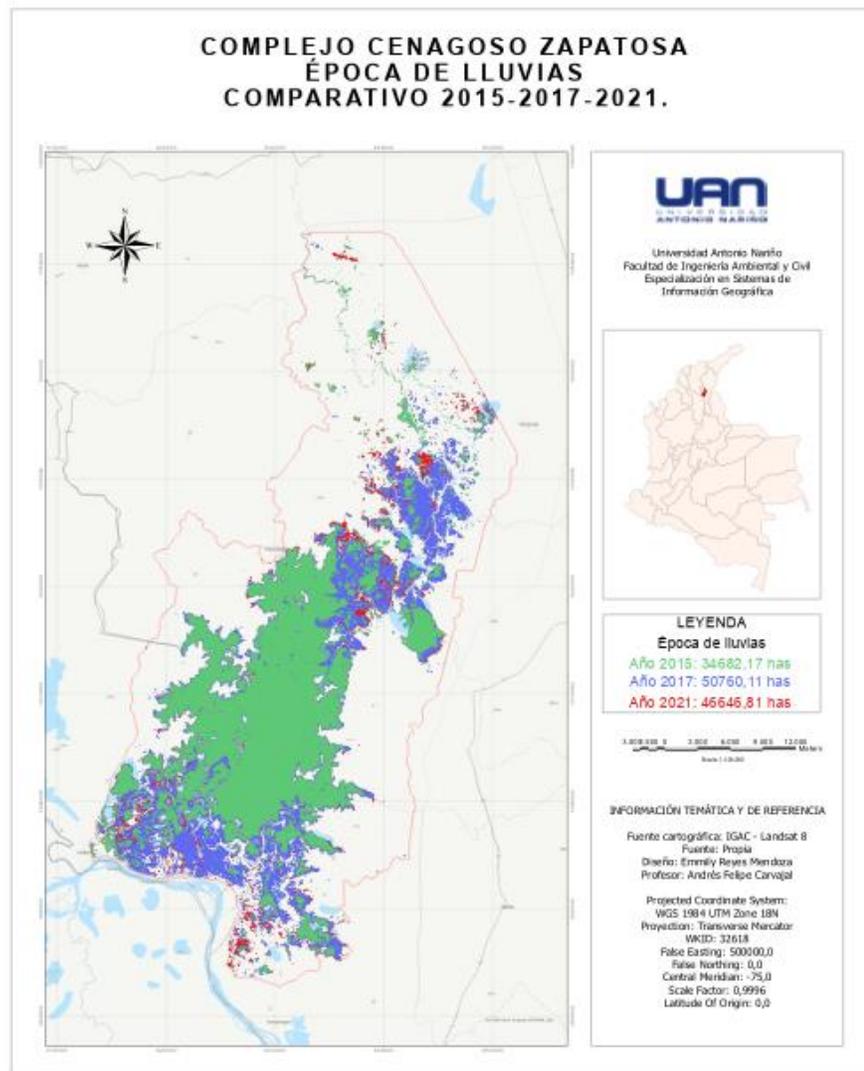


Figura 24 Comparativo espejo de agua en épocas de lluvia - años 2015 – 2017 y 2021.

Considerando los resultados para la época seca, se evidencia que los principales contrastes espaciales se dieron hacia el sector central y sur occidental del complejo cenagoso, así mismo, para el año 2017 los espejos de agua aumentaron un 24,58% y en el 2021 un 15,17% con respecto al año 2015, sin embargo, se evidencia una disminución del 7,55% en el año 2021 con respecto al 2017.

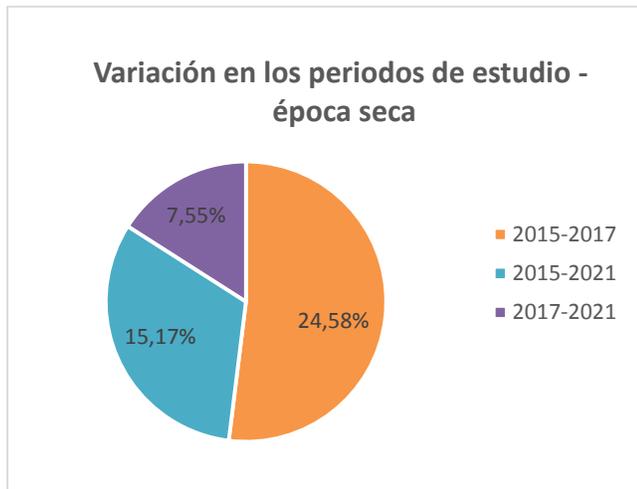


Figura 25 Variación para los periodos estudiados – época seca.

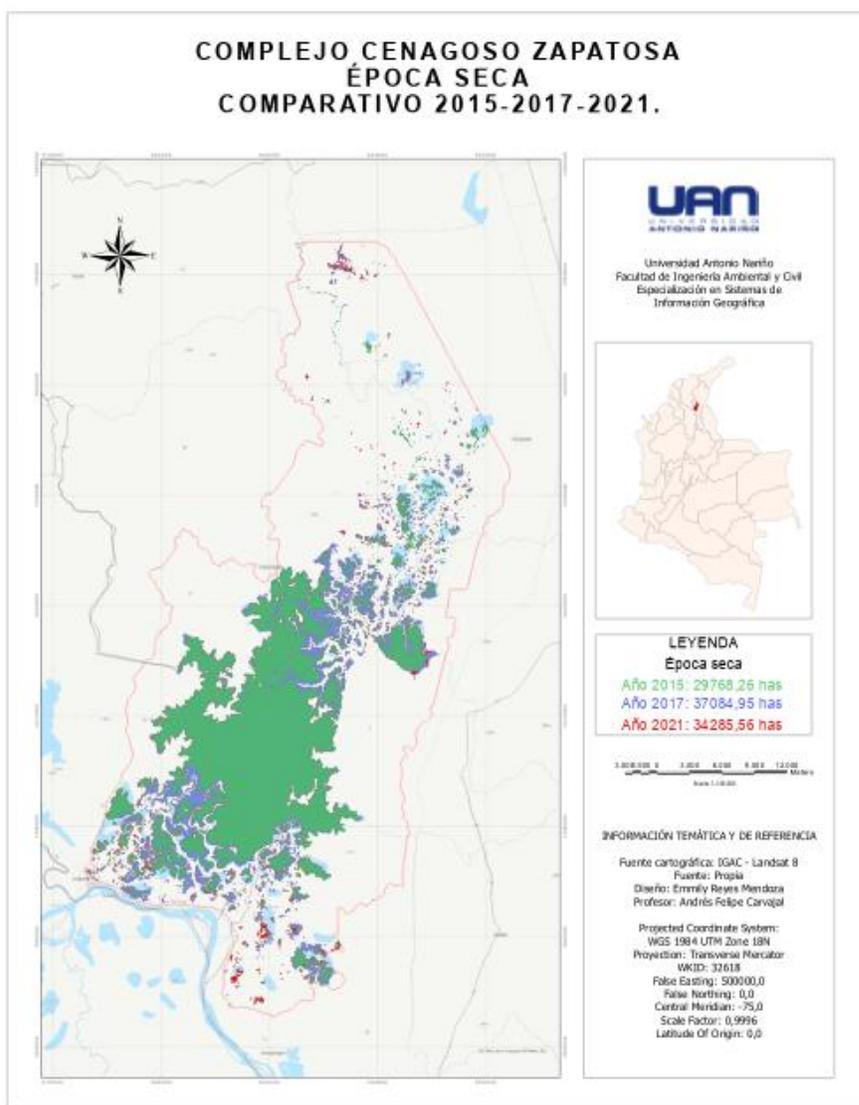


Figura 26 Comparativo espejo de agua en época seca - años 2015 – 2017 y 2021.

Considerando los resultados obtenidos a partir de imágenes satelitales libres Landsat 8 que pueden ser descargadas del portal <https://earthexplorer.usgs.gov/>, las cuales cuentan con resolución espacial de 30 metros, se puede indicar que son bastante útiles y eficientes en gran medida para realizar estudios multitemporales, especialmente cuando se utilizan técnicas para mejorar su resolución combinando las imágenes multispectrales junto con la imagen pancromática de 15 metros y generando una nueva imagen multibanda a color con mayor resolución.

Cabe indicar que existen imágenes como las Sentinel 2, que cuentan con una mejor resolución espacial de 10 metros, sin embargo, no se contaba con disponibilidad de este tipo de imágenes para el área de interés ni para los periodos a analizar en el presente estudio.

De igual forma, es pertinente indicar que el análisis realizado en el presente estudio no es considerado 100% efectivo, por cuanto se hizo necesario remover la cobertura de nubes, lo que puede variar significativamente los resultados.

En cuanto a los cálculos del OIF se considera de gran importancia para determinar las mejores combinaciones de banda en zonas determinadas con base en las coberturas que se presentan y que tienden a cambiar según su estado, específicamente para el análisis del presente estudio donde se enfatizó en la cobertura de espejos de agua para los periodos 2015 - 2017 y 2021, estableciendo que la mejor combinación era 4-5-7, considerada en la etapa de clasificación supervisada, la cual mejoró visualmente la cobertura de interés, facilitando su interpretación.

El cambio del espejo de agua en el Complejo Cenagoso Zapatosa entre los periodos 2015 - 2017 y 2021 genera evidencia cuantitativa de los resultados de la investigación de Vilorio, 2008, donde indica que se presenta una crítica situación ambiental a causa de diferentes actividades como la economía extractiva de subsistencia, la pobreza de su población y su bajo nivel educativo; y por tanto, esta problemática ha llevado a la sobreexplotación de los recursos naturales y a la pesca ilícita, además del aumento de la población en las últimas décadas, el desequilibrio hídrico producido por la construcción de obras de infraestructura; el vertimiento de desechos sólidos y líquidos a los cuerpos de agua, así como la tala y quema de especies vegetales a orilla de las ciénagas, y finalmente a causa de fenómenos asociados al cambio climático, que afectan el ciclo de las lluvias y las crecientes en la cuenca del Magdalena y acentúa los períodos de inundaciones y sequías en las ciénagas del Bajo Magdalena.

Así mismo, se evidencia que los espejos de agua disminuyeron para el año 2021, aun cuando según lo reportado por el Centro de Predicción del Clima en este periodo se presentaron condiciones de elevadas y constantes precipitaciones y según el análisis en un Foro Regional Ambiental, se estableció que el espejo de agua dulce más grande de Colombia – CCZ está quedando sin recursos naturales, a causa de las intervenciones antrópicas.

Considerando algunos estudios relacionados con análisis multitemporales de espejos de agua mediante el uso de imágenes satelitales, se puede establecer que se evidencian cambios

en la disminución de su área, los cuales se deben principalmente a actividades antrópicas y temperaturas en aumento.

De igual forma, en los textos de autores citados, así como en el presente análisis se presenta un inconveniente principal que radica en la visibilidad de los espejos de agua y coberturas considerando la presencia de nubes aún en época seca que pueden dar lugar a una errada interpretación de la cobertura de interés; para solucionarlo se realizó inicialmente una selección de imágenes con poca cobertura de nubosidad y posteriormente a partir estas, se diseñó una máscara que finalmente se aplicó a las imágenes para cada época (lluvias - seca), sustrayendo esta área para realizar el análisis final.

Así mismo, y considerando que el análisis se realizó utilizando clasificación supervisada, los autores consultados igualmente identificaron que las coberturas de interés pueden ser un poco complejas de definir y delimitar, teniendo en cuenta que estos ecosistemas en general presentan variedad de tonalidades en los espejos de agua debido a los materiales vegetales y sedimentos presentes, de igual forma las variadas profundidades definen diversas tonalidades.

Finalmente, se resalta que cada metodología para analizar los diferentes tipos de coberturas tiene sus potencialidades al ser aplicada frente a las necesidades que se enfoca.

6. Conclusiones

Los resultados del presente estudio muestra la variación espacial de los espejos de agua del Complejo Cenagoso Zapatosa, durante los periodos de 2015 – 2017 y 2021 tanto para épocas de lluvia como para épocas secas, evidenciando un incremento considerable en el año 2017 y una leve reducción en el año 2021, con relación al periodo analizado inmediatamente anterior, teniendo para la época de lluvias en el periodo 2015 – 2017 una variación del 46,36% seguido de un decrecimiento del 8,10% en el periodo 2017 – 2021, así mismo es necesario indicar que para el periodo 2015 – 2021 el área incrementó en un 34,50%.

Así mismo, para época seca para el periodo 2015 – 2017 se obtuvo un aumento del 24,58% y una leve disminución del 7,55% para el periodo 2017 – 2021, igualmente para el periodo del 2015 – 2021 se presentó un aumento del 15,17% en los espejos de agua de complejo cenagoso.

Analizando la cobertura de interés se obtuvo para la época de lluvias un área de 34.682,17 ha en el año 2015, es decir un 26,25% del total del área evaluada del CCZ, en el año 2017 alcanzó un área de 50.760,11 ha correspondientes al 38,42% del área de estudio y para el año 2021 se contó con 46.646,81 ha proporcional al 35,30% del área del CCZ; de igual forma para la época seca se obtuvo para el año 2015 un área de 29.768,26 ha correspondientes al 21,88% del área evaluada del CCZ, para el año 2017 con un 27,26% del área de interés representada en 37.084,95 ha y finalmente se alcanzó un área de 34.285,95 ha para el año 2021 correspondientes al 25,20% del área considerada para esta época.

Considerando que en el CCZ se encuentran varios centros poblados, donde se desarrollan actividades ganaderas y pesqueras que ejercen gran presión sobre el ecosistema de humedales, así como el crecimiento de plantas acuáticas y ampliación de las fronteras agrícolas, se podría indicar que la disminución de los espejos de agua presentada en el último periodo evaluado obedece a la intervención antrópica que sufre el ecosistema como consecuencia de dichas actividades.

Los estudios multitemporales de la variación de los cuerpos de agua realizados en diferentes escalas pueden ser usados para identificar diferentes perturbaciones relacionadas con el cambio climático.

7. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que el Complejo Cenagoso Zapatosa, fue declarado en 2019 como sitio RAMSAR, por ser considerado un ecosistema de gran importancia en los departamentos de Cesar y Magdalena además de ser un área natural para la regulación hídrica de esta zona del país, y como consecuencia de fenómenos exógenos como el cambio climático que afectan el ciclo de las lluvias y las crecientes en la cuenca del Magdalena y esto, a su vez, acentúa los períodos de inundaciones y sequías en las ciénagas del Bajo Magdalena, es importante implementar estrategias de conservación para dicho ecosistema.

Para proteger y conservar el espejo de agua dulce más grande de Colombia – CCZ, es evidente la necesidad de realizar actividades de investigación y planificación relacionadas con el manejo de este tipo de ecosistemas.

Es importante realizar estudios similares al acá presentado, utilizando diferentes escalas espacio-temporales, así mismo implementar otras técnicas de percepción remota, para relacionar tendencias locales con tendencias generales y tener conocimiento más detallado y preciso de la zona de interés.

8. Referencias

- Abdul Majid, J., Sulaiman, M., Zailani, S., Shaharudin, M. R., Saw, B., Wu, C. L., Brown, D., Sivabalan, P., Huang, P. H., Houston, C., Gooberman-Hill, S., Mathie, R., Kennedy, A., Li, Y., Baiz, P., Pokorná, J., Indonesia, G. B., Objectives, L., To, I., ... Challoumis, C. (2015). ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ESPEJO DE AGUA EN LA LAGUNA DE FÚQUENE PARA EL PERIODO DE 1985 A 2015. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 16(2), 39–55.
- Acharya, T. D., Lee, D. H., Yang, I. T., & Lee, J. K. (2016). Identification of water bodies in a landsat 8 OLI image using a J48 decision tree. *Sensors (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/s16071075>
- Alesheikh, A. A., Ghorbanali, A., & Nouri, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/BF03325962>
- Álvarez Londoño, J. C. (2017). *Análisis de la interacción entre la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático en el contexto local comunitario Ciénaga de la Zapatosa (Cesar, Colombia)*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/handle/11059/8486>
- Ariza Alexander. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF*.
- Camelo Mendoza, L. M., Martínez Peña, M. L., Ovalle Serrano, H., & Jaimes, V. I. (2016). Conservación ex situ de la vegetación acuática de humedales de la sabana de Bogotá. *Biota Colombiana*, 7(2).
- Castillo, I. M., & Rodríguez, M. Á. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Revista Mutis*, 7(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1183>
- Cruz Santos, I. D. de la, Polledo Domínguez, I., Pérez Alvares, S. D., & Gonzalo Torricella, C. R. (2011). Biblioteca virtual de la EcuRed: nueva fuente de información en la red nacional cubana. *Ciencias de La Información*, 41(1).
- de Alicante, U., Moya, E., Hernández, B. V., & Elizalde Borrell, A. E.; (2005). Investigaciones Geográficas (Esp). *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 127–132. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17612746005>

- Du, Z., Linghu, B., Ling, F., Li, W., Tian, W., Wang, H., Gui, Y., Sun, B., & Zhang, X. (2012). Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the Qingjiang River Basin, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1). <https://doi.org/10.1117/1.jrs.6.063609>
- Instituto Geográfico Nacional. (2019). Instituto Geográfico Nacional. *Ministerio de Fomento de España*, 051001.
- Jain, S. K., Singh, R. D., Jain, M. K., & Lohani, A. K. (2005). Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques. *Water Resources Management*, 19(4). <https://doi.org/10.1007/s11269-005-3281-5>
- Jorge E., P. (2016). Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia. *Biota Colombiana*, 16(3), 85–105. <https://doi.org/10.21068/c2016s01a05>
- Kaplan, G., & Avdan, U. (2017). Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1). <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1297540>
- La economía de las ciénagas del Caribe colombiano. (2011). In *La economía de las ciénagas del Caribe colombiano*. <https://doi.org/10.32468/ebook.664-245-3>
- Medina Lozano, R. M., & Gonzalez, M. (2014). Mapa nacional de humedales de Colombia a escala 1:100.000 por tipología, en las áreas hidrográficas Caribe, Magdalena-Cauca, Pacífico y Orinoco y Amazonas. *Reponame: Repositorio Institucional de Documentación Científica Humboldt*. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9575#.Y5fHmkD52uA.mendele>
- Mejía Ávila, D., Soto Barrera, V. C., & Martínez Lara, Z. (2019). Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia. *Annals of GIS*, 25(3), 231–245. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1617347>
- Ortiz Cogollo, M. I. (2021). *Cambios en los espejos de agua que conforman la depresión Momposina y análisis de sus posibles causas, basados en la interpretación de Imágenes de satélite en el periodo comprendido entre 1997 - 2021*. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4301#.Y4qEwo7i0cA.mendele>
- Parra, A. M., & Hernández T., F. L. (2010). IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE HUMEDALES LÉNTICOS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA MEDIANTE

EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE. (Spanish).
Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente, 9.

- Ramsar. (2015). La Convención de Ramsar. *Ramsar.Org*, 1–3.
- Ramsar. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. *Convención de Ramsar Sobre Los Humedales*.
- Rangel-Ch, J. O., Arellano-P, H., & Garay, H. (2013). ZONIFICACIÓN Y PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA. In *Colombia Diversidad Biótica XIII. Complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del Sur del Cesar: Biodiversidad, conservación y manejo* (pp. 673–707). Universidad Nacional de Colombia - Instituto de Ciencias Naturales - CORPOCESAR.
- Rebelo, L. M., Finlayson, C. M., & Nagabhatla, N. (2009). Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management*, 90(7). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/rs6054173>
- Rover, J., Ji, L., Wylie, B. K., & Tieszen, L. L. (2012). Establishing water body areal extent trends in interior Alaska from multitemporal Landsat data. *Remote Sensing Letters*, 3(7). <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.643507>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindshadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Viloria, J. (2008). Economía extractiva y pobreza en la ciénaga de Zapatosa. *La Economía de Las Ciénagas Del Caribe Colombiano. Capítulo 2. Economía Extractiva y Pobreza En La Ciénaga de Zapatosa. Pág.:54-94, 103, 50–51.* <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/468>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14). <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

- Xu, Y. B., Lai, X. J., & Zhou, C. G. (2010). Water surface change detection and analysis of bottomland submersion-emersion of wetlands in Poyang Lake Reserve using ENVISAT ASAR data. *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science*, 30(SUPPL.).
- Zhang, Z., Lu, H., Zhao, M., Zhao, L., & Zhen, H. (2009). Water body extraction and change detection based on multi-temporal SAR images. *MIPPR 2009: Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications*, 7498. <https://doi.org/10.1117/12.834100>