

Análisis Multitemporal de Cambio en el Espejo de Agua del Río Cusiana Mediante
Procesamiento Digital de Imágenes Landsat

Yeimer Alexander Galindo Coy

Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Dr. Andrés Felipe Carvajal Vanegas

21 de junio de 2021

Resumen

En este trabajo de grado se identificó el cambio en el espejo de agua de agua del río Cusiana, para un área de interés seleccionada en inmediaciones de los municipios de Aguazul, Tauramena y Maní en el departamento de Casanare, con base en la disponibilidad de información y otros criterios de selección. Para lo cual, se realizó el procesamiento digital de cinco imágenes de satélite de la misión Landsat, tomadas en el mes de enero en el periodo comprendido entre los años 1986 y 2021; a fin de observar, extraer y medir el área ocupada por el espejo de agua e identificar su desplazamiento dentro de la zona de interés para posterior análisis multitemporal, de lo cual se destacó un incremento en el área del espejo de agua en el año 2021 con respecto al año 1986, consistente con el caudal medio diario registrado durante el mes de enero del mismo año(IDEAM, n.d.). Sin embargo, fue interesante hallar, que el desplazamiento del espejo de agua del río Cusiana significó tanto la pérdida de banca o cobertura circundante al cauce, como la retoma por parte de esta última para una recuperación de 32.1 ha de cobertura vegetal al final del periodo de estudio.

Palabras clave: teledetección, clasificación de coberturas, espejo de agua, análisis multitemporal

Abstract

In this degree work, the change in the water surface of the Cusiana river was identified for an area of interest selected in the vicinity of the municipalities of Aguazul, Tauramena and Maní in the department of Casanare, based on the availability of information. and other selection criteria. For this, the digital processing was realized by analyzing of five satellite images of the Landsat

mission, it was taken in January between 1986 and 2021. It was carried out in order to observe, extract and measure the area occupied by the water surface, finally the displacement was identified to the area of interest for subsequent multitemporal analysis. An increase in the water surface was highlighted in 2021 compared to 1986. It was consistent with the “average daily flow” (IDEAM, n.d.) registered during January 2021. However, the displacement of the water surface of the Cusiana river was interesting about it meant both the loss of the bank, or surrounding coverage, of the riverbed, as well as the recovery of 32.1 hectares of vegetation cover at the end of the study period.

Keywords: Remote sensing, Land cover classification, waterbody, multi-temporal analysis

Tabla de contenido

1	Introducción	9
2	Marco teórico y Estado del conocimiento	11
2.1	Marco Teórico.....	11
2.1.1	Bandas Espectrales de los Sensores Landsat.....	11
2.1.2	Características de las Coberturas en la Teledetección.....	11
2.1.2.1	Características de la Vegetación en el Espectro Óptico.....	12
2.1.2.2	Características del Suelo en el Espectro Óptico.....	12
2.1.2.3	Características del Agua en el Espectro Visible.....	12
2.1.2.4	El Agua en el Dominio Térmico.....	13
2.1.3	Pre - Procesamiento Digital de Imágenes.....	14
2.1.3.1	Corrección Radiométrica.....	14
2.1.3.2	Corrección Geométrica.....	15
2.1.4	Clasificación No Supervisada.....	15
2.1.5	leyenda Nacional de Coberturas y Metodología CORINE LAND COVER	15
2.2	Estado del Conocimiento	16
3	Objetivos.....	19
3.1	Objetivo General.....	19
3.2	Objetivos Específicos.....	19
4	Metodología.....	20
4.1	Localización del Área de Estudio	20
4.2	Descripción del Área de Estudio.....	21
4.2.1	Aspectos Biofísicos.....	22
4.2.2	Aspectos Socioeconómicos.....	22
4.2.3	Aspectos Ambientales que Impactan el Recurso Hídrico.....	23
4.2.3.1	Cultivos de Arroz.....	23
4.2.3.2	Explotación de Material Pétreo.....	24
4.2.3.3	Explotación Petrolera.....	24
4.2.4	Estaciones Hidrometeorológicas en el Área de Interés	25
4.3	Procedimiento	26
4.4	Pre-procesamiento para Mejoramiento y Realce	28
4.4.1	Corrección de Bandeo:.....	29
4.4.2	Mejoramiento de la Resolución Espacial.....	29
4.4.3	Corrección Atmosférica y/o Realce de las Coberturas	31
4.5	Procesamiento para Identificación de Coberturas – Clasificación No Supervisada	31
4.6	Conversión de Ráster a Polígono.....	32
4.7	Ajustes Adicionales	33

4.8	Procedimiento para la Identificación del Desplazamiento del Espejo de Agua.	33
5	Resultados y Discusión.....	35
5.1	Medición del Área de la Cobertura “Espejo de Agua”.....	35
5.2	Análisis del Cambio en la Cobertura del Espejo de Agua.....	39
5.2.1	Zonas de Interés en la Superposición de los Espejos de agua.....	41
5.2.2	Desplazamiento del Lecho Fluvial o Cauce del río Cusiana en el Periodo de Estudio	43
5.2.3	Pérdida de Cobertura Vegetal por Desplazamiento del Espejo de Agua.....	46
6	Conclusiones.....	48
7	Recomendaciones.....	50
8	Referencias.....	51

Lista de Tablas

Tabla 1 Coordenadas del polígono de área de interés.....	20
Tabla 2 Principales cultivos, por área y producción en el departamento de Casanare	23
Tabla 3 Imágenes de satélite Landsat seleccionadas para el estudio multitemporal	26
Tabla 4. Cambio en el área de la cobertura “espejo de agua del río Cusiana”	36
Tabla 5. Desplazamiento del espejo de agua es un intervalo de tiempo	41
Tabla 6. Desplazamiento total del espejo de agua por en el periodo de estudio, por parcelas ...	44

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Caudal medio diario durante el mes de enero por cada año de estudio	38
Gráfico 2. Día pluviométrico durante el mes de enero por cada año de estudio	38

Lista de Figuras

Figura 1 Firmas espectrales típica para diversas coberturas	14
Figura 2. Leyenda Nacional de coberturas 2010	16
Figura 3. Área de interés seleccionada para el analisis multitemporal	21
Figura 4 Estación Climática Ordinaria en el área de Interés	25
Figura 5 . Estación Limnimétrica en el área de interés.....	25
Figura 6 Diagrama de flujo de la metodología aplicada para el desarrollo del estudio.....	28
Figura 7. Imagen Landsat 7 con error de bandeado.....	29
Figura 8 . Imagen Landsat 7 de 2010 con corrección de error de “bandeado”	29
Figura 9 Layer Stack de bandas multiespectrales Landsat 8	30
Figura 10 Mejoramiento de resolución espacial Landsat 8	30
Figura 11. Layer Stack de bandas multiespectrales Landsat 7	30
Figura 12. Mejoramiento de resolución espacial a imagen Landsat 7 (2002)	30
Figura 13. Corrección atmosférica Landsat 8.....	31
Figura 14. Mejoramiento y realce de las imágenes del sensor Landsat 7 y 5.....	31
Figura 15. Clasificación No Supervisada en las Imágenes de Satélite Landsat	32
Figura 16. Obsérvese sombra de nube clasificada como espejo de agua	33
Figura 17. Obsérvese corrección de la clasificación.....	33
Figura 18. Imagen con corrección de bandeado	35
Figura 19. Área de las coberturas espejo de agua del río Cusiana para el periodo de estudio	36
Figura 20. Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 1986 y 2002.....	39
Figura 21. Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 2002 y 2014.....	40
Figura 22. Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 2014 y 2021	40

Figura 23. Superposición de los espejos de agua del río Cusiana en los años 1986, 2002, 2014 y 2021.....	42
Figura 24. Mapa del desplazamiento del lecho del río en el intervalo 2014 y 2021	43
Figura 25. Mapa de profundidad de flujo. Evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana.....	45
Figura 26. Área cubierta por el lecho del río Cusiana en el periodo 1986-2021, para la parcela N 4.....	45
Figura 27. Pérdida de cobertura vegetal por desplazamiento del cauce del río Cusiana (1986-2021)	47
Figura 28. Expansión de cobertura vegetal por desplazamiento del cauce del río Cusiana (1986-2021)	47

1 Introducción

Se define la teledetección como aquella técnica que permite adquirir datos tomados de la superficie de la tierra por medio de sensores remotos que se hayan orbitando en el espacio o dentro de la atmosfera terrestre, siendo necesario que en el medio exista algún tipo de interacción.(Chuvieco, 1995, p. 45). Esta interacción “supone el origen de un flujo energético detectado por el sensor (y) puede tratarse de un foco externo al sensor en cuyo caso se habla de teledetección pasiva o de un haz emitido por este (teledetección activa)”(Chuvieco, 1995, p. 17). No obstante es una técnica aún en etapa de perfeccionamiento, cuya interpretación depende tanto de la mejora tecnológica de los sensores como de un mayor rigor científico en el análisis de los resultados(Romero, 2006)

En el departamento del Casanare, el río Cusiana, como cauce principal de la subcuenca Cusiana que a su vez es tributaria de la cuenca del río Meta y este de la gran cuenca del río Orinoco(Corporinoquia, 2013, p. 96), nace en el departamento de Boyacá en la cordillera Oriental, desde las quebradas Melgarejo, Las Cañas e Iglesia con una extensión de 506.254 ha y un colector principal de 271 km de longitud.(Corporinoquia & Corpoboyacá, 2015, p. 4) y drena parte de los municipios de Recetor, Chámeza, Tauramena, Aguazul, Maní y una pequeña área de la jurisdicción de Yopal.(Corporinoquia & Corpoboyacá, 2004, p. 8).

Los problemas más representativos del río Cusiana son, que no se cuenta con una infraestructura adecuada para la captación, conducción y manejo de sistemas de riesgo en el desarrollo de proyectos de agricultura, lo cual significa que los canales de derivación son artesanales, sin ningún criterio técnico, lo cual conlleva a la pérdida de oferta hídrica (Corporinoquia & Corpoboyacá, 2015, p. 273). Por otro lado, la explotación pétreo se realiza de

forma desorganizada, con desconocimiento de la legislación que regula la materia, generando modificación del paisaje fluvial y cambios en el flujo de agua en general (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 324), por último, también se ha manifestado por parte de las comunidades que a pesar de los controles, la industria de la explotación de petróleo ha generado contaminación sobre los recursos suelo y agua, además de captaciones excesivas del río Cusiana (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 333). Todo lo anterior genera en la percepción pública que el desarrollo o la expansión de los sectores productivos generan una afectación al recurso hídrico, ocasionando una posible pérdida del espejo de agua a lo largo de las últimas décadas.

En este trabajo se busca identificar el cambio en el espejo de agua del río Cusiana, en un área de estudio determinada por variables biofísicas similares, en un rango de tiempo representativo, teniendo en cuenta la oferta de datos abiertos e imágenes satelitales y si la resolución espacial y radiométrica de las imágenes Landsat resulta apropiada, para finalmente evaluar y analizar el cambio del espejo de agua en el periodo de estudio.

2 Marco teórico y Estado del conocimiento

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se realizó una revisión previa de los contenidos teórico técnicos relacionados con la teledetección, así como las metodologías aplicadas para el desarrollo de otros proyectos o estudios similares ya sea en el área de interés o externos.

2.1 Marco Teórico

A continuación, se relacionan los aspectos técnicos y teóricos que soportan el desarrollo metodológico del presente trabajo de grado:

2.1.1 *Bandas Espectrales de los Sensores Landsat.*

Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro.(Chuvieco, 1995, p. 93). El sensor OLI-TIRS de Landsat 8 cuenta con nueve bandas espectrales incluyendo una banda pancromática y dos bandas térmicas; captura datos con resolución radiométrica de 12 bits re-escalados a 16 bits en el producto de descarga (USGS, n.d.-b). El sensor ETM+ de Landsat 7 cuenta con siete bandas espectrales, una banda pancromática, tiene una resolución espectral de 8 bits (USGS, n.d.-a)., mientras que los productos del sensor TM de Landsat 5 no tienen una banda pancromática.

2.1.2 *Características de las Coberturas en la Teledetección.*

Hay factores que influyen en el porcentaje de reflectancia que una cobertura puede emitir, por la composición en si misma o su estructura como por factores externos, que se describen a continuación:

- 2.1.2.1 Características de la Vegetación en el Espectro Óptico.** En el caso de la vegetación, la clorofila, la humedad y la vigorosidad o senescencia regulan la cantidad de energía reflejada en las distintas bandas del espectro electromagnético, permitiendo obtener diferenciaciones o características de la porción de cobertura de acuerdo a la firma espectral, observándose una mayor reflectancia en la banda roja y NIR cuando “se aproxima la caída otoñal de las hojas (y) la clorofila ejerce una menor influencia”(Chuvieco, 1995, p. 65)
- 2.1.2.2 Características del Suelo en el Espectro Óptico.** En este tipo de cobertura, la reflectividad está ampliamente relacionada con la textura, la composición química y el contenido de humedad, siendo más fácil identificar suelos desnudos que aquellos con algún tipo de cobertura vegetal. Aunque en el estudio de la geobotánica se plantea, a la inversa, la incidencia de la composición del suelo en el tipo de vegetación, densidad y coloración no “resulta sencillo obtener información del sustrato geológico a partir de sensores espaciales”(Chuvieco, 1995, p. 66). “Un suelo arcilloso generalmente se conforma de un alto contenido de humedad y una estructura fuerte, lo que supone una baja reflectividad, por el contrario, un suelo arenoso que posee un bajo contenido de humedad y una estructura débil presenta una reflectividad más elevada” (Chuvieco, 1995, p. 68).
- 2.1.2.3 Características del Agua en el Espectro Visible.** A diferencia de la cobertura suelo, el agua presenta una mayor absorción o trasmisión de la energía, por lo que la mayor reflectividad del agua clara se produce en el espectro visible en la franja azul, pero decae en el infrarrojo donde es prácticamente nula. “Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda” (Chuvieco, 1995, p.

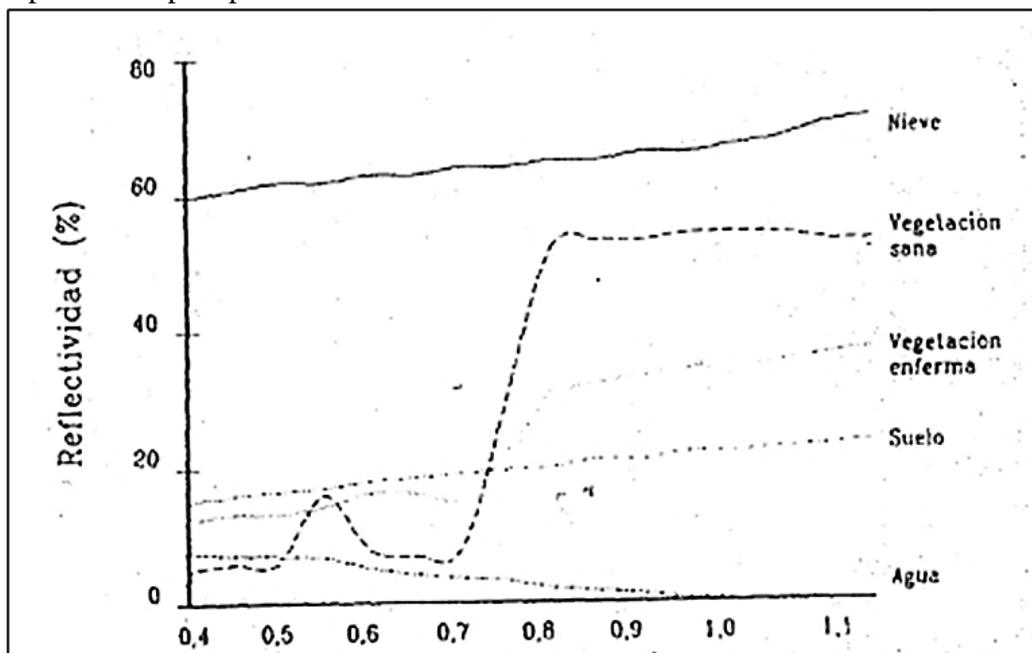
68). Según el mismo autor, en diversos estudios se ha podido concluir que es posible identificar presencia de algas y procesos de eutrofización en lagos haciendo uso de la teledetección considerando el aumento en la respuesta espectral de la clorofila, así como cualquier cambio en la composición dado que típicamente esta generara una reflectividad mayor a la del agua. En resumen, la diferenciación de una cobertura de agua de una de suelo, se obtiene en la observación de la banda infrarroja del espectro, donde la reflectividad del agua es baja pero la emitancia es cercana a 1. (Chuvieco, 1995, p. 71)

2.1.2.4 El Agua en el Dominio Térmico. Dadas las apreciaciones anteriores sobre la relación entre la cobertura y la reflectancia o emitancia, se puede deducir que el agua posee inercia térmica, es decir, absorbe y transmite o emite la mayor cantidad de energía incidente por lo que se resiste a cambiar de temperatura. Esta propiedad permite encontrar puntos de convergencia de aguas de distintas fuentes, para reconocer vertimientos (Chuvieco, 1995, p. 75).

En la Figura 1 se observa el comportamiento de la reflectividad de las coberturas en las distintas longitudes de onda del rayo incidente, observándose una baja reflectividad para la cobertura de agua que tiende a decaer hasta desaparecer en el infrarrojo cercano.

Figura 1

Firmas espectrales típica para diversas coberturas



Fuente. (Chuvieco, 1995, p. 59).

2.1.3 Pre - Procesamiento Digital de Imágenes.

El objetivo del preprocesamiento es una mejora de los datos de la imagen que suprime las distorsiones involuntarias o mejora algunas características de la imagen, importantes para el procesamiento posterior. (Sonka et al., 1993, p. 56)

2.1.3.1 Corrección Radiométrica. Es la técnica que modifica los niveles digitales originales a fin de acercarlos a lo que se podría ver en la imagen, en caso de una captura de datos ideal (Chuvieco, 1995, p. 242). Es parte del preprocesamiento de la imagen, la cual requiere de la corrección de inconsistencias a nivel radiométrico como el bandeo, pérdida de píxeles o corrección atmosférica. Con la aplicación de estos correctivos se pretende obtener una imagen más clara o definida. Para recuperar los píxeles perdidos o los errores de bandeo la forma más lógica es estimar sus ND en relación de los ND vecinos, como es el caso de

las imágenes de Landsat 7 que desde el 31 de mayo de 2003, el Corrector de línea de exploración (SLC), que compensa el movimiento hacia adelante del satélite, falló, trazando “un patrón en zigzag a lo largo de la trayectoria terrestre del satélite” como se indica en la pagina web oficial del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, n.d.-a)

2.1.3.2 Corrección Geométrica. En este caso haciendo uso de programas informáticos se busca ajustar la imagen a la realidad identificando puntos de control específicos que perduren en el tiempo como referencia.

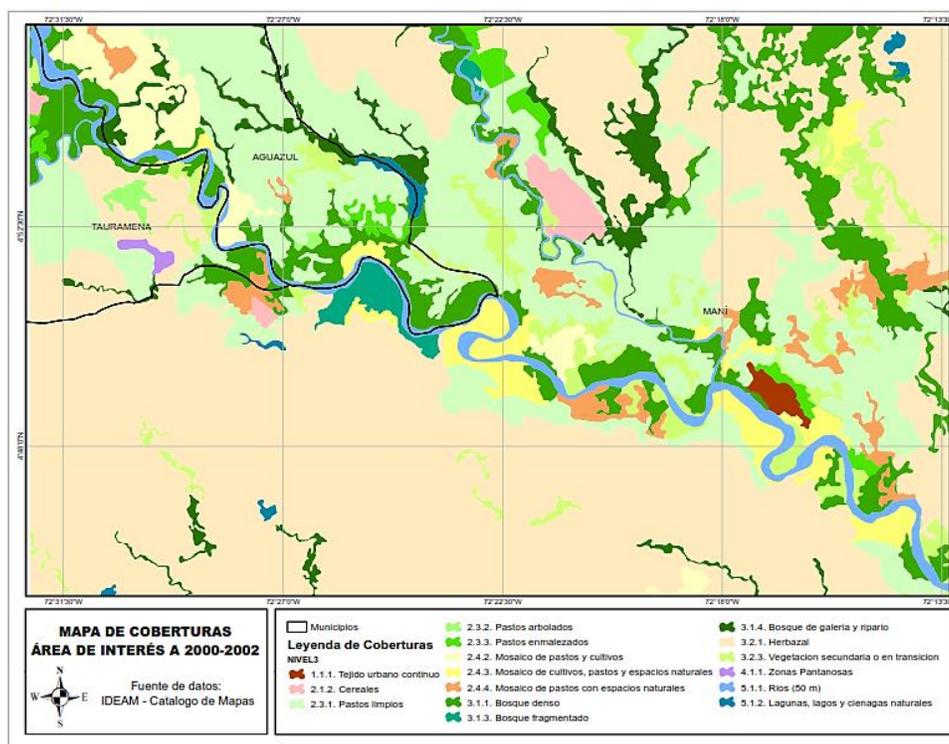
2.1.4 Clasificación No Supervisada

El método de clasificación de coberturas “no supervisado” parte de una imagen con agrupaciones más o menos nítidos, para finalmente definir las clases temáticas de interés (Chuvienco, 1995, p. 336).

2.1.5 leyenda Nacional de Coberturas y Metodología CORINE LAND COVER

Este documento es una metodología de caracterización de las coberturas naturales y antrópicas en el territorio nacional que proporciona características temáticas que en desarrollo de protocolo europeo CORINE LAND COVER permite realizar un reconocimiento de los recursos naturales, los usos del suelo y sus cambios en el tiempo. (IDEAM, 2010). Para la selección de coberturas se cuenta con el mapa de coberturas de la tierra 2000-2002 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Figura 2).

Figura 2.
Leyenda Nacional de coberturas 2002-2010



Fuente. Elaboración del autor a partir de datos generados por (IDEAM, 2002).

2.2 Estado del Conocimiento

En el campo de los análisis multitemporales haciendo uso de la teledetección se han hecho múltiples identificaciones de cambios de coberturas ya sea en vegetación, suelo o agua, que han permitido identificar patrones, causas y consecuencias por medio del procesamiento digital de imágenes satelitales compartidas en servidores de datos abiertos, aplicando las técnicas más convencionales del procesamiento digital.

En el año 2015 se realizó un análisis multitemporal del espejo de agua en la laguna de Fúquene, en el municipio del mismo nombre, para un intervalo comprendido entre 1985 y 2015, en el cual se procesaron cinco imágenes satelitales, con una periodicidad de 15 años, tomadas en época seca (febrero) por el programa espacial Landsat, obteniéndose una identificación

significativa del cambio en el espejo de agua; observable y medible mediante una herramienta del software ERDAS IMAGINE para la detección de cambios.(González & González, 2016)

Posteriormente en el año 2018, en el sector de Puerto Salgar - La Dorada se hizo un análisis multitemporal de un tramo de 23.6 kilómetros del cauce del río Magdalena en un rango de tiempo del 2016 al 2018, en el que se procesaron dos imágenes de satélite, tomadas por el sensor SENTINEL 1, se obtuvo una visualización tipo vector (polígonos) de la cobertura de agua con el que pudo identificarse un cambio en el cauce al medir el desplazamiento del meandro (Barragan, 2018). Se observa que la técnica de medición aplicada es bastante útil si lo que se quiere observar es un cambio en el cauce para elaborar modelos de inundación o proyectar obras de estabilización de laderas.

En cuanto a la subcuenca denominada río Cusiana, objeto de estudio del presente análisis multitemporal, no se halla en las fuentes consultadas, ningún documento que pretenda identificar o describir un cambio, variación o modificación en el espejo de agua o modificación del cauce en ningún periodo. El estudio más relacionado con el corredor del río Cusiana hace referencia a la prospección de un proyecto hidroeléctrico en 1984, cuando la electrificadora de Boyacá financió un estudio de prefactibilidad en cuya evaluación de impacto ambiental se contempla la afectación de la ictiofauna y la afectación a la química del agua, pero no se resalta una proyección negativa del suministro de agua que afecte la demanda del recurso por parte de las poblaciones localizadas aguas abajo de los puntos de represamiento proyectados, sino que recomienda “estudiar el rendimiento de cada una de las subcuencas para que, con base en los resultados, se pueda determinar el caudal requerido (por las comunidades) el cual sería aconsejable no captar en los proyectos” (Electrificadora de Boyacá S.A, 1982), lo que permite

inferir que el caudal de la época facilitaba el desarrollo del proyecto, aun manteniendo el caudal ecológico del río Cusiana.

Por otra parte, en 2012 Fonseca aborda los efectos de la deforestación de la selva nublada sobre la dinámica hídrica en la cuenca del río Cusiana, en el que concluye que “la conversión de la selva nublada en pastizales, tiene un efecto negativo sobre la dinámica hídrica en cuanto a la escorrentía superficial, ya que desde el punto de vista ecosistémico comparativo, la selva nublada permite observar la sustentabilidad de dicha escorrentía al interior de la selva, que se puede extrapolar a nivel cuenca en una regulación de los flujos hídricos y estabilidad de laderas al no existir picos altos de escorrentía, al contrario de lo que sucede en los pastizales”(Fonseca Peralta, 2012) .

En relación con el riesgo de inundación y gestión del riesgo, en 2018, se realizó una evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana en la zona urbana del municipio de Maní, departamento de Casanare, en la cual se identifican áreas de inundación analizando los meses de mayor precipitación, siendo estos a partir del mes de abril en cada año, mientras que de enero a marzo se observan valores típicos de caudal para el río Cusiana en época de estiaje, el cual cuenta con un modelado hidráulico que identifica como áreas de inundación de hasta dos metros de lámina de agua el sector de El Muelle, la vereda Belgrado y parte del casco urbano del municipio de Maní (Durán & Ramirez, 2018)

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el cambio en el espejo de agua del río Cusiana en un área de interés entre los municipios de Aguazul, Tauramena y Maní del departamento de Casanare para el periodo comprendido entre 1986 y 2021.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar la cobertura del espejo de agua del río Cusiana en el tramo definido como objeto de estudio para el periodo 1986-2021
- Analizar los cambios en las áreas del espejo de agua para el periodo 1986 y 2021

4 Metodología

4.1 Localización del Área de Estudio

Para localizar el área de estudio, dado que el propósito es identificar una única cobertura correspondiente al espejo de agua del río Cusiana y teniendo en cuenta que la resolución espacial de las imágenes Landsat es de 30 metros en las bandas multiespectrales y 15 metros en la banda pancromática, fue pertinente seleccionar un área en el que se consolide un flujo único (preferiblemente) con un ancho del espejo de agua superior a los 15 metros. Por otra parte, el yacimiento de petróleo Cupiagua, descubierto en el año de 1993 tiene una reserva estimada de 510 millones de barriles, cuyos campos de explotación se distribuyen en la cuenca del río Cusiana en los municipios de Aguazul, Maní y Tauramena. (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 325).

Teniendo en cuenta los criterios de selección del área de interés, descritos anteriormente, se determinó que, en el departamento de Casanare, estas características se observan en el área dentro de las coordenadas geográficas del sistema de proyección WGS UTM Zona 18 que se describe en la Tabla 1, seleccionando así como objeto de estudio, un tramo de 47 kilómetros del río Cusiana.

Tabla 1

Coordenadas del polígono de área de interés.

	NORTE	OESTE
	4,904612	-72,511815
	4,804522	-72,512163
	4,904164	-72,278743
	4,803921	-72,279096

Fuente: Autor

A partir de los criterios de selección descritos anteriormente y haciendo uso del mapa base de ESRI, se obtiene el área de interés que se observa en la Figura 3.

Figura 3.

Área de interés seleccionada para el análisis multitemporal



Fuente: Elaboración del autor a partir de un Mapa Base de (ESRI)

4.2 Descripción del Área de Estudio

El río Cusiana nace en el flanco oriental de la cordillera del mismo nombre en el departamento de Boyacá desde las quebradas Melgarejo, Las Cañas e Iglesia y se desplaza hasta adentrarse en el departamento de Casanare donde converge con los ríos Caja y Upamena. “El 87% del territorio de la cuenca del río Cusiana, se extiende sobre el departamento de Casanare, recorriendo los municipios de Chámeza, Recetor, Yopal, Aguazul, Tauramena y Maní” (Corporinoquia & Corpoboyacá, 2015, p. 5). El área de interés está totalmente incluida en el territorio de la cuenca.

Por otra parte, en relación a la hidrología, Corporinoquia mediante resolución 200.41-10.1396 de 2010 relaciona que el caudal medio del río Cusiana, registra los valores más bajos en la estación del IDEAM de Maní Casanare en 5,0 m³/s, en el mes de febrero, así también los valores más altos en 522,8 m³/s en el mes de julio (Por Medio de La Cual Se Regula El Uso y Aprovechamiento Del Recurso Hídrico En El Rio Cusiana, 2010).

4.2.1 Aspectos Biofísicos

La zona de interés limita con la zona de mediana montaña, mediante la formación de un abanico aluvial relativamente reciente, con pendientes no mayores al 7%. La zona del piedemonte comprende superficies más altas que las llanuras aluviales de desborde por lo que se encuentra bien drenada (Corporinoquia, 2013, p. 85). En el departamento de Casanare de forma generalizada la cobertura vegetal ha sido destruida por actividad antrópica por lo que coexisten formaciones arbóreas y arbustivas dispersas dentro de amplias coberturas herbáceas, las pocas agrupaciones de bosque que aún se observan son evidencia de lo que fuera una frondosa vegetación selvática tropical (Corporinoquia, 2013, p. 106)

4.2.2 Aspectos Socioeconómicos

A nivel regional, el departamento de Casanare presenta una gran dependencia del petróleo, siendo el sector económico más importante de la región a nivel monetario y el segundo departamento con mayor producción de hidrocarburos.(Corporinoquia, 2013, p. 61)

En relación a la agricultura, esta se realiza de forma comercial y tecnificada en la zona de piedemonte elevando su producción a través de un incremento en las áreas dispuestas para

siembra (Corporinoquia, 2013, p. 62). La Tabla 2 muestra un incremento progresivo en las áreas cultivadas con arroz de riego y palma de aceite entre el año 2000 y 2011.

Tabla 2

Principales cultivos, por área y producción en el departamento de Casanare

PRODUCTO	2000	2005	2011
	ÁREA (ha)	ÁREA (ha)	ÁREA (ha)
ARROZ SECANO MECANIZADO	31.521	44.458	60.552
ARROZ RIEGO	27.378	20.844	37.778
PALMA DE ACEITE	8.782	11.140	22.232
PLATANO	2.200	2.263	2.929
SOYA	500	300	458
CAÑA MIEL	1.024	951	296

Nota: Elaboración propia con base en el PGAR 2013 (Corporinoquia, 2013, p. 63)

4.2.3 Aspectos Ambientales que Impactan el Recurso Hídrico

Teniendo en cuenta los sectores productivos más marcados en la región, se han identificado diversos aspectos a nivel medioambiental que inciden sobre el recurso hídrico (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015)

4.2.3.1 Cultivos de Arroz. Uno de los problemas más representativos del cultivo de arroz en relación al recurso hídrico es que no se cuenta con una infraestructura adecuada para la captación y derivación de agua desde las fuentes hídrica que regule el caudal, sino que se han construido canales artesanales sin ningún criterio técnico que han generado problemas de erosión, sedimentación y derivaciones del flujo natural del agua (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 273). Como se observa en el Tabla 2, aunque se ha tratado de implementar otro

tipo de cultivo de arroz, la producción tradicional ha seguido creciendo de forma exponencial.

4.2.3.2 Explotación de Material Pétreo. El material sedimentado en el delta de los ríos cuando la velocidad de flujo disminuye, es regularmente explotado para el desarrollo del sector de la construcción. El problema con esta explotación radica en “el desconocimiento de la legislación que regula la materia y la falta de claridad en la región con respecto a las competencias de los entes territoriales, entidades regionales y el gobierno central y a la falta de autoridad por parte de las administraciones locales.” (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 324). Lo anterior se traduce en una explotación no controlada de dicho recurso ocasionando la modificación del paisaje fluvial. En consecuencia y para los fines del presente estudio, esta situación puede influir directamente en el área del espejo de agua, dando una percepción errada de pérdida o incremento del recurso hídrico, si se evalúa esta variable de forma independiente.

4.2.3.3 Explotación Petrolera. En el año 1987 la Compañía British Petroleum Exploration (BP) inició procesos de exploración y perforación descubriendo en 1989 el yacimiento de petróleo más grande de Colombia hasta la fecha en la cuenca del río Cusiana (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 325). Si bien existe una amplia legislación de control y seguimiento, son las comunidades quienes manifiestan afectaciones medioambientales y sociales por parte de esta industria por contaminación del suelo y uso inapropiado del recurso hídrico (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, p. 333). Adicionalmente, un estudio desarrollado para investigar el efecto de diferentes niveles de petróleo en la

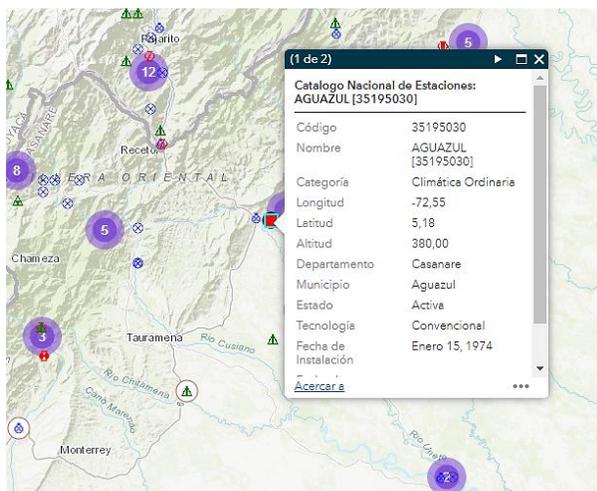
generación de escorrentía y el rendimiento de sedimentos, confirmó un efecto significativo de los derivados de petróleo en el aumento de la pérdida de suelo por disminución de la capacidad de infiltración o aumento de la hidrofobia (Mohammadi et al., 2018).

4.2.4 Estaciones Hidrometeorológicas en el Área de Interés

El instituto de Hidrología, ‘Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas que aportan información de diversos parámetros climáticos en diversos periodos. Dentro del área objeto de estudio se cuenta con una estación de categoría ‘Limnimétrica’ instalada desde septiembre 15 de 1993, que registra el caudal del río Cusiana y una estación climática en el casco urbano del municipio de Aguazul que registra entre otras variables el *Día Pluviométrico*.

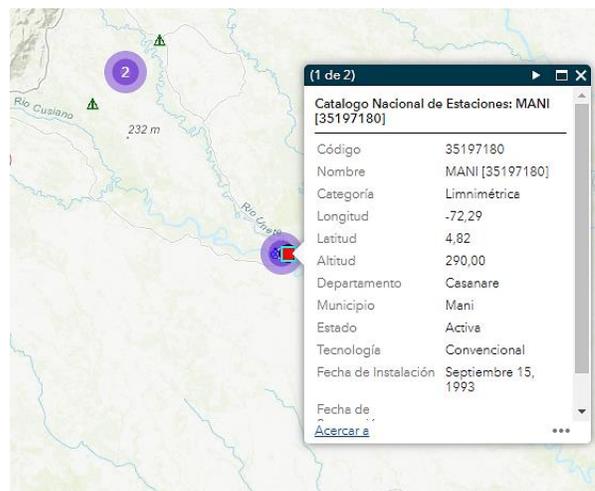
En la Figura 4 y Figura 5 se observan los datos de identificación de las estaciones hidrometeorológicas cercanas o dentro del área de interés, seleccionadas para la obtención de los registros de precipitación y caudal necesarios para la discusión de los resultados.

Figura 4
Estación Climática Ordinaria en el área de Interés



Fuente: (IDEAM, n.d.)

Figura 5
. Estación Limnimétrica en el área de interés



Fuente: (IDEAM, n.d.)

4.3 Procedimiento

Para el análisis de cambio en el espejo de agua del río Cusiana se hizo uso de cinco imágenes del satélite Landsat, cuya resolución espacial y espectral permiten la identificación de la cobertura de interés. Las imágenes seleccionadas fueron aquellas tomadas en época seca durante el mes de enero a fin de contar con la mayor visibilidad posible de la cobertura, además de que no se hayan presentado lluvias recientes a la fecha de captura de la imagen que dificulten el análisis de los resultados.

En la Tabla 3 se enlistaron las imágenes de satélite usadas para el desarrollo del estudio, generadas por las misiones Landsat 5, 7 y 8. Se realizó un preprocesamiento mediante el software ERDAS IMAGINE, que incluyó la re-proyección de las bandas con resolución espacial de 30 m a 15 metros, un re-escalamiento de la resolución radiométrica a 8 bits a fin de manejar una misma escala del nivel digital (ND) en todas las imágenes de estudio y posteriormente se realizó la corrección atmosférica y/o realce de las imágenes según fue necesario, para finalmente llegar al procesamiento y análisis de los resultados.

Tabla 3

Imágenes de satélite Landsat seleccionadas para el estudio multitemporal

N	Misión	Sensor	Fecha de Adquisición	Resolución radiométrica	Resolución espacial	
					Multiespectral	Pancromática
1	Landsat 5	TM	13/01/1986	8 bits	30 metros 120 metros-B6	NR
2	Landsat 7	ETM+	17/01/2002	8 bits	30 metros 60 metros-B6	15 metros
3	Landsat 7	ETM+	23/01/2010	8 bits	30 metros 60 metros-B6	15 metros
4	Landsat 8	OLI_TIRS	10/01/2014	16 bits	30 metros	15 metros
5	Landsat 8	OLI_TIRS	29/01/2021	16 bits	30 metros	15 metros

Fuente: Elaboración propia a partir de la inspección del geo servidor del (USGS, n.d.-a)

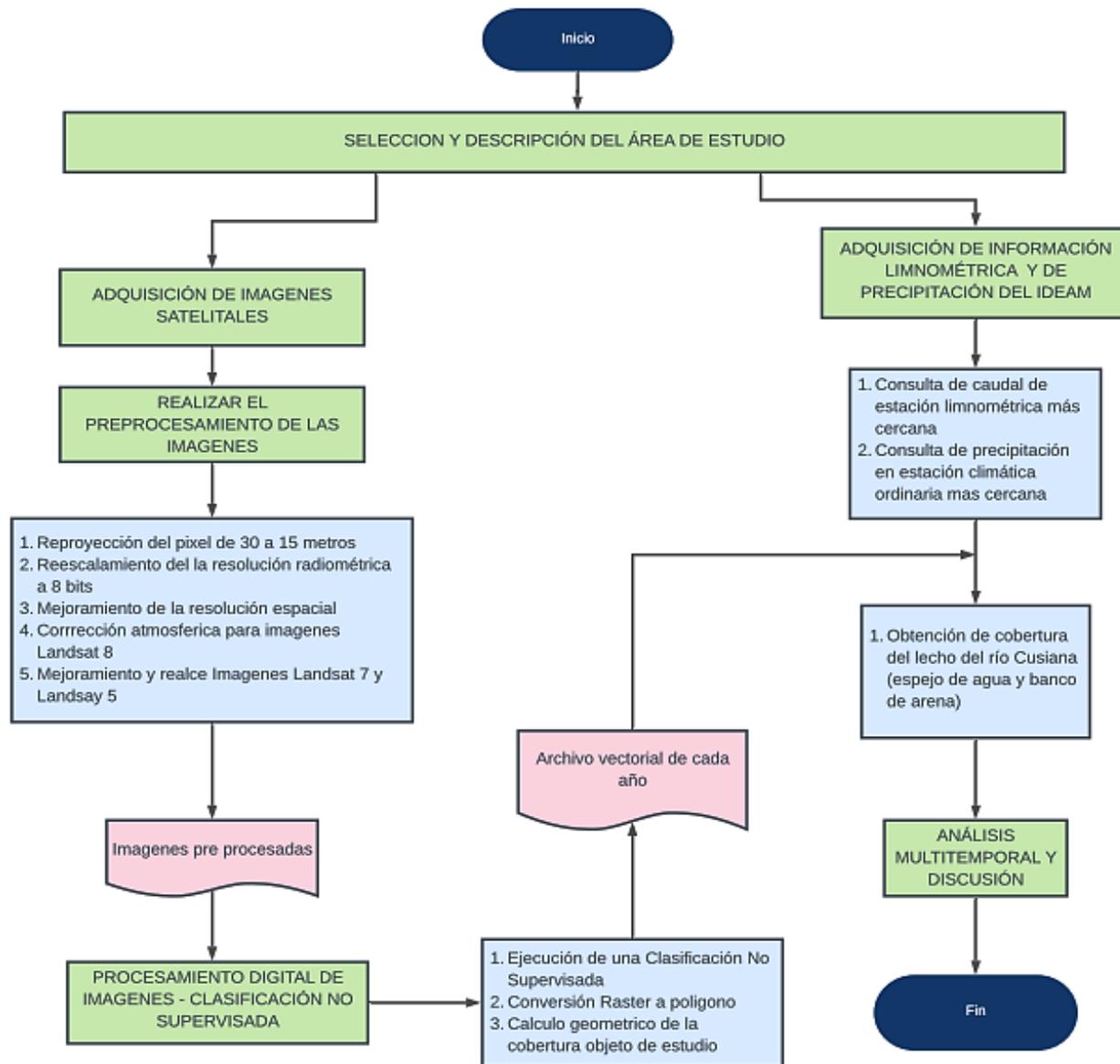
Se elaboró también un diagrama de flujo, donde se describen las actividades a desarrollar para el logro de los objetivos (Figura 6)

Los programas utilizados para el desarrollo del proyecto fueron:

- ArcGIS 10.7, para obtener un mejoramiento en la resolución espacial de las imágenes satelitales de Landsat 8, las cuales incluyen una banda pancromática, haciendo uso de la herramienta (PanSharp)
- ERDAS IMAGINE 2014, para efectuar el mejoramiento de la resolución espacial de las imágenes de la misión Landsat 7, así la corrección radiométrica, mejoramientos, realces y/o corrección atmosférica.
- QGIS para corrección de error de bandeo en imágenes Landsat 7
- Microsoft Office.

Figura 6

Diagrama de flujo de la metodología aplicada para el desarrollo del estudio



Fuente: Autor

4.4 Pre-procesamiento para Mejoramiento y Realce

En primer lugar, se realizó un apilamiento de las diferentes bandas espectrales de cada imagen que tienen una misma resolución espacial. Todas las imágenes ya vienen corregidas geométricamente y con sistema de proyección de coordenadas UTM WGS North 84 Zona 18.

Con respecto a la resolución espectral se mantuvo la magnitud de las imágenes de los sensores

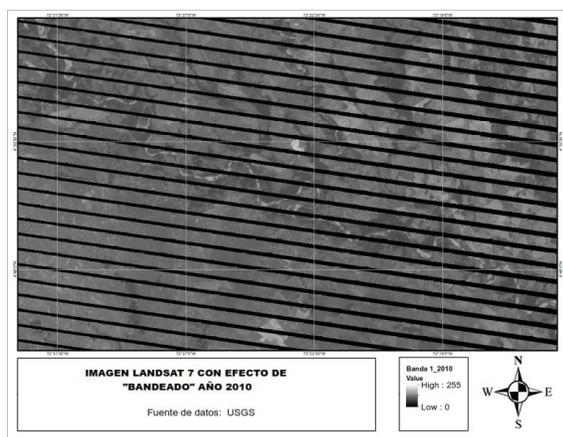
Landsat 7 y 5, es decir 8 bits, por lo que las imágenes del sensor Landsat 8 se les aplicó un *rescale* que es una herramienta de corrección radiométrica del software ERDAS.

4.4.1 Corrección de Bandeado:

Teniendo en cuenta que las imágenes capturadas por el sensor ETM+ de Landsat 7, a partir de 2003 adquirió y entregó datos con un error de bandeado causado por la falla del *Scan Line Corrector* (USGS, n.d.-a), se realizó una corrección de las bandas espectrales de la uno a la cinco y la banda pancromática, haciendo uso de la herramienta de procesamiento *rellenar sin datos* del software QGIS y los archivos *Gap File* descargados junto con la imagen. Se obtuvo un producto corregido con una interpolación de los niveles digitales que permitió visualizar la imagen (Figura 7).

Figura 7.

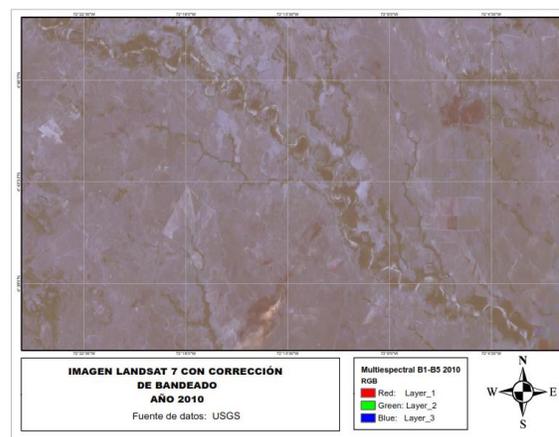
Imagen Landsat 7 con error de bandeado



Fuente. Autor

Figura 8

. Imagen Landsat 7 de 2010 con corrección de error de “bandeado”



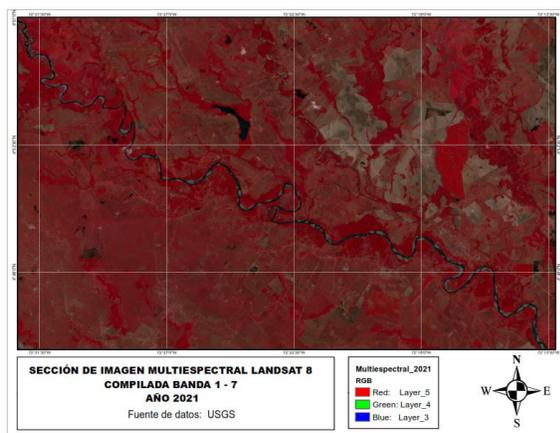
Fuente. Auto

4.4.2 Mejoramiento de la Resolución Espacial

Con la herramienta de ArcMap, GEOIBA- LANDSAT 8 se realizó el *Pansharpened* de las bandas multiespectrales y la banda pancromática a las imágenes tomadas por el sensor OLI-TIRS de la misión Landsat 8 como se visualiza en la Figura 9. Para las imágenes capturadas por el sensor

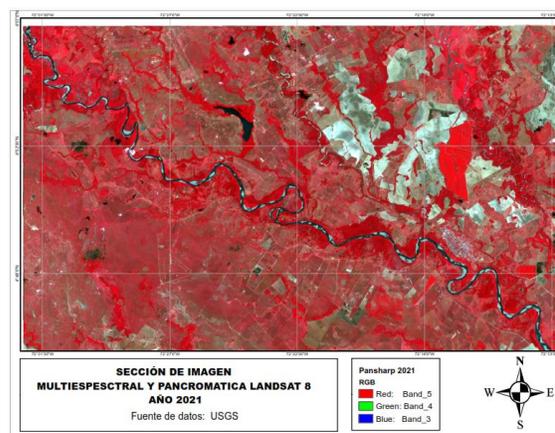
ETM+ de Landsat 7, se utilizó la herramienta *HPF Resolution Merge* de ERDAS obteniendo un mejoramiento de la resolución espacial de 30 a 15 metros (Figura 11). No obstante, la imagen del sensor TM de Landsat 5 carece de la banda pancromática por lo cual no fue posible mejorar su resolución espacial.

Figura 9
Layer Stack de bandas multiespectrales
Landsat 8



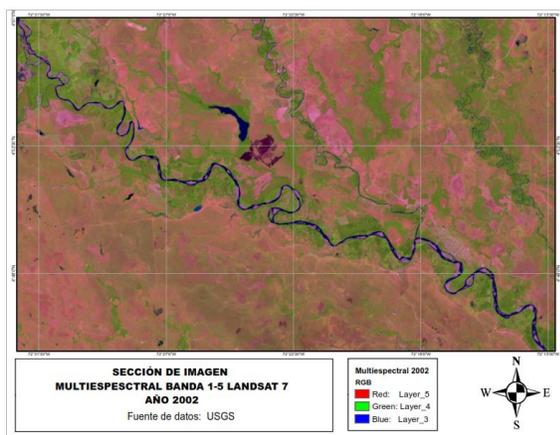
Fuente: Autor

Figura 10
Mejoramiento de resolución espacial
Landsat 8



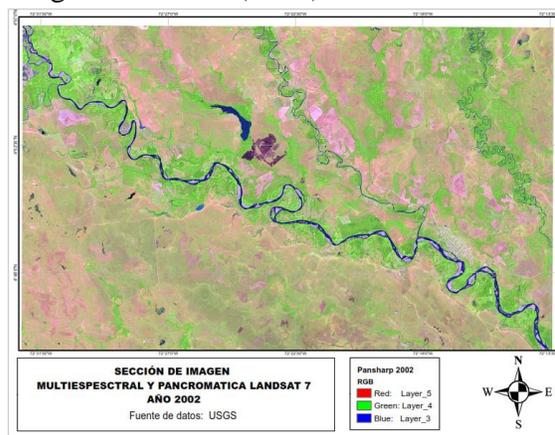
Fuente: Autor

Figura 11.
Layer Stack de bandas multiespectrales
Landsat 7



Fuente: Autor

Figura 12.
Mejoramiento de resolución espacial a
imagen Landsat 7 (2002)

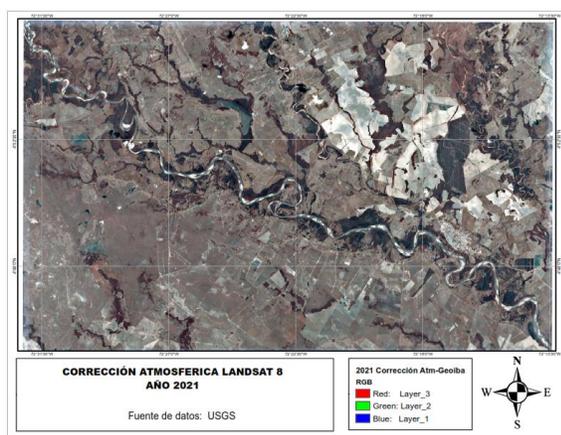


Fuente: Autor

4.4.3 Corrección Atmosférica y/o Realce de las Coberturas

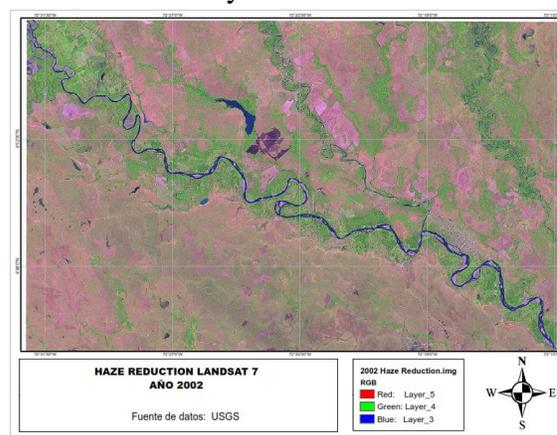
Para las imágenes del sensor OLI-TIRS se realizó corrección atmosférica haciendo uso de la herramienta ATCOR de ERDAS obteniendo el producto de la Figura 13. A las imágenes tomadas por el sensor ETM+ de Landsat 7 y MSS de Landsat 5, se les realizó un realce de las coberturas reduciendo la neblina con la herramienta *Haze Reduction* del mismo software, obteniendo un realce visual de las coberturas como se observa en la Figura 14.

Figura 13.
Corrección atmosférica Landsat 8



Fuente: Autor

Figura 14.
Mejoramiento y realce de las imágenes del sensor Landsat 7 y 5



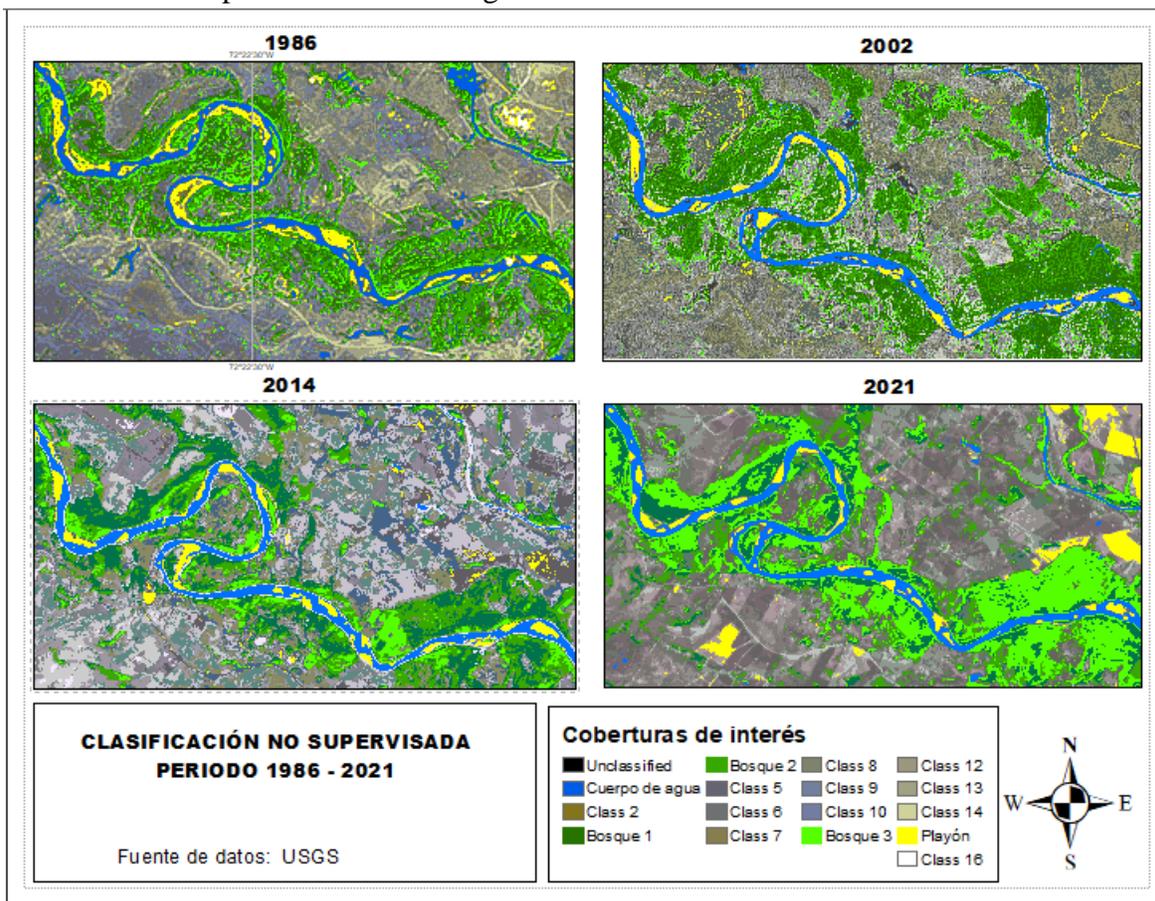
Fuente: Autor

4.5 Procesamiento para Identificación de Coberturas – Clasificación No Supervisada

Teniendo en cuenta que el objeto de estudio del presente trabajo es el río Cusiana, no se consideró estrictamente necesario obtener la identificación de todas coberturas, sino aquellas correspondientes al espejo de agua y las coberturas que le rodean, como el banco de arena y la ribera. Dado esto, se utilizó la herramienta de clasificación *Unsupervised classification* de ERDAS con 16 clases a fin de extraer la clasificación de las coberturas: Ríos y bosque denso, relacionados de la Leyenda Nacional de Coberturas 2010 (Figura 2). Se pudo obtener también la cobertura correspondiente al banco de arena en el cauce del río Cusiana (Figura 15).

Figura 15.

Clasificación No Supervisada en las Imágenes de Satélite Landsat



Fuente: Autor.

4.6 Conversión de Ráster a Polígono

Mediante el paquete de herramientas *Conversion Tools* de ArcMap, a partir de la clasificación previa, se obtuvo un archivo vectorial tipo polígono sin suavizado de bordes, a fin de mantener las características más aproximadas a la cobertura seleccionada, luego se extrajeron los polígonos de la capa correspondientes al espejo de agua y banco de arena. De esta manera, haciendo uso de la herramienta *Calculator Geometry* se obtuvo el área del espejo de agua del río Cusiana para cada una de las imágenes objeto de estudio y posteriormente mediante el paquete de herramientas *Analysis Tools* del mismo software, se logró identificar el desplazamiento del espejo de agua para posterior análisis.

4.7 Ajustes Adicionales

Se realizó además una revisión de la cobertura extraída a fin de que se estuviese incluido solo lo correspondiente a las coberturas de interés. En la Figura 16 se observa una parte de la imagen satelital de 1986 con una composición de color *False Natural Color*, en la que se identificó que la clasificación aplicada previamente por el software ERDAS, incluyó la sombra de una nube sobre el flanco derecho del río Cusiana como parte del espejo de agua, por lo que se realizó un barrido de toda la cobertura en busca de estas inconsistencias para descartar dichas áreas mediante la edición de los polígonos (Figura 17).

Figura 16.

Obsérvese sombra de nube clasificada como espejo de agua



Fuente. Autor.

Figura 17.

Obsérvese corrección de la clasificación



Fuente. Autor

4.8 Procedimiento para la Identificación del Desplazamiento del Espejo de Agua.

Para determinar la pérdida en la cobertura vegetal circundante, se tomó como referencia el desplazamiento, es decir el área no interceptada, relacionando las coberturas del espejo de agua y banco de arena, las cuales al superponerse mostraron la pérdida y ganancia de cobertura circundante por ocupación del río u ocupación del banco de arena al final del periodo de estudio. Lo anterior fue posible haciendo uso de la herramienta *Eraser* de ArcMap, aplicando la siguiente relación entre las coberturas:

- Desplazamiento del espejo de agua = $CR_{2021} \cap CR_{1986}$
- CP = Cobertura de banco de arena (playa)
- CR = Cobertura de río
- PR = Pérdida de Ribera (cobertura circundante al lecho del río)
- ER = Expansión de Ribera (cobertura circundante al lecho del río)

$$CR_{2021} - (CR_{2021} \cap CR_{1986}) - (CR_{2021} \cap CP_{1986}) = PR_1$$

$$CP_{2021} - (CP_{2021} \cap CR_{1986}) - (CP_{2021} \cap CP_{1986}) = PR_2$$

$$PR = PR_1 + PR_2$$

Luego, tomando como referencia las coberturas de 1986 se determinó el área que estas cedieron a la cobertura circundante al no estar ocupadas por el banco de arena o el espejo de agua al final del periodo de estudio. Básicamente, se ejecutó el procedimiento anterior en orden inverso para determinar la expansión de la ribera por desplazamiento del lecho del río desde 1986, aplicando la siguiente relación entre las coberturas:

$$CR_{1986} - (CR_{1986} \cap CR_{2021}) - (CR_{1986} \cap CP_{2021}) = EP_1$$

$$CP_{1986} - (CP_{1986} \cap CR_{2021}) - (CP_{1986} \cap CP_{2021}) = EP_2$$

$$ER = EP_1 + EP_2$$

La diferencia entre estos resultados permitiría identificar si por efecto del desplazamiento del espejo de agua y del lecho del río en general se presentó una ganancia o una pérdida de banca o cobertura circundante, señalada en la leyenda nacional de coberturas como bosque denso.

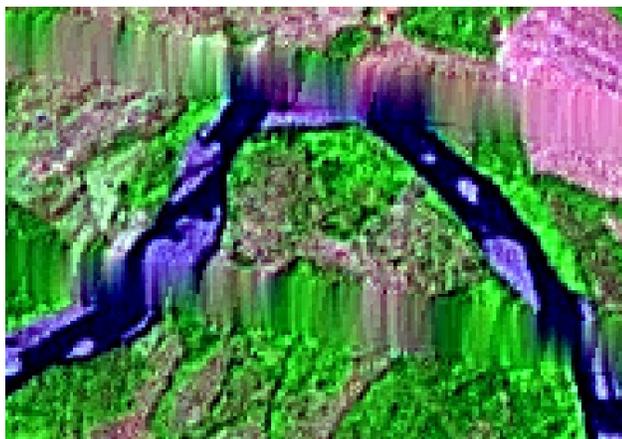
5 Resultados y Discusión

5.1 Medición del Área de la Cobertura “Espejo de Agua”

Dada la deformación de la imagen de satélite N 3 (Tabla 3), al corregir el error de bandeo con el que vienen algunas imágenes satelitales del sensor ETM+ de Landsat 7, no fue posible realizar una clasificación de coberturas que permita una identificación de la frontera suelo-agua con la certeza necesaria ya que se generó un producto con una considerable distorsión, por lo que esta imagen no formó parte del análisis de resultados en el presente estudio (Figura 18).

Figura 18.

Imagen con corrección de bandeo



Fuente: Autor

Se obtuvo la cobertura correspondiente al espejo de agua de cada imagen satelital objeto de estudio y se halló que el año de mayor expansión de la cobertura “espejo de agua”, fue el año 2021, mientras la menor cobertura se observa al inicio del periodo de estudio. Se observó entonces, una tendencia a incrementarse el área del espejo de agua a lo largo del periodo de estudio, hallándose una mayor desviación media de 31.5 ha donde la primera y la última imagen presentan la mayor variación con respecto al promedio (Tabla 4)

Tabla 4.

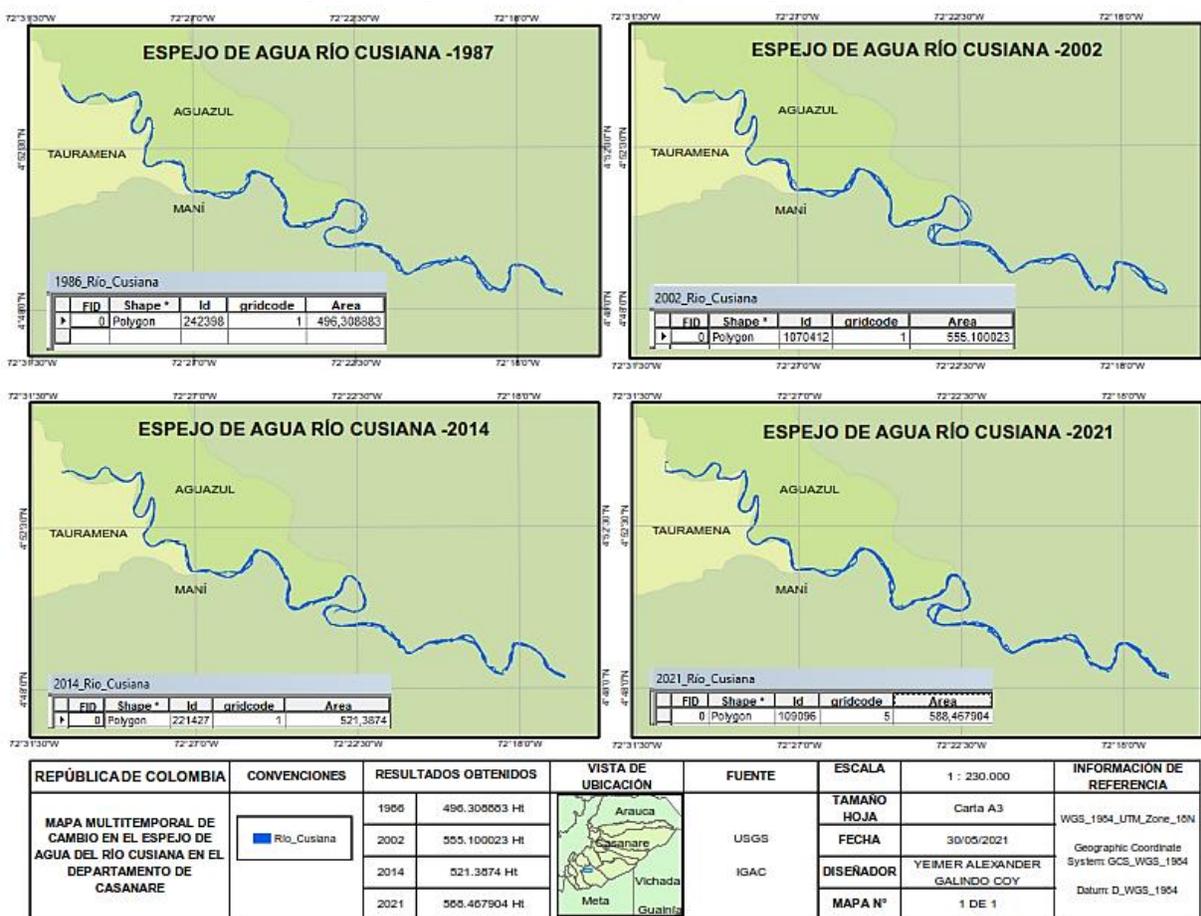
Cambio en el área de la cobertura “espejo de agua del río Cusiana”

AÑO	ÁREA ESPEJO DE AGUA (ha)	DIFERENCIA CON RESPECTO A LA MEDIA
1986	496.308883 Ha	-44,0071695
2002	555.100023 Ha	14,7839705
2014	521.3874 Ha	-18,9286525
2021	588.467904 Ha	48,1518515
PROMEDIO		540,3160525
DESVIACIÓN ESTANDAR		40,13349158
DESVIACIÓN MEDIA		31,467911

Fuente: Autor

Figura 19.

Área de las coberturas espejo de agua del río Cusiana para el periodo de estudio



Fuente: Autor

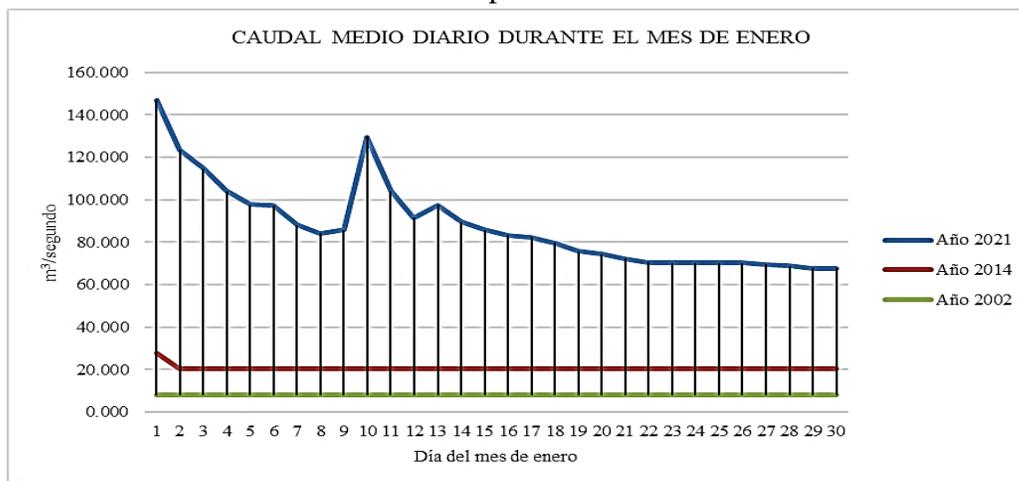
El principal inconveniente que se tuvo para determinar el área de los espejos de agua radicó en dos aspectos principalmente. El primero, fue la tecnología del sensor de la misión Landsat 5, dado que la resolución espacial de treinta metros podría superar el ancho del espejo de agua en algunos puntos dentro del área de interés, el segundo fue la visibilidad de las coberturas considerando la presencia de nubes aún en época seca que pueden dar lugar a una interpretación errada de la cobertura de interés. Para solucionar lo primero se realizó la selección de imágenes generadas por el sensor más moderno posible para el año de búsqueda y un área de estudio donde el cauce se consolidó en su mayoría en un único flujo. Para subsanar el segundo inconveniente se seleccionó un área de estudio con poca cobertura de nubes o en su defecto, mayor visibilidad del área de interés.

Otro inconveniente que podría generar dificultad en la interpretación de los resultados consiste en la dinámica del sistema hídrico marcada por los efectos de los fenómenos climáticos (El Niño y La Niña) que hubieran sido registrados en alguna de las imágenes satelitales seleccionadas, por lo cual, se obtuvo información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) sobre registros de precipitación y caudal medio diario durante cada día del mes de enero de cada año de estudio.

El caudal como variable hidrometeorológica se consideró útil en la medida que, aunque no se observara una reducción progresiva del espejo de agua a lo largo del periodo de estudio, si pudiese presentarse un decremento en el caudal registrado, indicando una pérdida de profundidad en la lámina de agua. No obstante, del año 2002 al 2014 se observó un incremento en el caudal como se observa en el Grafico 1, mientras que se identificó una reducción en el espejo de agua, como se señala en la Tabla 4.

Gráfico 1.

Caudal medio diario durante el mes de enero por cada año de estudio

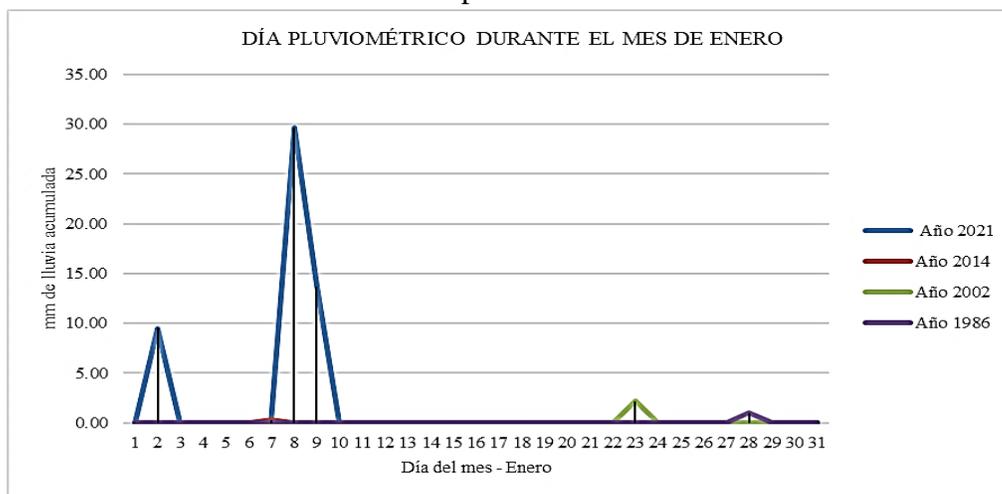


Fuente: Elaboración del autor a partir de datos abiertos del (IDEAM, n.d.)

Teniendo en cuenta el incremento considerable en el caudal durante el mes de enero de 2021 se obtuvo el registro pluviométrico del mismo mes, a fin de identificar si el incremento en el caudal se debió a precipitaciones en la fecha de captura de la imagen satelital, de lo cual se halló registro de lluvias a principios del mes de enero de 2021, no siendo así en los registros de 1986, 2002 y 2014, lo cual es consistente con el incremento en el caudal en 2021 con respecto a los registros de 2002 y 2014 (Gráfico 2)

Gráfico 2.

Día pluviométrico durante el mes de enero por cada año de estudio



Fuente: Elaboración del autor a partir de datos abiertos del (IDEAM, n.d.)

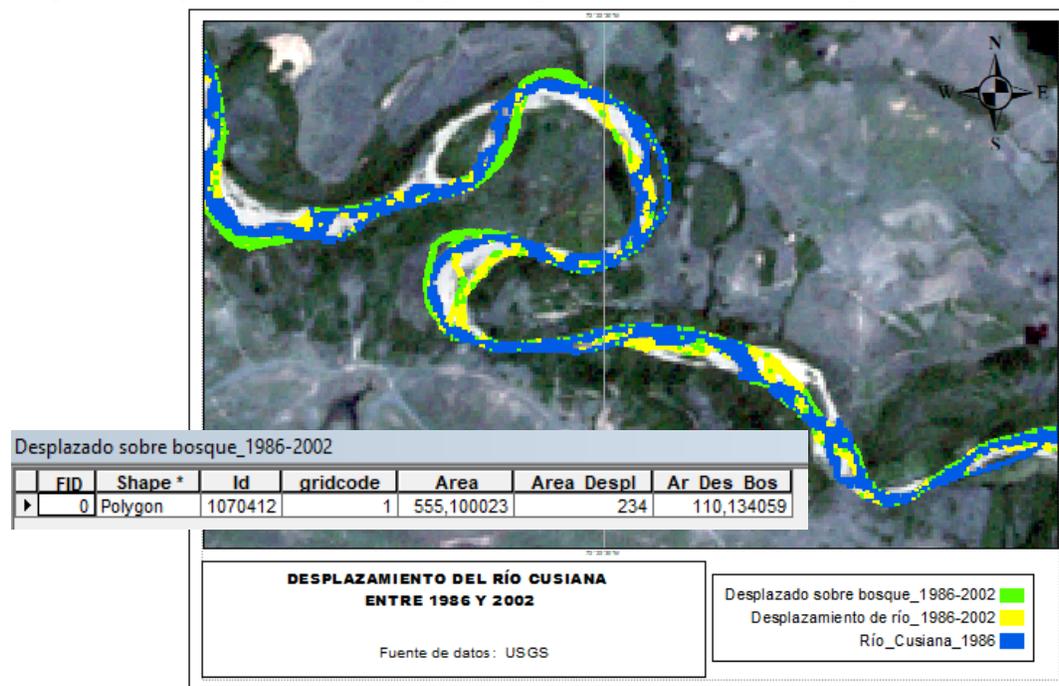
No obstante, es posible que el reporte de la estación hidrometeorológica más cercana no haya registrado lluvias pero que aguas arriba del área de estudio, incluso en la zona de alta montaña donde nace el río Cusiana, se hayan presentado precipitaciones que incrementaron el caudal del río. Sin embargo, no es posible afirmar esto sin un estudio hidrológico previo.

5.2 Análisis del Cambio en la Cobertura del Espejo de Agua

Para cada intervalo de tiempo se identificó: En color azul la posición inicial del espejo de agua, en color amarillo el desplazamiento que tuvo con respecto al año inicial del intervalo y en verde se observa la parte del espejo de agua que se localiza sobre lo que en un principio era el área circundante al cauce del río Cusiana (Figuras 20, 21, 22), correspondiente a la cobertura de “Bosque denso” de acuerdo con la Leyenda Nacional de Coberturas 2000-2002 (Figura 2)

Figura 20.

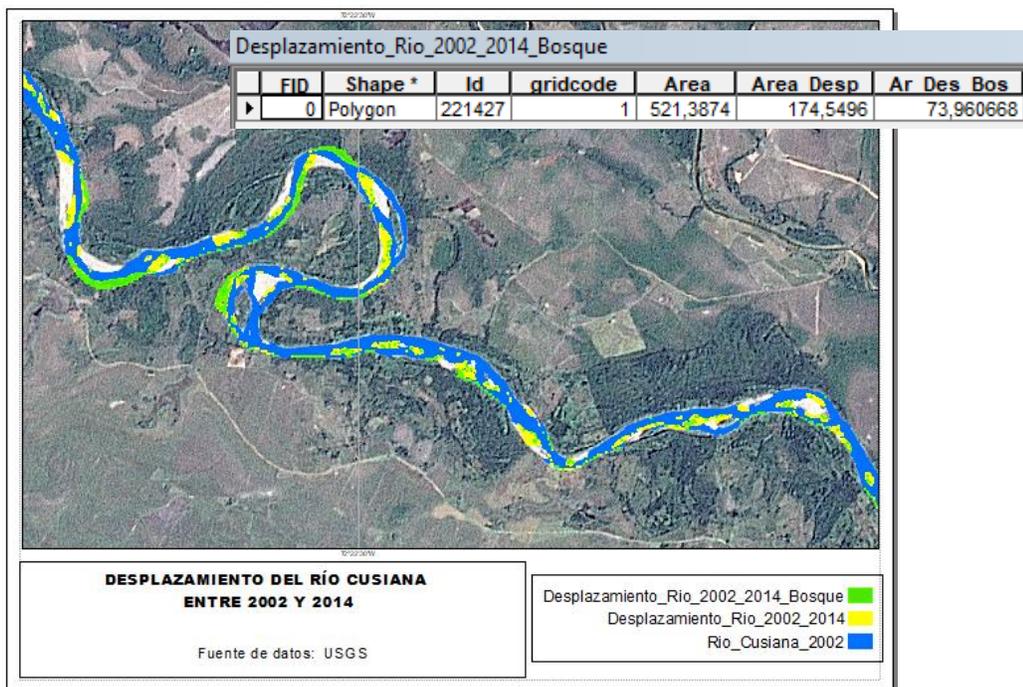
Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 1986 y 2002



Fuente: Autor

Figura 21.

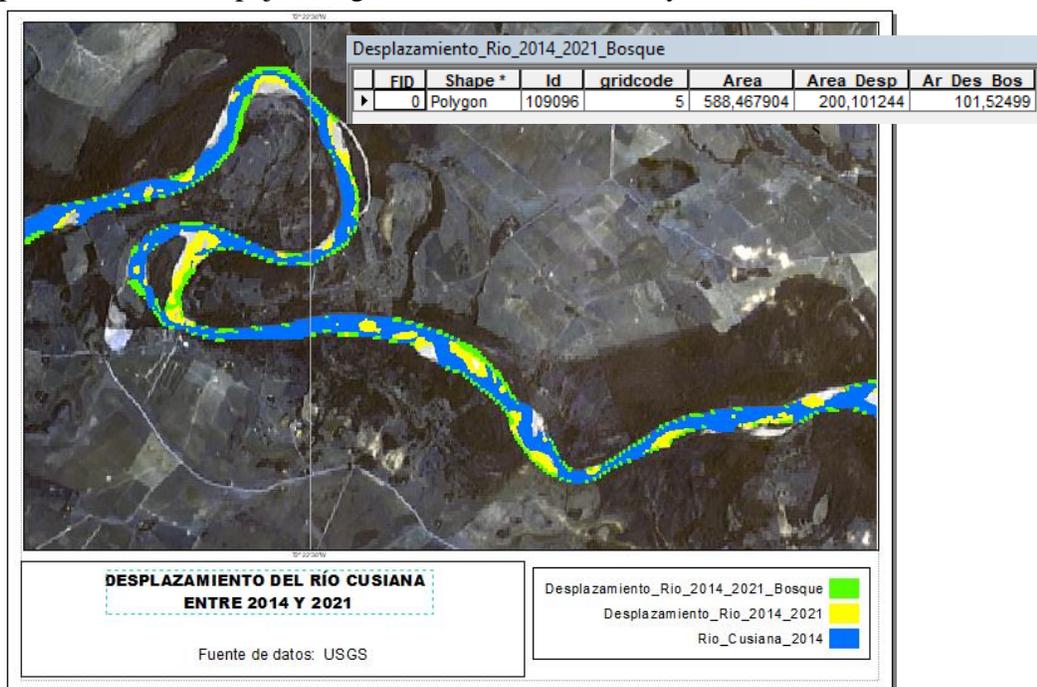
Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 2002 y 2014



Fuente: Autor

Figura 22.

Mapa del desplazamiento del espejo de agua en el intervalo 2014 y 2021



Fuente: Autor

Con base en la clasificación de coberturas se midió el desplazamiento del espejo de agua en los intervalos de tiempo: 1986-2002, 2002-2014 y 2014-2021, hallándose un mayor desplazamiento del espejo de agua en el primer intervalo, pero una tasa de desplazamiento, es decir, área del espejo de agua desplazado/año, considerablemente mayor en el último intervalo de tiempo (Tabla 5).

Tabla 5.

Desplazamiento del espejo de agua es un intervalo de tiempo

Intervalo	área inicial (ha)	Desplazamiento espejo de agua (ha)	Desplazamiento del espejo de agua por año (ha/año)	Desplazamiento sobre bosque de galería (ha)	Desplazamiento sobre bosque por año (ha/año)
1986-2002	555,1	234	14,6	110,13	6,88
2002-2014	521,38	174,54	14,5	73,9	6,16
2014-2021	588,46	200,1	28,6	101,5	14,5

Fuente: Autor

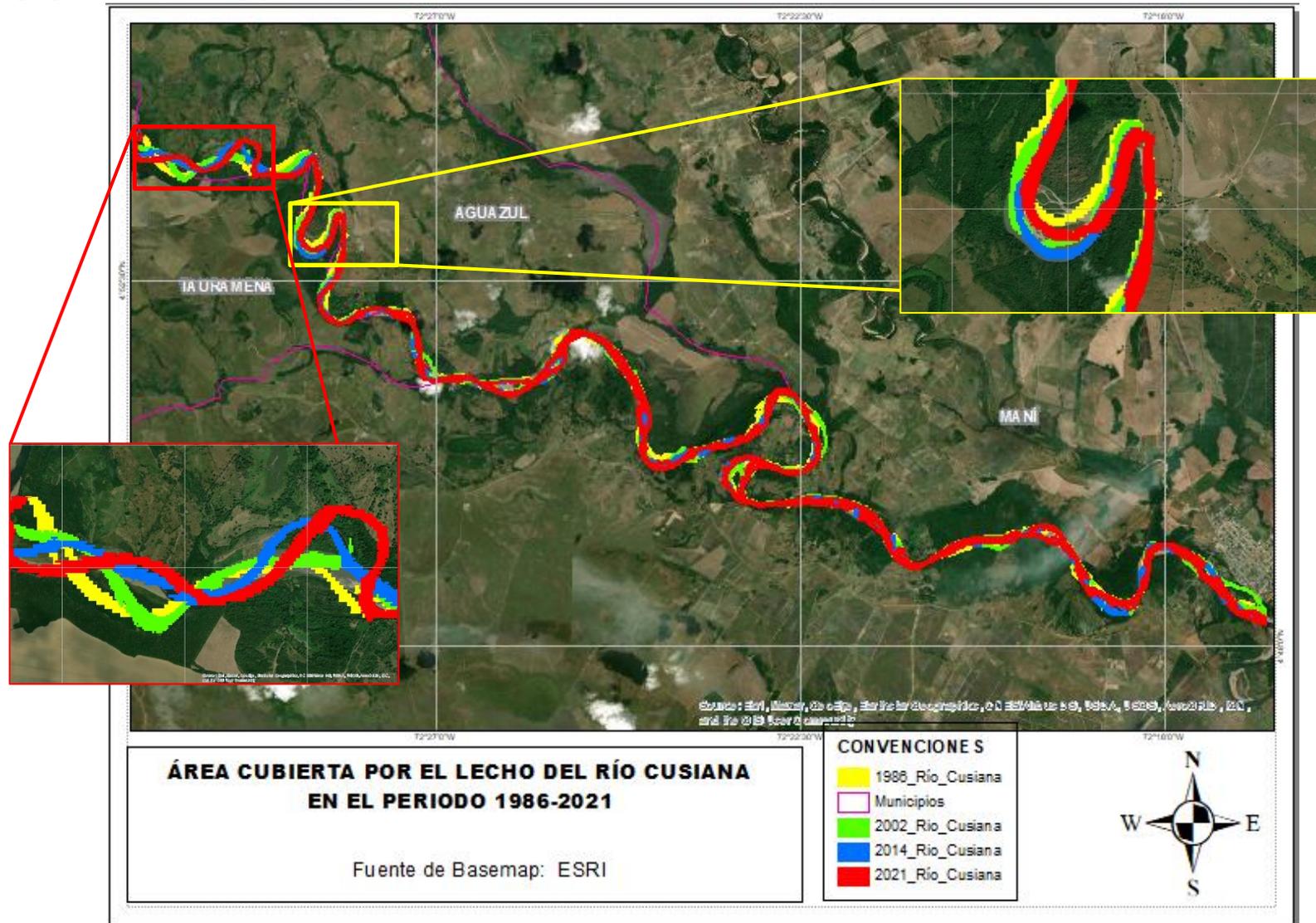
El desplazamiento del espejo de agua sobre el área circundante al cauce del río Cusiana, también denominado bosque denso, fue mayor en el primer intervalo de tiempo, pero considerando la tasa de desplazamiento en el último intervalo, se pudo establecer que fue en el periodo de 2014 a 2021 cuando se presentó el mayor desplazamiento del espejo de agua sobre áreas que antes estaban cubiertas por vegetación.

5.2.1 Zonas de Interés en la Superposición de los Espejos de agua

Al superponer el espejo de agua obtenido de cada imagen satelital, se observa en el cuadro rojo que el desplazamiento más irregular, se localiza en la parte superior del área de estudio, donde a partir de este punto, el río Cusiana empieza a concentrarse en una única línea de flujo, de mayor amplitud en comparación con el ancho de los flujos observados en la parte más alta del área de estudio. También puede identificarse en el recuadro amarillo la dinámica de retorno del río, señalando el 2014 como el punto de retorno al cauce inicial (Figura 23).

Figura 23.

Superposición de los espejos de agua del río Cusiana en los años 1986, 2002, 2014 y 2021



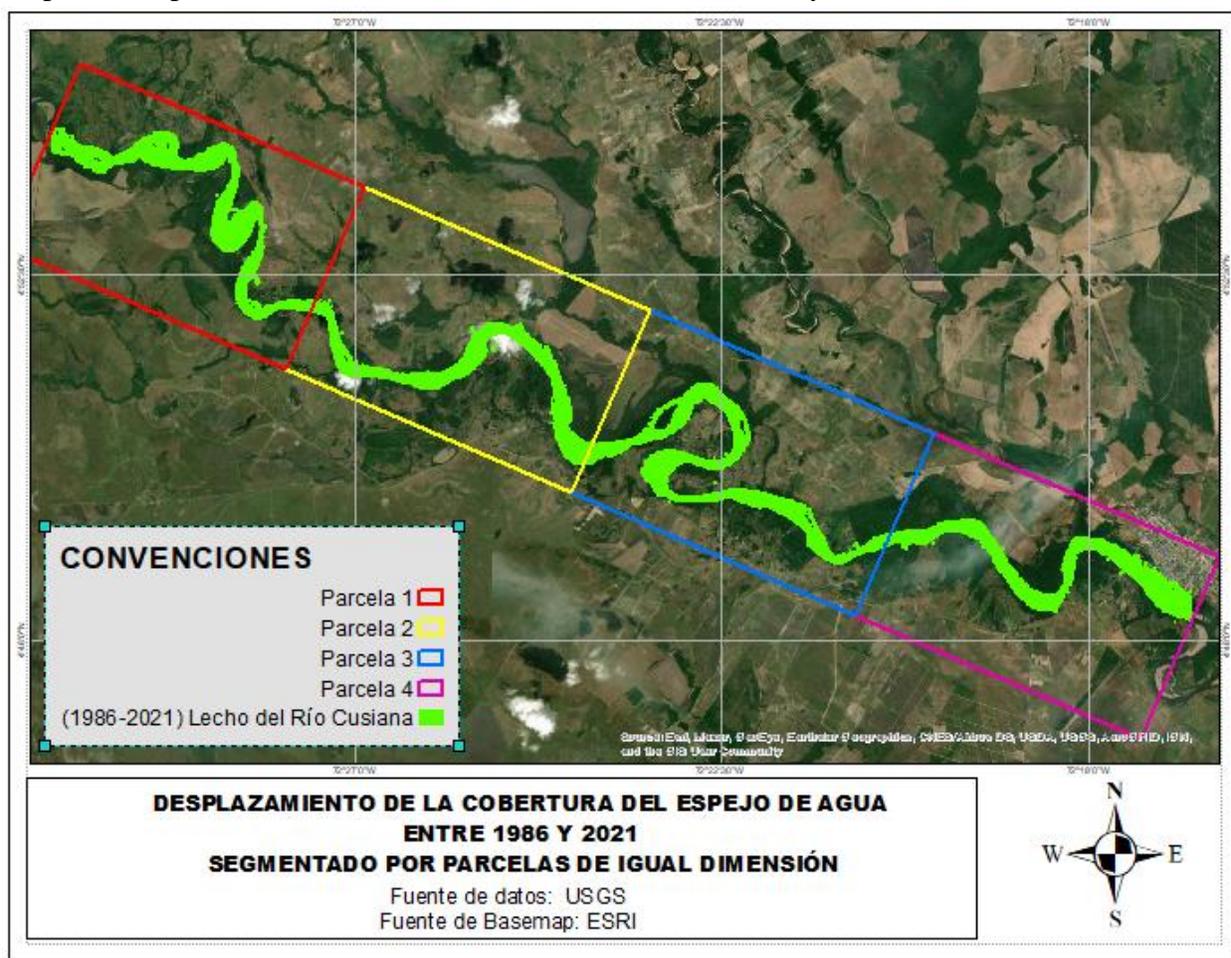
Fuente: Autor

5.2.2 Desplazamiento del Lecho Fluvial o Cauze del río Cusiana en el Periodo de Estudio

El lecho fluvial se obtuvo a partir de la identificación del desplazamiento del espejo de agua y la cobertura correspondiente al banco de arena del río Cusiana, dentro del área de estudio (Figura 24). Al parcelar estas coberturas, se identificó que el desplazamiento del lecho del río fue mayor en la parcela N 1, consistente con la disposición irregular de los espejos de agua observada en la Figura 23. Sin embargo, considerando la longitud del río Cusiana en cada parcela se observó un mayor desplazamiento por kilómetro lineal en la parcela N 4, consistente con una amplia cobertura de banco de arena al inicio del periodo de estudio (Tabla 6).

Figura 24.

Mapa del desplazamiento del lecho del río en el intervalo 1986 y 2021



Fuente: Autor

Tabla 6.

Desplazamiento total del espejo de agua por en el periodo de estudio, por parcelas

N parcela	Longitud del segmento de río (Km)	Área acumulada por desplazamiento del lecho del río (ha)	Área acumulada por desplazamiento del lecho del río por kilómetro (ha/km)
1	13.3	343.52	25.8
2	9.8	273.32	27.9
3	14.2	349.97	24.6
4	9.42	286.08	30.4

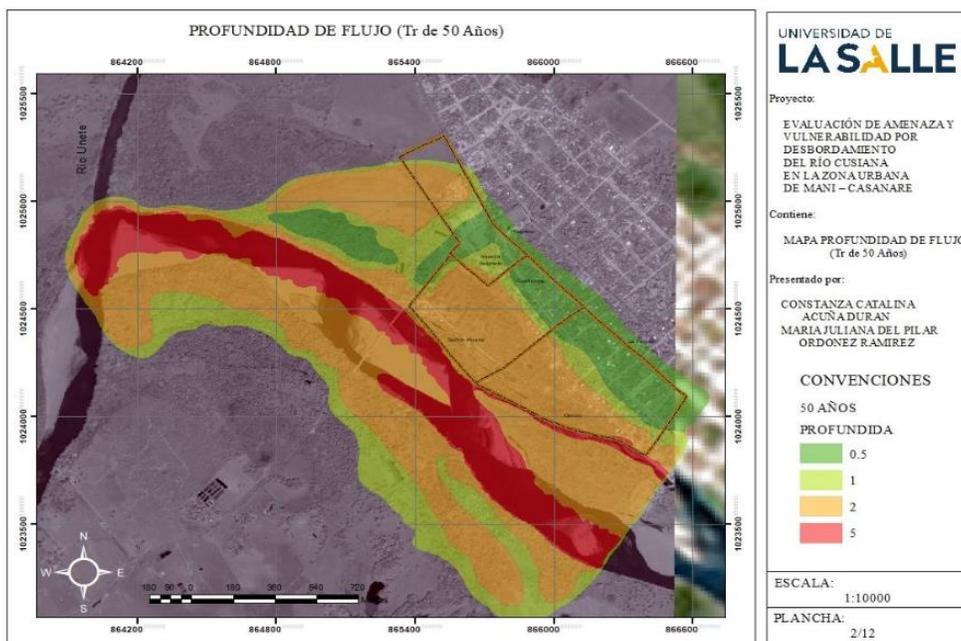
Fuente: Autor

El área que se observó en la parcela N 4, medida a partir de la identificación del área cubierta por el desplazamiento del espejo de agua del río Cusiana a lo largo de 35 años, es consistente con el resultado de una evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana en la zona urbana de Maní – Casanare desarrollada en 2018, del cual se logró modelar áreas de inundación por desbordamiento del río con una profundidad que varía entre 5 m y 0.5 m (Figura 25), siendo el punto más profundo el espejo de agua, “es decir para el territorio cercano al río, la altura fue de entre 2 m y 1 m, afectando el sector muelle y la vereda Belgrado, seguido directamente el casco urbano encontrando profundidades de entre 1m y 0,5m” (Durán & Ramirez, 2018, p. 56).

En consecuencia, el perímetro del desplazamiento medido en la parcela N 4 del presente trabajo mantiene similitud con el área de inundación obtenida mediante el modelado hidráulico que, si bien está basado en los registros de caudales desde 1999 hasta 2015, es comparable con el área cubierta por el banco de arena del río Cusiana, en enero de 1986, el cual cubría parte de lo que hoy en día es el casco urbano del municipio de Maní (Figura 26).

Figura 25.

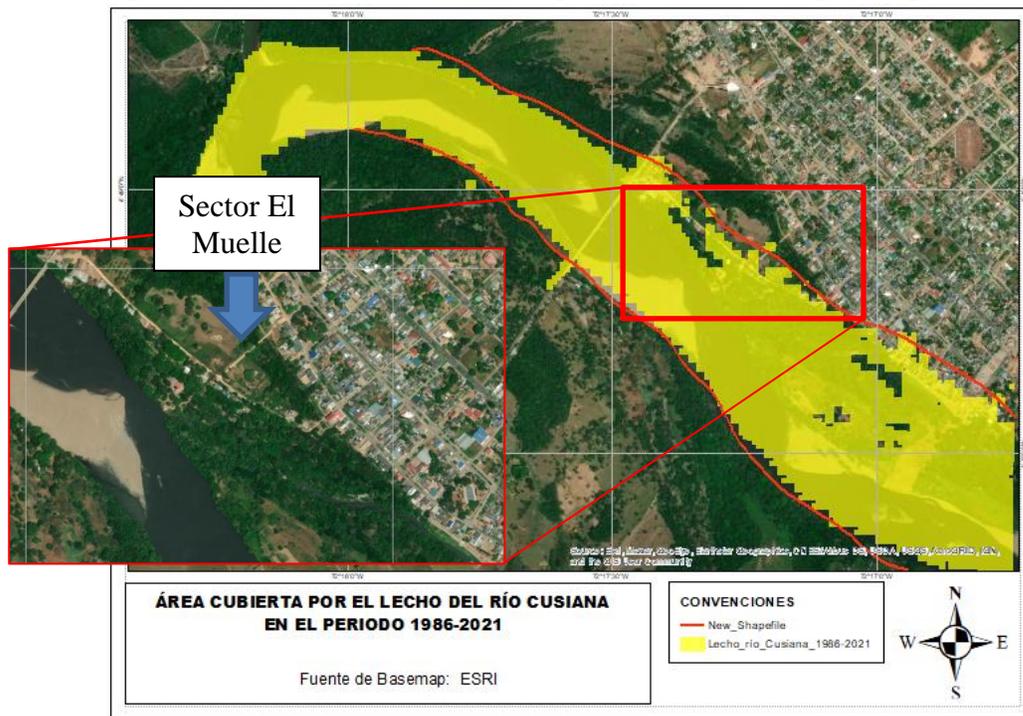
Mapa de profundidad de flujo. Evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana



Fuente: (Durán & Ramirez, 2018, p. 59)

Figura 26.

Área cubierta por el lecho del río Cusiana en el periodo 1986-2021, para la parcela N 4



Fuente: Autor

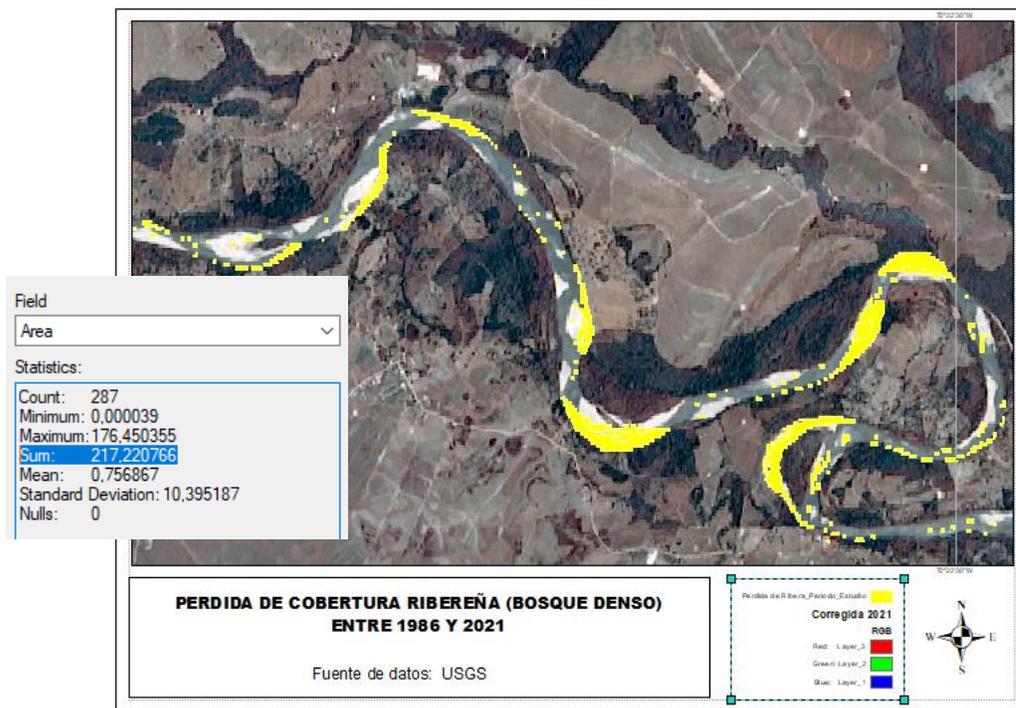
“El sector más afectado se encuentra en los barrios el Muelle y Vereda Belgrado con una profundidad aproximadamente de 2 metros y 0.5 metros respectivamente encontrados en la mancha de inundación obtenidas por las modelaciones realizadas en HECRAS. Dicha amenaza se calificó como no mitigable” concluye Durán & Ramírez (2018, p. 114) en relación al análisis de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río, cuyo mapa de inundación es consistente con el desplazamiento de las coberturas, obtenido y medido en el presente estudio multitemporal de cambio en el espejo de agua del río Cusiana.

5.2.3 Pérdida de Cobertura Vegetal por Desplazamiento del Espejo de Agua

Se realizó la medición de la pérdida y ganancia de la cobertura de bosque denso con base en el desplazamiento del espejo de agua en el periodo 1986 – 2021, de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 4.8 del presente trabajo y se encontró que el cauce del río Cusiana, comprendido por las coberturas: Espejo de agua y banco de arena, se desplazó cubriendo 217.22 ha de cobertura circundante, también denominado bosque denso según la Leyenda Nacional de Coberturas (Figura 24), pero cedió también 248.54 ha del área del lecho del río a la banca o cobertura circundante (Figura 28).

Figura 27.

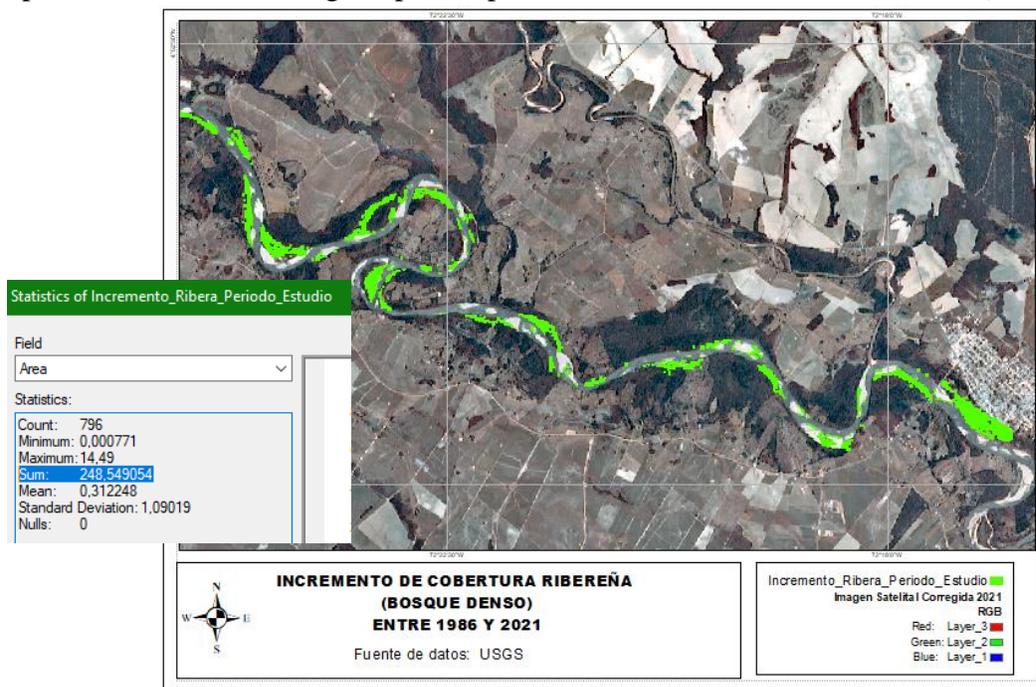
Pérdida de cobertura vegetal por desplazamiento del cauce del río Cusiana (1986-2021)



Fuente: Autor

Figura 28.

Expansión de cobertura vegetal por desplazamiento del cauce del río Cusiana (1986-2021)



Fuente: Autor

6 Conclusiones

La medición de la lámina de agua del río Cusiana, en el área de estudio, a lo largo del periodo comprendido entre 1986 y 2021 presentó distintas variaciones sin tendencia evidente, hasta finalmente observarse un incremento de 92.15 ha en la cobertura.

El área del espejo de agua del río Cusiana, medida para las 4 imágenes de estudio (finales), tomadas en el mes de enero de los años 1986, 2002, 2014 y 2021 fue de 496.31, 521.38, 555.10 y 588,46 ha respectivamente, hallándose que la mayor desviación de la media se presentó al inicio y final del periodo de estudio, siendo este último junto con el 2014, el intervalo de tiempo en el que se presentó un incremento en el caudal medio diario, consistente con una mayor pérdida de cobertura vegetal por desplazamiento del espejo de agua, posiblemente por mayor capacidad erosiva.

Se determinó que el intervalo de tiempo con mayor tasa de desplazamiento del espejo de agua, a razón de 18,4 ha por año, fue del año 2014 al 2021, desplazándose 200.10 ha, de las cuales 101.52 fueron sobre la cobertura vegetal al inicio del intervalo.

Al superponer los mapas del espejo de agua resultante a partir del procesamiento de cada imagen de estudio, se identificó el año 2014 como el punto de retorno del espejo de agua hacia el flanco por el que transcurría al inicio del periodo de estudio.

Dado el desplazamiento del lecho del río Cusiana a lo largo del periodo de estudio, se identificó que la parcela N 4, la cual incluye parte del casco urbano del municipio de Maní, presenta la mayor cobertura acumulada del lecho por desplazamiento del espejo de agua, consistente con un amplio banco de arena al inicio del periodo de estudio, en la que además, se ubican actualmente asentamientos poblacionales, que por estar dentro del área de desplazamiento

o área de inundación como también se identifica en un estudio de amenaza y vulnerabilidad desarrollado en 2018, presentan alto riesgo de desastres por desbordamiento del río Cusiana.

Se identificó que, a lo largo del periodo de estudio, el desplazamiento del cauce del río Cusiana, es decir, tanto del espejo de agua como del banco de arena, cubrió y abandonó superficie de suelo, representando una ganancia en la cobertura vegetal correspondiente a 31.1 ha, al final del periodo.

7 Recomendaciones

Analizar los efectos del marcado desplazamiento del cauce del río Cusiana en la superposición de los espejos de agua del periodo 1986-2021, descrito en el numeral 5.2.1 del presente trabajo de grado, a fin de evaluar la necesidad de implementar obras geotécnicas previo el desarrollo de asentamientos poblacionales o la expansión de un sector productivo.

Complementar los estudios tendientes a evaluar la dinámica del cauce del río Cusiana, con estudios hidrológicos (variables climáticas e hidrometeorológicas), que permitan evaluar con mayor certeza las causas de los cambios observados, en función de la densidad demográfica y los sectores económicos nacientes o en expansión.

Para fines de una evaluación de cambio multitemporal, se recomienda el procesamiento de imágenes de satélite capturadas por un mismo sensor de tal manera que se cuente con especificaciones idénticas que permitan ser procesadas con la misma metodología.

8 Referencias

- Barragan, I. D. (2018). *Analisis Multitemporal Del Cauce Del Rio Magdalena Salgar – La Dorada a Traves De Analisis De Imágenes Radar*. 1–17.
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20359/BarraganVeraIvanDario2018.pdf>
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. *Search.Proquest.Com*.
<https://search.proquest.com/openview/fa0851b2def4bc35d8ac1287bd08d7d0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1818083>
- Por medio de la cual se regula el uso y aprovechamiento del recurso hídrico en el Rio Cusiana, Pub. L. No. 200.41-10.1396, 12 (2010).
https://www.corporinoquia.gov.co/files/Normas_sobre_aprovechamiento_y_sostenibilidad_del_agua/Resolucin_200_41_10_1396.pdf
- Corporinoquia. (2013). *Plan de Gestión Ambiental Regional 2013-2025*.
http://www.corporinoquia.gov.co/files/pgar/doc_final_PGAR_2013_2025.pdf
- Corporinoquia, & Corpoboyacá. (2004). *Cartilla Divulgativa del POMCA del río Cusiana*.
- Corporinoquia, & Corpoboyacá. (2015). *Plan de Ordenamiento y manejo de la cuenca del río Cusiana*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/informe-formulacion-rio-cusiana1.pdf>
- Corporinoquia, & Corpoboyacá. (2015). *POMCA Río Cusiana - Componente Socioeconómico* (p. 225).
- Durán, C. A., & Ramirez, M. O. (2018). Evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana en la zona urbana de Mani – Casanare. *Ingeniería Civil*.

science_support_page_related_con

USGS. (n.d.-b). *Landsat 8*. Retrieved May 2, 2021, from https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con