



**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA DINÁMICA
FLUVIAL DEL RÍO MAGDALENA, COLOMBIA,
MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES DE
IMÁGENES SATELITALES**

**FLUVIAL DYNAMICS EVOLUTION STUDY FOR
MAGDALENA RIVER, COLOMBIA, USING
SPECTRAL INDEXES FROM SATELLITE IMAGES**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

JORGE ENRIQUE SÁENZ

Dirigido por:

DAVID ANDRÉS RIVAS TABARES, FRANCISCO CARREÑO

Alcalá de Henares, a de de

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a mi esposa y mis hijos, de quienes me he alejado en los últimos 15 meses, por su paciencia y apoyo al haberme dedicado a estudiar para este Máster después de 50 años de haberme graduado como Ingeniero civil en febrero de 1972.

También quiero agradecer a David Andrés Rivas, director de la tesis, por su constante apoyo y acertadas indicaciones para sacar adelante este TFM.

Resumen

El río Magdalena constituye una alternativa importante para el transporte fluvial en Colombia. Los problemas de navegación se concentran entre Barrancabermeja y río Sogamoso, sector con un caudal medio de 2950 m³/s y variación máxima de niveles de 5 metros.

Se han realizado muchos estudios para mantener la navegación mediante dragados y para definir obras de encauzamiento. Estos incluyeron análisis clásicos de dinámica fluvial, limitados a la comparación multitemporal de la morfología de islas y orillas para determinar la posición del canal navegable. El seguimiento del dragado y predicción de cambios en el canal navegable se ha realizado tradicionalmente mediante batimetrías que no cubren todo el cauce.

Se presenta la alternativa de análisis mediante el uso de imágenes de satélite, que son herramientas efectivas para delimitar cuerpos de agua. Mediante el banco de datos e imágenes de los satélites Landsat y Sentinel, es posible el seguimiento de los cambios en el río cada vez que un satélite pasa sobre el mismo sitio. Las imágenes registran distintas longitudes de onda del espectro electromagnético que se presentan como índices espectrales.

Se seleccionaron imágenes de períodos de estiaje entre 2016 y 2022 mediante la herramienta Google Earth Engine. Luego de un análisis cualitativo, se seleccionaron las procesadas con los índices **NDVI** y **MNDWI**, que mejor representan la interfase agua-tierra.

Se obtuvieron resultados satisfactorios del análisis de la dinámica fluvial de este gran río aluvial en un sector de 50 km². El método puede utilizarse para mejoras a la navegación y otros propósitos de ingeniería fluvial.

Tabla de Contenido

GLOSARIO DE TÉRMINOS	8
1. INTRODUCCIÓN / EL RÍO MAGDALENA.....	9
1.1 LA NAVEGACIÓN EN EL RÍO MAGDALENA.....	9
1.2 HIDROLOGÍA Y CLIMA DEL RÍO MAGDALENA EN EL SECTOR DE INTERÉS.....	11
1.3 GEOMORFOLOGÍA DEL RÍO MAGDALENA EN EL SECTOR DE INTERÉS.....	12
1.4 ESTUDIOS ANTERIORES DE DINÁMICA FLUVIAL EN EL RÍO MAGDALENA.....	13
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS DE SOLUCIÓN	14
1.6 LOS ÍNDICES ESPECTRALES.....	15
1.7 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICO	17
2. DEFINICIÓN DEL SECTOR CRÍTICO PARA ANÁLISIS	18
2.1 TRAMOS DE ALTA DINÁMICA.....	18
2.2 ANÁLISIS TRADICIONAL DE LA DINÁMICA FLUVIAL DEL SECTOR.....	19
3. ANÁLISIS CON ÍNDICES ESPECTRALES DEL SECTOR BUFALERA –BOCAS DEL RÍO SOGAMOSO	23
3.1 ESTUDIOS ADELANTADOS POR OTROS AUTORES	23
3.2 ÍNDICES ESPECTRALES UTILIZADOS.....	26
3.3 SATÉLITES SELECCIONADOS Y BANDAS	28
3.4 FECHAS Y PERÍODOS SELECCIONADOS	28
3.5 ANÁLISIS EFECTUADOS	29
3.5.1 COMPARACIÓN VISUAL ENTRE LOS MAPAS DE UN MISMO MES PARA VARIOS ÍNDICES ..	29
3.5.2 ANÁLISIS DE DINÁMICA FLUVIAL CON ÍNDICES NDVI Y MNDWI	34
4. DISCUSIÓN SOBRE EL MÉTODO Y LOS RESULTADOS	42
5. CONCLUSIONES	45
6. BIBLIOGRAFÍA CITADA	47
ANEXOS.....	49
ANEXO 1: CÓDIGO FUENTE (<i>SCRIPT</i>) DE GOOGLE EARTH ENGINE – GEE.....	49
ANEXO 2: MAPAS RESULTANTES CON LOS SEIS ÍNDICES ESPECTRALES PARA EL SECTOR BUFALERA - BOCAS DEL SOGAMOSO DEL RÍO MAGDALENA.....	51

Índice de Figuras

Figura 1. Río Magdalena y principales puertos (Jesyca S.A.S. Ingenieros Civiles e Hidráulicos, 2017).....	10
Figura 2. Caudales medios mensuales en Barrancabermeja (IEH Grucon, 2013, a partir de datos de niveles del Instituto de Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM).....	11
Figura 3. Precipitación media y temperatura mensual en Barrancabermeja (Climate-Data.org)	12
Figura 4. Geomorfología sector Barrancabermeja - río Sogamoso (IEH Grucon, 2013)....	13
Figura 5. Convenciones de las Unidades Geomorfológicas en Figura 4.....	13
Figura 6. Espectro electromagnético y captura de información satelital (NASA).....	16
Figura 7. Sector Bufalera-Bocas en el recuadro. Las líneas verdes corresponden a 1976, las rojas a 2004, las naranjas a 2005 y las azules a 2012 (IEH Grucon, 2013).....	18
Figura 8. Batimetría del sector Bufalera – Bocas del Sogamoso, noviembre 23 de 2020, en condición de aguas altas.	20
Figura 9. Batimetría del sector Bufalera – Bocas del Sogamoso, marzo 16 de 2021, en condición de aguas bajas.....	21
Figura 10. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2016.	29
Figura 11. Índices espectrales del sector de interés en Marzo 2016.	30
Figura 12. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2017.	30
Figura 13. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2018.	31
Figura 14. Índices espectrales del sector de interés en Marzo 2018.	31
Figura 15. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2019.	32
Figura 16. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2020.	32
Figura 17. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2021.	33
Figura 18. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2022.	33
Figura 19. Niveles del río Magdalena en Barrancabermeja los 15 de enero entre 2016 y 2022 (procesados a partir de registros hidrológicos del Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM de Colombia).....	35
Figura 20. Niveles del río Magdalena en Barrancabermeja los 15 de marzo entre 2016 y 2022 (procesados a partir de registros hidrológicos del Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM de Colombia).....	36
Figura 21. Río Magdalena en el sector de interés, enero 2016 a enero 2022 con Índice NDVI	

.....	37
Figura 22. Río Magdalena en el sector de interés, enero 2016 a enero 2022 con Índice MNDWI.....	37
Figura 23. Río Magdalena en el sector de interés, marzo 2016 a marzo 2022 con Índice NDVI.....	38
Figura 24. Río Magdalena sen el sector de interés, marzo 2016 a marzo 2022 con Índice MNDWI.....	38

Índice de Tablas

Tabla 1. Localización del Recuadro del sector Bufalera-Bocas	19
Tabla 2. Estudios de dinámica fluvial en ríos tropicales con imágenes satelitales (1).....	24
Tabla 3. Estudios de dinámica fluvial en otros ríos con imágenes satelitales e índices espectrales.	25
Tabla 4. Satélite Sentinel 2 - Nomenclatura de las bandas.....	28

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Para el propósito de este TFM se indican a continuación el significado de varios términos que son de común uso en el lenguaje y literatura técnica sobre ríos:

- **Angostura:** sitio donde se estrecha el cauce
- **Bancas:** sinónimo de orilla
- **Bancos de arena:** depósitos de sedimentos arenosos en el centro del cauce
- **Brazo principal:** por donde fluye el mayor caudal y por donde se navega
- **Brazo secundario:** por donde fluye una porción no mayoritaria del caudal
- **Brazo lateral:** sinónimo de brazo secundario
- **Batimetría:** topografía bajo el agua para conocer las profundidades del cauce
- **Cauce:** lo que en España se denomina el Dominio Público Hidráulico
- **Caudal:** el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por un sitio determinado
- **Ciénagas:** lagunas naturales conectadas con el cauce del río
- **Encauzamiento:** obras para restringir la dinámica fluvial lateral, como la erosión
- **Hidro vía:** vía navegable interior para transporte de carga y pasajeros
- **Islas:** Porciones de tierra con vegetación permanente en el centro del cauce
- **Márgenes:** sinónimo de orillas para describirlas en forma general
- **Playones:** sinónimo de bancos de arena. No tienen vegetación permanente
- **Sensores remotos:** dispositivos que adquieren imágenes de la tierra desde el espacio
- **Thalweg:** lugar geométrico de la serie ininterrumpida de mayores profundidades
- **Trenzado:** río que exhibe la presencia de varios brazos o canales

1. INTRODUCCIÓN / EL RÍO MAGDALENA

El presente documento corresponde al Trabajo de Fin de Máster - TFM- del Máster Universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, y se titula “*Estudio de la evolución de la dinámica fluvial del río Magdalena, Colombia, mediante índices espectrales*”. El tema fue propuesto por el profesorado de la Universidad y acogido por el autor del presente TFM, quien ha laborado desde 1976 hasta la fecha, en forma casi continua, como ingeniero civil e hidráulico en proyectos relacionados con la navegabilidad del río Magdalena en Colombia. De allí la motivación para extender los conocimientos de la dinámica fluvial del Río Magdalena, transformar el ejercicio profesional de la teoría clásica a introducir la tecnología de la información geográfica y las observaciones de la tierra mediante el análisis de imágenes y su evolución temporal.

1.1 La navegación en el río Magdalena

El río Magdalena fue la arteria principal por donde entraron navegando los conquistadores españoles en el siglo XVI hasta el centro del país, a más de 1000 km de la costa Atlántica, y por donde se estableció durante el período de la colonia el comercio y el poblamiento de lo que fue el Virreinato de la Nueva Granada (Noguera, A. 1980). En los inicios de la época republicana continuó siendo el eje del comercio, hasta que a mediados del siglo XX la competencia con el ferrocarril y las carreteras paralelas lo llevaron a una condición secundaria en tema de transporte fluvial de carga y de pasajeros.

El río ha continuado siendo una alternativa importante para el transporte de hidrocarburos que salen del puerto fluvial petrolero de Barrancabermeja, a 650 km de la costa, y llegan al puerto de Cartagena en la costa Atlántica. En los últimos 50 años se han realizado ingentes esfuerzos para mantener las condiciones de navegación del río Magdalena mediante dragados, y desde 2006 a la fecha se han llevado a cabo diversos proyectos de diseño de obras de encauzamiento (Boada Sáenz Ingenieros, 2007; 2009; Emdepa Consultoría, 2011; IEH Grucon, 2013; Jesyca S.A.S. Ingenieros Civiles e Hidráulicos, 2016; 2019), cuyo objeto es minimizar la variabilidad de la posición del canal navegable. El sector de interés para este trabajo es entre Barrancabermeja y la desembocadura del río Sogamoso, sector donde se concentran numerosos problemas de navegación del río Magdalena. Este sector se localiza en el extremo aguas arriba del tramo con mayor navegación.

La Figura 1 ilustra la localización del río Magdalena dentro del territorio de la actual Colombia, con una cuenca hidrográfica de 257.438 km² donde se concentra el 80% de la

población del país y se produce el 85% del PIB. En los Planes de Desarrollo de los últimos 5 Gobiernos de Colombia (2002-2022) se ha considerado que el río Magdalena debe constituir un eslabón importante del transporte multimodal del país, por lo que el mejoramiento de sus condiciones de navegación es estratégico para el desarrollo social y económico del país.



Figura 1. Río Magdalena y principales puertos (Jesyca S.A.S., 2017)

En los proyectos de diseño antes mencionados se utilizó información de sensores remotos e imágenes satelitales, especialmente de Google Earth. Esta se limitó a información estacional del cauce del río, en las que sólo se identificaba los límites de la frontera del agua en ciertos sectores de interés para intervalos de un rango de años, pero sin analizar la dinámica fluvial

formalmente. Las variaciones multitemporales fueron poco abordadas y limitadas a imágenes fijas (estados) del río y no su evolución temporal (procesos).

1.2 Hidrología y clima del río Magdalena en el sector de interés

Como en la mayoría de los ríos tropicales, el río Magdalena exhibe una hidrología bimodal como se ilustra en la Figura 2. El área de interés para este trabajo es el tramo del río denominado Magdalena Medio y más precisamente el sector comprendido entre Barrancabermeja y la desembocadura del río Sogamoso, sector de 22 km de longitud aproximadamente. El tramo medio es justo un tramo en el que la dinámica fluvial es compleja y su variabilidad másica y de posición resulta de cierto modo “impredecible” para todo tipo de obras en sus bancas, por ocupación de cauce o por la dificultad en su navegabilidad.

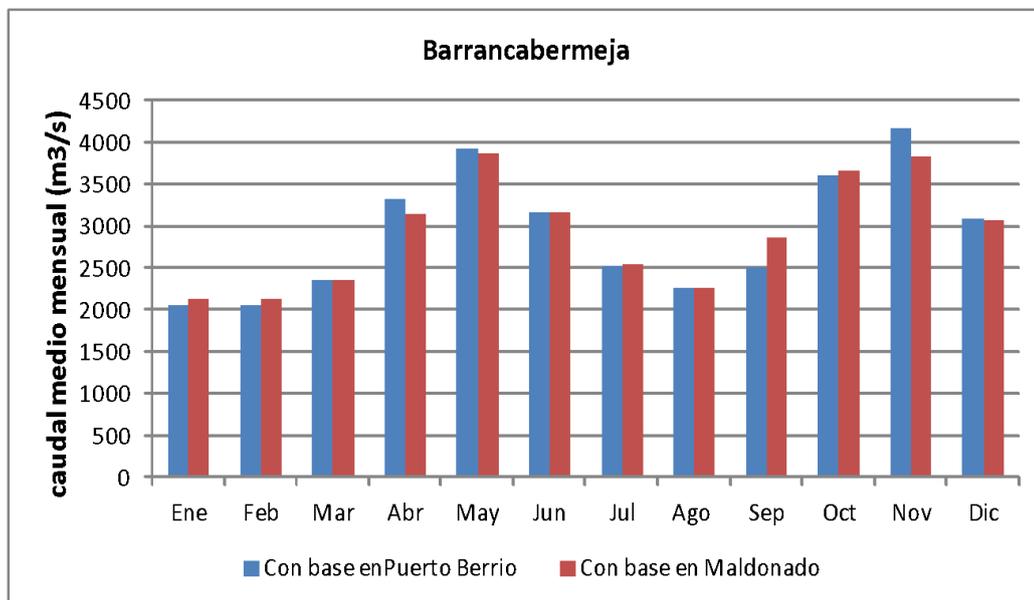


Figura 2. Caudales medios mensuales en Barrancabermeja (IEH Grucon, 2013), a partir de datos de niveles del Instituto de Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM).

Los caudales de enero-febrero son del orden de 2000 m³/s, mientras que los caudales de noviembre pueden superar los 4000 m³/s en el sector de interés, según los datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto encargado de los Estudios Ambientales oficiales de Colombia. El caudal medio multianual es de 2950 m³/s. Por otra parte, la variación máxima de niveles en el sector de Barrancabermeja es de 5 metros aproximadamente, entre los máximos y los mínimos registrados.

La figura siguiente muestra la variación mensual de la precipitación y de la temperatura en Barrancabermeja. La precipitación más baja es en enero, con un promedio de 127 mm, y la

mayor precipitación cae en octubre, con un promedio de 418 mm. La temperatura promedio varía entre 25 y 28°C, con mínimas de 22°C y máximas de 32°C. Es de anotar que el período de menor precipitación en el año es el periodo comprendido entre el 15 de diciembre y el 15 de marzo.

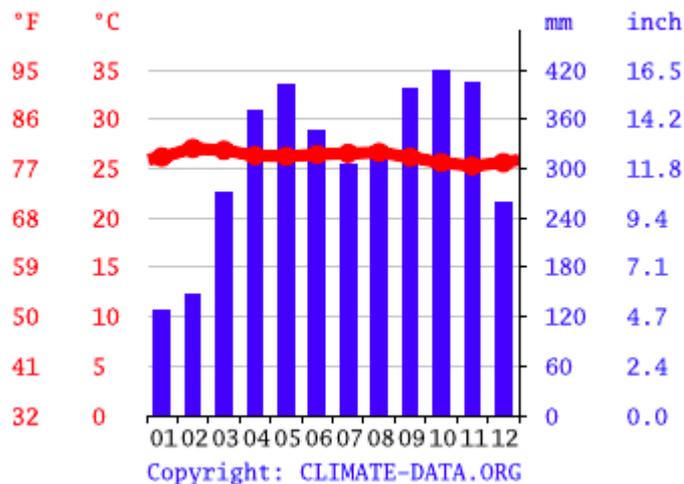


Figura 3. Precipitación media y temperatura mensual en Barrancabermeja (Climate-Data.org)

1.3 Geomorfología del río Magdalena en el sector de interés

En el sector de interés, Barrancabermeja - río Sogamoso, el Magdalena es un río trezado que fluye por una planicie aluvial con múltiples ciénagas y zonas bajas pantanosas. En la zona del ponteadero Barrancabermeja - Yondó, es un río de cauce único, con un ancho de 400 m, una profundidad máxima de 17 m del lado oriental, un gradiente variable entre 0,32 y 0,27 por mil, sinuosidad de 1,13 y relación ancho-profundidad de 23,5. Se puede clasificar aquí como un cauce aluvial, rectilíneo, de carga mixta, estable (Schumm, S., 1977).

A partir de la angostura del puente (estrechamiento hidráulico) inmediatamente al norte del área verde donde se ilustra la ubicación de Barrancabermeja (ver Figura 4), el río Magdalena avanza de forma trezada fluyendo por una planicie aluvial de anchura variable entre 4 a 6 km conformada por terrazas bajas inundables y varias ciénagas, hasta el brazo llamado La Rompida. Luego, continua por un sector de 12 km como un río trezado con anchuras aún mayores, terrazas bajas en ambas orillas, y por una planicie aluvial, hasta recibir aguas tributarias del río Sogamoso por la margen oriental, como puede apreciarse en la Figura 4.

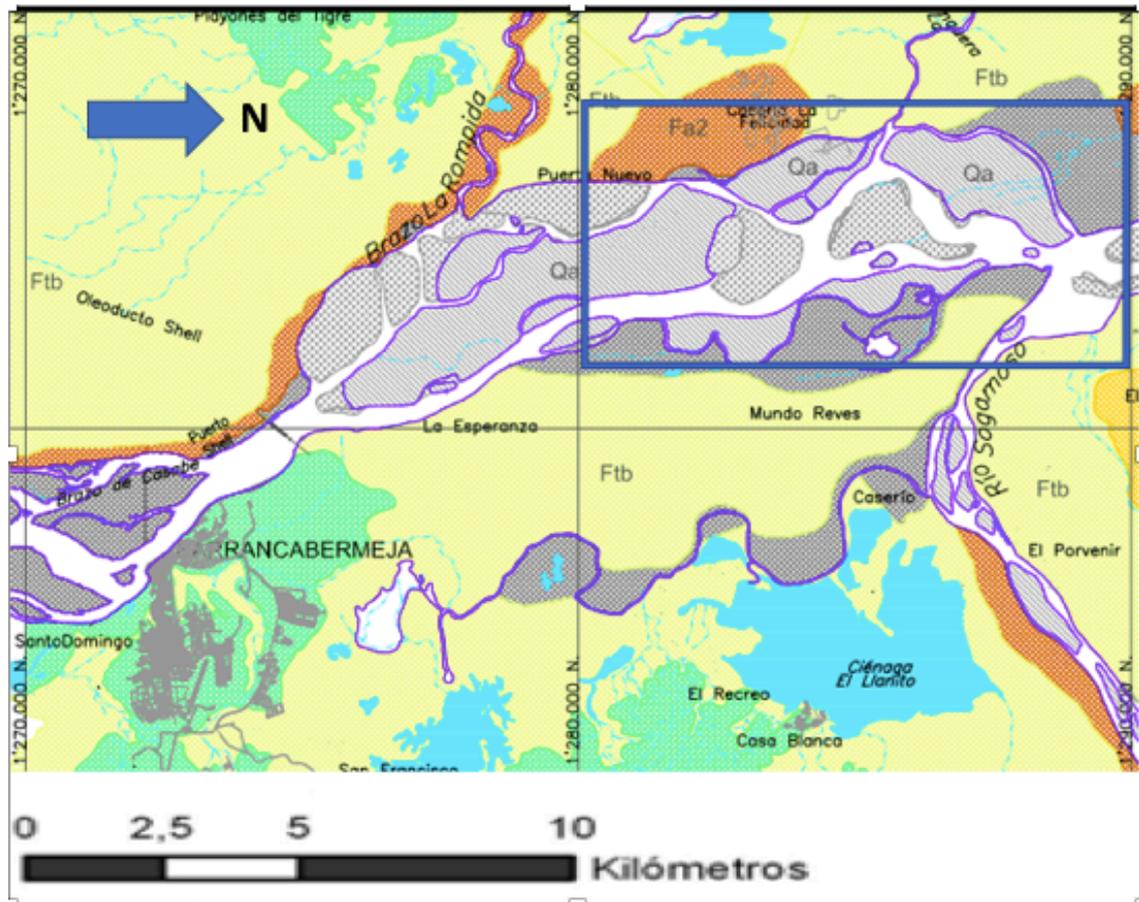


Figura 4. Geomorfología sector Barrancabermeja - río Sogamoso (IEH Grucon, 2013)

Las unidades geomorfológicas correspondientes se describen en la Figura 5.

UNIDADES GEOMORFOLOGICAS		
Qa	Aluviones recientes	} Resistencia baja a la erosión
Fa1	Vega de divagación	
Fa3	Cubeta de inundación	
Fa2	Albardón (dique aluvial)	} Resistencia media a la erosión
Ftb	Terrazas bajas	
Ftm	Terrazas medias	} Resistencia alta a la erosión
Fta	Terrazas altas	
Sc	Lomerios	

Figura 5. Convenciones de las Unidades Geomorfológicas en Figura 4

Es justo en este sector de anchura considerable donde se localiza la zona de estudio objeto de este TFM, más precisamente dentro del recuadro indicado en el mapa de la Figura 4.

1.4 Estudios anteriores de dinámica fluvial en el Río Magdalena

En los siguientes estudios el autor participó como Director de Proyecto para los diseños de

obras de encauzamiento para el mejoramiento de las condiciones de navegación del Río Magdalena: (Boada Sáenz Ingenieros, 2007; 2009; Emdepa Consultoría, 2011; IEH Grucon, 2013; Jesyca S.A.S. Ingenieros Civiles e Hidráulicos, 2016; 2019). Estos incluyeron estudios de dinámica fluvial para determinar la posición más probable del canal navegable más profundo (*thalweg*). Ese lugar geométrico fue la base para definir la localización de las obras y de los dragados para el mantenimiento de las profundidades aptas para la navegación.

Esos análisis se realizaron entre 1976 y 2012, durante un período de 36 años con base en comparaciones multitemporales de aerofotografías e imágenes de satélite de Google Earth transformados a una misma escala (correcciones geométricas), pero no involucran ninguna medición de la dinámica de los movimientos y/o geometría de las formaciones del cauce del río (islas/playones); únicamente se limitaron a la comparación estática multitemporal de los estados morfológicos de islas y orillas. La Figura 7 más adelante muestra un mapa de esos resultados en el sector de interés.

Se puede afirmar que esos estudios se limitaron a mostrar imágenes fijas del estado del río, pero sin analizar la dinámica fluvial propiamente dicha, es decir cómo se generan las variaciones de islas y orillas a través del tiempo, o sea su evolución temporal. Si los estudios se complementan con imágenes más numerosas y que siempre representen un mismo estado del río, por ejemplo, aguas bajas propias de la época de estiaje, se podría lograr establecer algunas variables interesantes, como cuánto se mueven las islas en un mes o un año, si aumentan de tamaño, si estas se juntan a la orilla, si el canal principal cambia de curso o eje y con qué frecuencia, etc.

Sin embargo, eso se puede lograr con imágenes de satélite que pasan con una frecuencia muy grande por el mismo sitio; por ejemplo, los Satélites Sentinel 1 y 2 presentan una revisita de 5 días con una resolución espacial del orden de 10 a 20 m que es adecuada para grandes ríos, definidos como aquellos con anchuras superiores a 400 m (Kryniewcka et al., 2022), por lo que imágenes con esa frecuencia de un sitio particular sí permiten caracterizar la dinámica antes mencionada.

1.5 Planteamiento del problema e hipótesis de solución

Lo planteado en los numerales 1.2 a 1.4 muestran un río con un caudal muy importante en el puesto 29 del ranking mundial de ríos (Schumm, S. y Winkley, B., 1994), y muy variable durante el año, con gran variación en los niveles del agua, una geomorfología de materiales aluviales no consolidados dentro de una llanura aluvial de anchura apreciable, y una dinámica

muy activa. Todo esto resulta en una combinación de factores que hacen complejo predecir cuál podría ser el canal navegable futuro más estable para propósitos de navegación y de diseño de obras de encauzamiento y programación de dragados de mantenimiento de la hidrovía, para lo cual sería muy conveniente conocer la magnitud del transporte de sedimentos de fondo.

Además, la monitorización y seguimiento de los dragados de mantenimiento y predicción de cambios en el canal navegable se ha realizado usualmente mediante batimetrías sectoriales (puntuales) que no cubren todo el ancho del cauce (o sea el dominio público hidráulico) del río, que sería lo ideal; sin embargo, esto resultaría muy costoso pues consume mucho tiempo de trabajo de campo y de trabajo de gabinete (ver sección 2.2).

Ante los mencionados problemas, se presenta una alternativa de análisis mediante el uso de sensores remotos, particularmente información derivada de imágenes satelitales, para hacer comparaciones, en el sector de interés del río, de la variación de diversos factores como: i) la vegetación sobre los playones e islas, ii) la concentración de sedimentos, y iii) la variación espacial de la frontera tierra-agua, entre otros. A partir de estos factores es posible analizar y estudiar la evolución de la dinámica fluvial del río en el pasado reciente y cómo se puede proyectar esto para el futuro próximo.

Las imágenes de satélite son una de las herramientas más efectivas para censar y delimitar cuerpos de agua, especialmente en sitios aislados y remotos de difícil acceso, por lo cual ofrecen diferentes posibilidades para el análisis de la dinámica fluvial como son las imágenes de radar que no se ven afectadas por nubosidad y las imágenes que se pueden procesar empleando índices espectrales (Boothroyd et al., 2020).

1.6 Los Índices espectrales

Mediante el banco de datos e imágenes satelitales que existe desde los años 70's con la serie de los satélites Landsat y desde el año 2015 con los Sentinel, se puede obtener información a distancia de los objetos en la superficie terrestre, con reflectancia captada en diferentes longitudes de onda. Además, es posible hacer una monitorización de los cambios que suceden en diversos puntos de interés, comparando imágenes que se obtienen cada vez que un satélite pasa por el mismo sitio.

Esta información se presenta en un conjunto de imágenes que registran distintas longitudes

de onda del espectro electromagnético. El espectro se divide en una serie de regiones donde las ondas tienen un comportamiento y características homogéneas. De un lado se tienen el espectro con longitudes de onda muy pequeñas, como los rayos Gamma y los rayos X, y en el otro extremo las ondas de radio y TV con longitudes de onda muy grandes; en el tramo central del espectro se encuentra el espectro de luz visible.

La Figura 6 ilustra la variabilidad del espectro electromagnético, con indicación del porcentaje de Reflectancia (atmospheric transmission) en el eje Y y la longitud de onda en el eje X. La gráfica muestra las bandas 1 a 4 en el espectro visible (rojo, verde y azul entre 430 y 670 nm), las bandas en el infrarrojo medio y cercano (NIR) entre 850 y 1650 nm, las bandas del sensor Operational Land Imager (OLI), y del sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS) del satélite Landsat 8, así como las bandas del satélite Sentinel 2 (recuadro rojo).

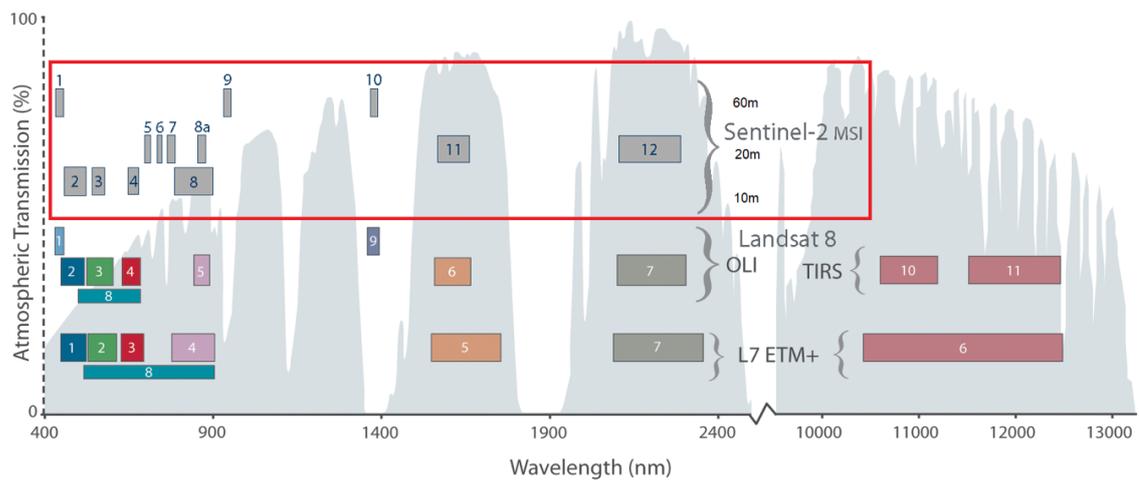


Figura 6. Espectro electromagnético y captura de información satelital (NASA)

La respuesta espectral en términos de reflectancia de los objetos en la superficie terrestre ante la radiación solar a lo largo de las diferentes longitudes de onda se define como la firma espectral. La forma de la firma espectral puede servir para identificar y caracterizar la cobertura terrestre, pero la interpretación no es sistemática ni homogénea ya que presenta alta variabilidad, y depende de diversos factores ambientales, topográficos, de iluminación de la escena, de la hora de captura, del ángulo del sol sobre el terreno, de la refracción de los rayos solares en la atmósfera, entre otros.

Es interesante anotar que para el caso de los satélites Sentinel, las imágenes presentan distintos grados de corrección de la refracción atmosférica (Copernicus/S2 - Harmonized) y

por tanto, para la mayoría de los casos con el nivel 2A, no es necesario realizar post procesamientos de las imágenes; en otros casos la reflectancia es entregada en *TOA-Top Of the Atmosphere*, y en este caso sí es necesario realizar tratamientos con software especializado. Para el nivel de procesamiento 2A, no es necesario realizar pruebas estadísticas para calibrar y validar la precisión de las imágenes.

De acuerdo con lo anterior, se pueden caracterizar distintos aspectos de la cobertura terrestre como el agua, los suelos, la vegetación y el medio donde estos interactúan, como los ríos. Basado en lo anterior y en relación con el objetivo del presente TFM, los sensores remotos representan una herramienta fundamental para estudiar la dinámica fluvial en lugares con información limitada.

1.7 Objetivos general y específico

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo tiene por objeto general presentar un marco metodológico para realizar el análisis de dinámica fluvial y obtener mapas morfológicos que permitan comparar la evolución de los diferentes elementos característicos de un gran río aluvial como el Magdalena, para poder tomar decisiones oportunas sobre las posibles variaciones del río antes de emprender actuaciones como obras de encauzamiento y/o dragados cuyo objeto es el mantenimiento y mejoramiento de las condiciones de navegabilidad.

El objetivo específico es profundizar en el análisis detallado de la dinámica del río Magdalena en el tramo comprendido entre Barrancabermeja - río Sogamoso, mediante el uso de imágenes satelitales procesadas con diversos Índices Espectrales.

Para ello se empleó la herramienta de Google Earth Engine – GEE (Boothroyd et al., 2020) e imágenes Sentinel 2, y se seleccionó de entre aproximadamente 15 Índices Espectrales, trabajar con seis de los Índices más representativos que definen la extensión y variabilidad de la superficie del agua, agua con sedimentos y la vegetación sobre playones e islas, como **NDWI** (Normalized Difference Water Index), **MNDWI** (Modified Normalized Difference Water Index), **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index), **SWM** (Sentinel Water Mask), **AWEInsh** (Automated Water Extraction Index no shadow), **LSWI** (Land Surface Water Index).

En el capítulo 3 se hace un análisis detallado sobre la selección de los Índices para la propuesta metodológica del presente trabajo.

2. DEFINICIÓN DEL SECTOR CRÍTICO PARA ANÁLISIS

2.1 Tramos de alta dinámica

Dentro del tramo comprendido entre Barrancabermeja y el río Sogamoso, el sector conocido como Bufalera-Bocas es el de más alta dinámica fluvial, de acuerdo con la experiencia del autor en trabajos de dirección de estudios hidrográficos en el río Magdalena durante los últimos 40 años y supervisión de campo de labores de dragado para el mejoramiento de las condiciones de navegación en esta zona. Este sector se ilustra en el recuadro de la Figura 7 y la extensión como área piloto se definió de acuerdo con la Dirección del TFM. La figura también muestra las orillas, islas y playones en diferentes épocas, según aerofotografías e imágenes de Google Earth de diferentes épocas.

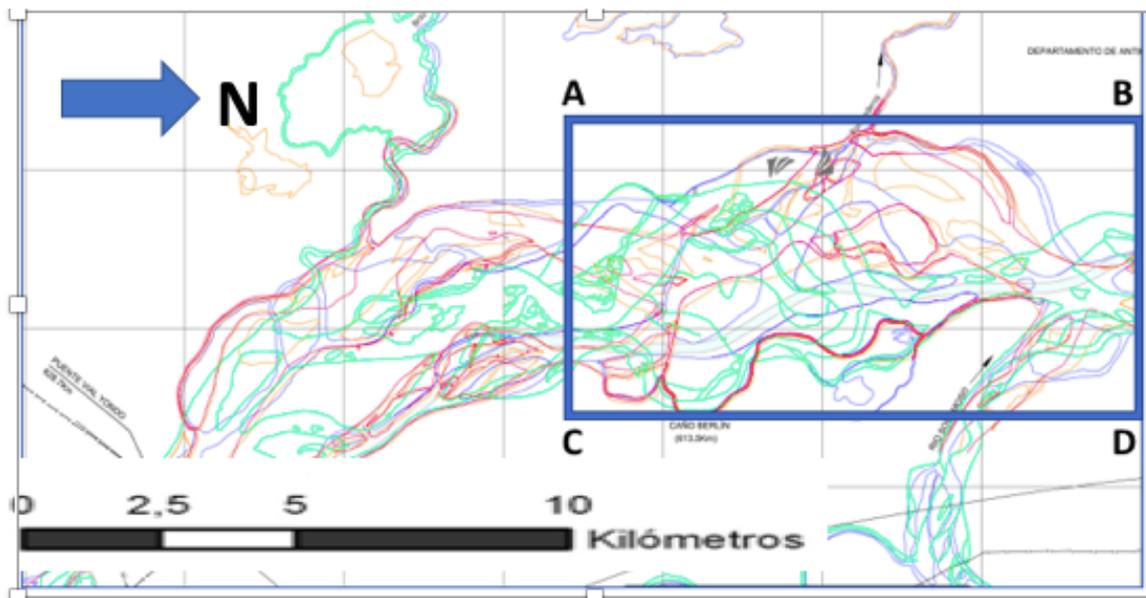


Figura 7. Sector Bufalera-Bocas en el recuadro. Las líneas verdes corresponden a 1976, las rojas a 2004, las naranjas a 2005 y las azules a 2012 (IEH Grucon, 2013).

El área comprendida dentro del recuadro tiene aproximadamente 5 km de ancho en el sentido EW y 10 km de largo en el sentido NS, para un área de 50 km².

En la Tabla siguiente se indican las coordenadas geográficas de los cuatro puntos que definen el recuadro Bufalera-Bocas que constituye el sector de interés:

Tabla 1. Localización del Recuadro del sector Bufalera-Bocas

COORDENADAS				
GEOGRÁFICAS			PLANAS DE GAUSS KRUGER ORIGEN CENTRAL EPSG:3116 (1)	
PUNTO	LATITUD (GMMSS)	LONGITUD (GGMMSS)	ESTE (m)	NORTE (m)
A	7° 07' 41.3338" N	73° 57' 02.7750" W	1.014.000	1.280.000
B	7° 13' 06.8550" N	73° 57' 02.6849" W	1.014.000	1.290.000
C	7° 07' 41.2811" N	73° 54' 19.8277" W	1.019.000	1.280.000
D	7° 13' 06.8017" N	73° 54' 19.7055" W	1.019.000	1.290.000

(1) Según definición del Instituto Geográfico de Colombia - IGAC

2.2 Análisis tradicional de la dinámica fluvial del sector

Dentro del recuadro de Bufalera-Bocas se han determinado diversas localizaciones del canal navegable principal del río en el curso de los últimos años (2012-2022), mediante levantamientos batimétricos periódicos que se debían realizar como parte de los contratos de dragado.

Para ilustrar lo anterior, se presentan las Figura 8 y Figura 9, las cuales fueron suministradas al autor por el Consorcio Panamerican Dredging, durante los trabajos de dragado efectuados en el año 2021 en el sector de interés. Se evidencia para dos fechas diferentes, noviembre 2020 y marzo 2021, los cambios del canal navegable en este sector.

Es de anotar que entre las dos fechas estuvo activo el contrato de dragado para habilitar la profundidad del canal navegable, con una profundidad de 1,80 m bajo el nivel de referencia de aguas bajas y 52 m de anchura, lo cual no era efectuado a todo lo largo del sector, solamente en los sitios críticos.

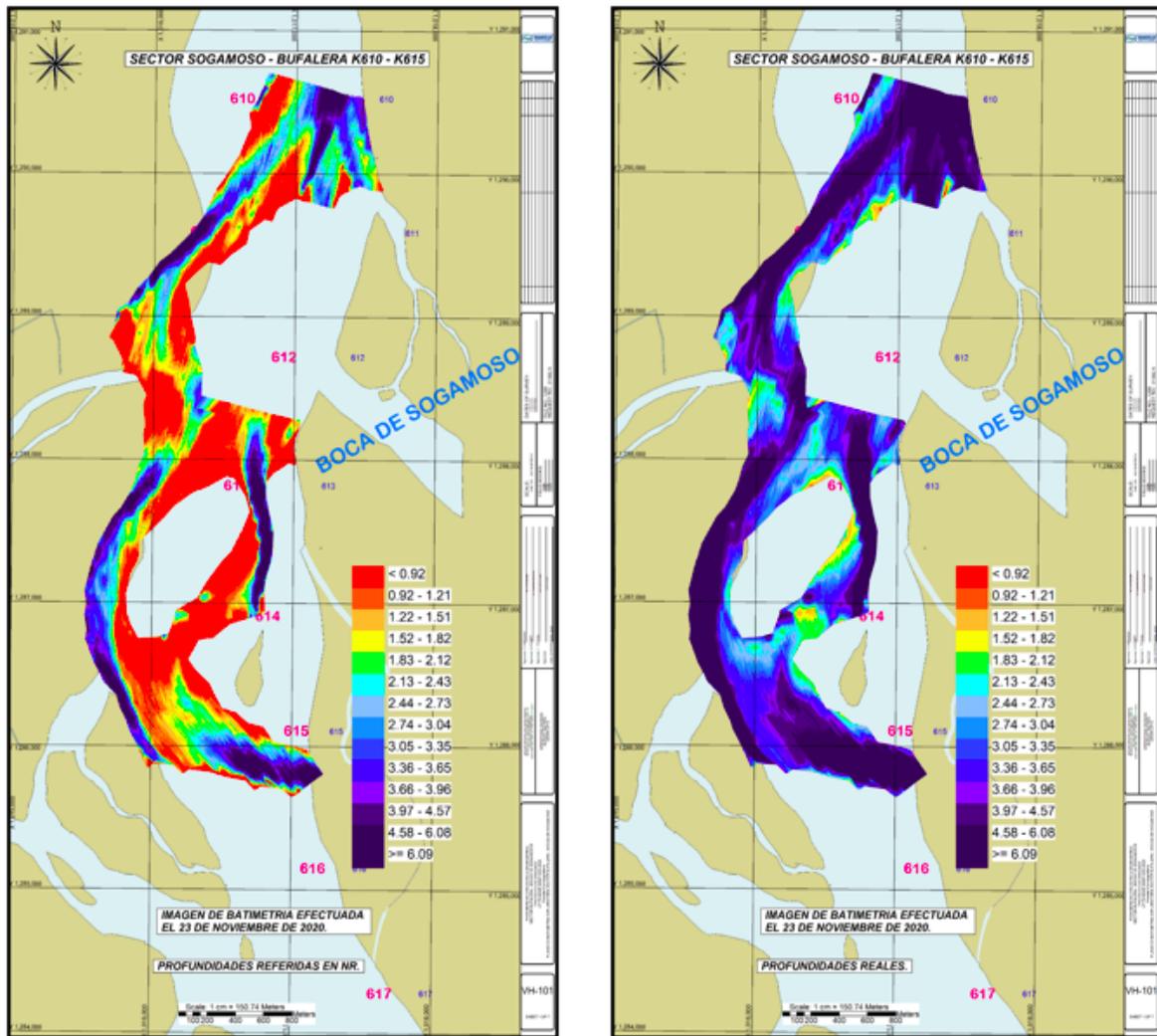


Figura 8. Batimetría del sector Bufalera – Bocas del Sogamoso, noviembre 23 de 2020, en condición de aguas altas.

Nota: La de la izquierda corresponde a profundidades bajo el nivel de reducción para navegación (excedido el 95% del tiempo); la de la derecha a profundidades reales (Información personal suministrada por el Consorcio Panamerican Dredging durante los trabajos de dragado, 2021).

SECTOR: BOCAS DE SOGAMOSO - BUFALERA DEL K610 AL K617. 16/03/2021

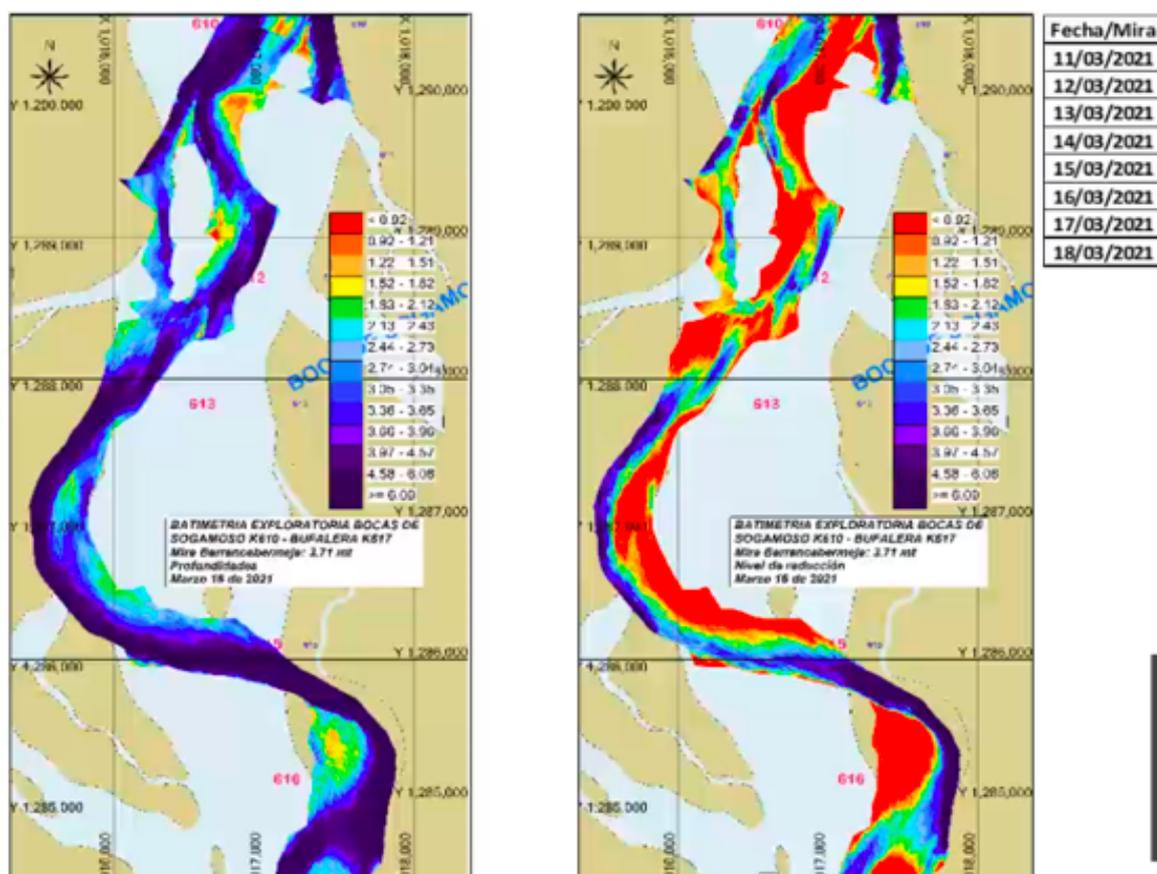


Figura 9. Batimetría del sector Bufalera – Bocas del Sogamoso, marzo 16 de 2021, en condición de aguas bajas.

Nota: La de la derecha corresponde a profundidades bajo el nivel de reducción para navegación (excedido el 95% del tiempo); la de la izquierda a profundidades reales (Información personal suministrada por el Consorcio Panamerican Dredging durante los trabajos de dragado, 2021).

Como puede observarse en ambas figuras, las batimetrías se efectuaron sobre el área de influencia del canal navegable, pero el resto del cauce del río (en azul claro) no fue censado, entre otras razones porque no era necesario (brazos con muy poca profundidad donde la embarcación de batimetría no entraba por ser el calado mayor a la profundidad) y porque sería muy costoso y muy demandante en tiempo realizarlo.

De acuerdo con los levantamientos de monitoreo y control de evolución de los fondos, y las variaciones observadas en el área de influencia del canal navegable, tanto en planta como en perfil de fondo, se planeaban los dragados que debían realizarse en la siguiente campaña, dependiendo de la variación de los niveles en el río. En muy raras ocasiones se han efectuado levantamientos batimétricos por fuera del área de influencia del canal navegable con el objeto de analizar dinámicas en otros sectores.

Esto permite concluir que los análisis tradicionales de la dinámica fluvial del río Magdalena en el sector de interés para la navegación han sido limitados en cuanto al cubrimiento espacial del cauce del río, y no permiten predecir la evolución probable de otros brazos que podrían eventualmente convertirse en el brazo principal, como resultado de los fenómenos simultáneos de erosión y sedimentación a lo largo del cauce, o sea en el dominio público hidráulico.

Adicionalmente, los esfuerzos en actividades de evaluación de la dinámica del río y el correspondiente dragado sólo se hacen cuando se presentan problemas por niveles bajos y poca profundidad, lo cual ocurre cuando comienzan los meses de estiaje hidrológico, es decir en el período enero – marzo y en julio - septiembre, con variaciones esperadas por la variabilidad del ciclo hidrológico en la cuenca. Lo anterior también permite concluir que no hay una continuidad temporal en el seguimiento y monitoreo de la dinámica fluvial.

Vale la pena añadir que estos planteamientos son válidos a lo largo de aproximadamente 100 km del río, y no sólo en el sector de 10 km analizados en este TFM. De modo que el sector seleccionado es sólo un área piloto para el análisis que se presenta en los siguientes capítulos.

3. ANÁLISIS CON ÍNDICES ESPECTRALES DEL SECTOR BUFALERA –BOCAS DEL RÍO SOGAMOSO

De acuerdo con las definiciones del capítulo anterior y lo planteado en la sección 1.5, en el presente capítulo se analizan brevemente otros estudios de dinámica fluvial adelantados por terceros, se define el conjunto de índices espectrales propuestos y se seleccionan los satélites y las imágenes sobre las cuales se realiza el análisis.

3.1 Estudios adelantados por otros autores

Aunque se determinó que existen diversos estudios que tratan el tema de dinámica fluvial, preliminarmente se enfocó la investigación a determinar los estudios o trabajos anteriores relacionados solamente con ríos tropicales que exhiben una naturaleza comparable a la del río Magdalena. En la Tabla 2 se presenta un compendio de los estudios realizados desde la década de los 80 hasta fechas recientes. Aunque todos los estudios se basaban en imágenes satelitales, no todos los estudios utilizaron índices espectrales.

Por esa razón se identificaron otros estudios y trabajos que incluyen ríos que, aunque no son tropicales, sí que incluyen el uso de Índices Espectrales (Tabla 3).

Tabla 2. Estudios de dinámica fluvial en ríos tropicales con imágenes satelitales (1)

RÍO	PAÍS	SATÉLITE	FECHAS DE IMÁGENES	RESOLUCIÓN TEMPORAL	ÁREA CUBIERTA	RESOLUCIÓN ESPACIAL	APLICACIÓN	USO DE INDICES	AUTOR
1. Ucayalí - Marañón	Perú	Landsat	1979 - 1983	Interanual	100 km	50 m	Estimación tasa de erosión lateral	NO	Puhakka et al (1992) and Salo et al (1986)
2. Araguaia	Brasil	Landsat	1965 - 1998	Decadal	570 km	50 m	Cartografía geomorfológica y estimación de sedimentación	NO	Latrubesse et al (2009)
3. Taquarí	Brasil	Landsat, Spot	1985 - 2009 (99 imágenes)	Anual y estacional	250 km		Dinámica de sedimentación / avulsión	SI NDVI	Buehler et al (2011)
4. Amazonas (cuenca)	Brasil	Landsat	1987 - 2017	Decadal	4000 km	50 m	Dinámica de meandros en 1600 casos	SI MNDWI	Sylvester et al (2019)
5. Ganges - Padma	Bangladesh	Landsat, Spot	1973 - 2011	Interanual	314 km	50 m	Evolución en planta, correlación con caudal medio	NO	Dewan et al (2017)
6. Brahmaputra	Bangladesh	Landsat, Spot	1973 - 1991	Interanual	220 km		Evolución morfodinámica de barras de sedimentos	NO	Thorne et al (1993)
7. Brahmaputra	Bangladesh	Corona, Landsat MSS, Landsat TM	1967 - 2002 (14 fechas)	Bienal	200 km	10/ 80/ 30 m	Ancho del cinturón trenzado, número y ancho de canales	NO	Takagi et al (2007)
8. Mekong	China	Ikonos, Spot 5	1998 - 2004		2500 km	1 a 10 m	Morfología canales	NO	Gutpa et Liew (2007)
9. Mekong	Laos	Spot	1996 - 1999	Interanual			Evolución en planta	NO	Gupta et al (2002)
10. Sittang	Myanmar	Landsat y Spot	1987 - 2017	Anual	80 km		Migración cíclica del canal en el estuario	NO	Shimozono et al (2019)
11. Strickland	Papua, Nueva Guinea	Landsat	1972, 1990/1993, 2000/2001	Decadal	330 km	14 a 57 m	Dinámica y anchura de canal	NO	Aalto et al (2008)
12. Okavango delta	Botswana	Landsat	Modelación de 50 años				Cambios en hidrología, inundación de llanura aluvial	NO	Wolsky et al (2008)

(1) Adaptado de Boothroyd et al, 2020; de Piégay et al (2012) y de Grégory et al(2012)

Es de anotar que sólo las referencias 3 y 4 utilizaron índices espectrales. Para el río Taquarí, se utilizó NDVI, Wetness Index; para el río Amazonas, MNDWI, Multi Scale Singularity Index. Para el río Sittang, las líneas de costa fueron extraídas con Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis. En los ríos Strickland y Okavango sólo se hizo una digitalización manual.

Tabla 3. Estudios de dinámica fluvial en otros ríos con imágenes satelitales e índices espectrales.

RÍO	PAÍS	SATÉLITE	FECHAS	RESOLUCIÓN TEMPORAL	ÁREA CUBIERTA	RESOLUCIÓN ESPACIAL	APLICACIÓN	INDICES	AUTOR
Tagliamento	Italia	ASTER	2005 - 2009	Anual	1.32 km ²	10m	Colonización de vegetación de ribera en ríos trenzados	NDVI	Bertoldi, et al., 2011
San Diego	EEUU	Landsat 8	2018 - 2019	Estacional	5 km ²	30m	Dinámica de la evolución de la vegetación de ribera en tramos urbanos	NBR, NDVI	Mathews and Kinishita, 2020
Mincio	Italia	Landsat	1975-2019	Anual		60m, 30m	Evolucion de especies invasoras	WAVI	Pinardi et al., 2021
Tagliamento	Italia	Landsat	1984 - 2011	Anual	2580 km ²	30m	Evaluación de dinámica fluvial	NDVI	Henshaw et al., 2013
Rios varios	Albania	CORONA, Landsat, Sentinel-2	1968 - 2017	Anual	diversas	30m, 10m	Caracterización multitemporal y morfológica de ríos	NDVI, NDWI	Spada et al., 2018
Brahmaputra	India	Landsat	1973 2009	Anual	350 km ²	30m	Estudio de la inestabilidad de ríos trenzados	NDWI	Karmaker et al., 2017
San Andrés (isla)	Colombia	Worldview2 y 3	2016-2017	Puntual	272 km ²	0.5m, 2m	Caracterización geomorfológica en zonas insulares	NDVI, NDWI, I_CEDX	Ariza, et al., 2018
Cagayan	Filipinas	Sentinel-2	2019 - 2020	Anual	27000 km ²	10m , 20m	Detección en los cambios de sinuosidad del canal	NDVI, EVI, NDWI, MNDWI	Boothroyd et al., 2020
Vistula	Polonia	Sentinel-1	2015-2018	Anual	194.000 km ¹	25m	Dinámica del canal, delineación de los bancos	VV, VH	Kryniecka et al, 2022
Vistula	Polonia	Sentinel-2	2015-2019	Anual	194.000 km ²	10m , 20m	Estudio alternativo Movimiento de bancos de arena	NDWI, MNDWI, AWEIsh, AWEInsh, SWM	Kludia Kryniecka and Artur Magnuszewski, 2021

Datos de la Tabla adaptados de los autores indicados en la última columna.

Son de particular importancia los datos de las filas 9 y 10 sobre el río Vístula en Polonia, por la magnitud del área cubierta (194.000 km²), y por la semejanza de la aplicación.

De la revisión de los artículos relacionados en la Tabla 3 se determinó que los casos que más se acercan a la problemática del río Magdalena, son los dos del río Vístula en Polonia y el de los ríos de Albania.

3.2 Índices Espectrales utilizados

Los índices espectrales se obtienen mediante la combinación algebraica de los valores de reflectancia de las diferentes bandas que ofrecen los satélites. Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se decidió trabajar con seis de los Índices más representativos que definen la extensión y variabilidad de la superficie del agua, agua con sedimentos y la vegetación sobre playones e islas: **NDWI** (Normalized Difference Water Index), **MNDWI** (Modified Normalized Difference Water Index), **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index), **SWM** (Sentinel Water Mask), **AWEInsh** (Automated Water Extraction Index no shadow), **LSWI** (Land Surface Water Index). Los índices seleccionados responden a las necesidades generales para el análisis de dinámica fluvial por su fiabilidad y simplicidad en la aplicación. A continuación, se describen cada uno de los índices y las fórmulas para calcularlos basados en las bandas espectrales.

NDWI - Normalized Difference Water Index (McFeeters, 1996): Este índice está diseñado para maximizar la reflectancia del agua usando la banda del Verde (GREEN) y minimizar la alta reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) en coberturas vegetales y de suelo adyacente. Es un producto adimensional que varía entre -1 y $+1$; los valores > 0 indican presencia de agua.

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR}) \quad (1)$$

MNDWI - Modified Normalized Difference Water Index (Xu, 2006): Es una modificación del anterior para resaltar las características de aguas abiertas usando la banda del verde (GREEN) y el infrarrojo medio (SWIR). Presenta los mismos valores de umbral que el NDWI, es decir que también es un producto adimensional que varía entre -1 y $+1$; los valores > 0 indican presencia de agua.

$$\text{MNDWI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR}) \quad (2)$$

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1974): Este índice permite determinar el verdor y es un índice muy usado para seguimiento de vegetación por la gran

sensibilidad para reconocer masas vegetales en crecimiento y determinar el grado de actividad fotosintética de la vegetación. Se seleccionó para este estudio por la importancia que puede tener el crecimiento de vegetación para la consolidación de playones del río. Aprovecha el contraste de las características entre dos bandas, la del pigmento de absorción de clorofila en la banda roja (RED) y la alta reflectividad del material vegetal en la banda del infrarrojo cercano (NIR). Los valores del NDVI también son en este caso un producto adimensional que varía entre -1 y $+1$; los valores entre -1 y 0 corresponden a coberturas asociadas con agua, nieve, vapor de agua y/o nubes. Los valores mayores a 0 y hasta 0.2 del NDVI corresponden a coberturas de suelos desnudos, roquedos y zonas construidas. Los valores mayores a 0.2 corresponden al estado de la cobertura de vegetación.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (3)$$

SWM - Sentinel Water Mask (Milczarek et al., 2017): Este índice nuevo se ha propuesto para la detección de agua y se ha adaptado especialmente para las imágenes del satélite Sentinel 2. SWM proporciona una detección rápida y efectiva que es especialmente importante en manejo de crisis causadas por inundaciones y evaluación de los daños y extensión de las mismas. Los valores de umbral óptimo para detección de áreas con agua y sin agua (por ejemplo para detección de ríos menores) se encuentran entre $1,4$ y $1,6$.

$$\text{SWM} = (\text{BLUE} + \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}) \quad (4)$$

AWELnsh - Automated Water Extraction Index - no shadow (Feyisa et al, 2014): Este índice mejora la precisión en la extracción de agua en presencia de varios tipos de entornos ambientales. Está formulado para efectivamente eliminar los píxeles que no tienen agua, incluyendo áreas oscuras y con sombras, que son a veces confundidos con agua.

$$\text{AWEInsh} = 4 * (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) - (0.25 * \text{NIR} + 2.75 * \text{SWIR 2}) \quad (5)$$

LSWI - Land Surface Water Index (Xiao et al, 2002): Este índice sirve para evaluar el contenido de humedad en la vegetación. En muchos artículos sobre uso de índices espectrales se presenta en asociación con el NDVI. Varía entre -1 y 1 ; los valores cercanos a 1 indican presencia de agua.

$$\text{LSWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR} * (2.13)) / (\text{NIR} + \text{SWIR} * (2.13)) \quad (6)$$

3.3 Satélites seleccionados y bandas

El Sentinel-2 mide la reflectancia en 13 bandas espectrales con alta resolución espacial variable entre 10, 20 y 60 m, y pueden presentar nuevas imágenes del mismo sitio cada 5 días. Esta alta frecuencia de paso por el mismo sitio se consideró importante para determinar la fuente de información satelital para el presente trabajo. Para el caso del satélite Sentinel-2 se dispone de la siguiente nomenclatura para las bandas:

Tabla 4. Satélite Sentinel 2 - Nomenclatura de las bandas

Bandas	Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0.43 - 0.45	60
Banda 2 - Blue	0.45 - 0.52	10
Banda 3 - Green	0.54 - 0.57	10
Banda 4 - Red	0.65 - 0.68	10
Banda 5 – Red edge 1	0.69 - 0.71	20
Banda 6 – Red edge 2	0.73 - 0.74	20
Banda 7 – Red edge 3	0.77 - 0.79	20
Banda 8 – Near Infrared (NIR) 1	0.78 - 0.90	10
Banda 8A – Near Infrared (NIR) 2	0.85 - 0.87	20
Banda 9 – Water vapour	0.93 - 0.95	60
Banda 10 - Cirrus	1.36 - 1.39	60
Banda 11 – SWIR 1	1.56 - 1.65	20
Banda 12 – SWIR 2	2,10 - 2,28	20

3.4 Fechas y períodos seleccionados

Con el fin de aplicar los índices descritos en la sección 3.2, al sector de análisis escogido entre Barrancabermeja y Bocas del Sogamoso (ver recuadro en Figura 7), se decidió hacer el análisis de la dinámica del río durante un lapso de 7 años, desde 2016 hasta 2022, y solamente durante los meses de enero a marzo, que corresponden al período de mayor estiaje en la zona del Magdalena medio, es decir en la condición de aguas más bajas, que es la época en que mejor se evidencia la dinámica del río y cuando normalmente se requieren labores de dragado para poder mantener profundidades adecuadas para la navegación; varios autores de la Tabla 3 (Kryniewska et al., 2022) recomiendan hacer los análisis de dinámica fluvial en época de aguas bajas.

Se obtuvieron para cada año 6 mapas de cada mes (para cada uno de los índices espectrales que se analizan), para un total de 18 mapas por año y un total de 126 mapas en los 7 años.

3.5 Análisis efectuados

El planteamiento anterior permite hacer dos tipos de análisis con las imágenes satelitales procesadas con diferentes índices espectrales, para el sector crítico de interés antes definido y para el período del primer trimestre de cada año desde 2016 hasta 2022:

- i) la comparación entre los mapas de un mismo mes para cada índice, es decir una comparación cualitativa de qué tan representativo para cada caso es cada índice, y
- ii) la comparación de la evolución de un sitio o sector específico a lo largo del tiempo en un trimestre y a lo largo de todos los años, es decir la dinámica fluvial propiamente dicha, con base en los mejores índices determinados en el punto anterior.

Para obtener los mapas con los índices espectrales, se utilizó la herramienta de Google Earth Engine - GEE, empleando el Código Fuente o Script que se presenta en el Anexo 1. La serie de todos los mapas obtenidos se presenta en el Anexo 2.

3.5.1 Comparación visual entre los mapas de un mismo mes para varios índices

Después de hacer un análisis visual preliminar de todos los mapas, se seleccionaron nueve fechas diferentes para ilustrar la aptitud de la representación de los seis índices espectrales seleccionados para cada caso: enero 2016, marzo 2016, febrero 2017, enero 2018, marzo 2018, febrero 2019, febrero 2020, enero 2021, y febrero 2022; la imagen de cada mes corresponde al mosaico de las mejores imágenes tomadas por el satélite en cada mes. Es importante indicar que este primer análisis es de tipo cualitativo.

Enero 2016:

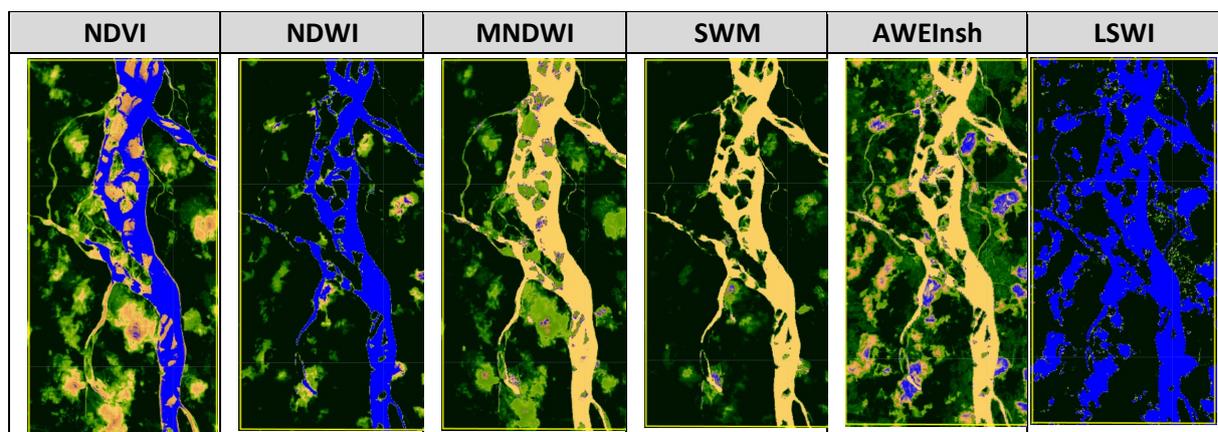


Figura 10. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2016.

En este primer análisis, se puede apreciar que las cuatro imágenes **NDVI**, **MNDWI**, **SWM** y **AWEInsh** son las que ilustran con claridad el contraste entre el agua (el cauce principal del río y los diferentes brazos) y el conjunto de orillas, islas y playones. En la imagen de **NDWI** se pierden varios brazos secundarios y en la imagen de **LSWI** se confunden las nubes con agua, limitando el alcance de este índice en presencia de moteo de nubes en la imagen.

Marzo 2016:

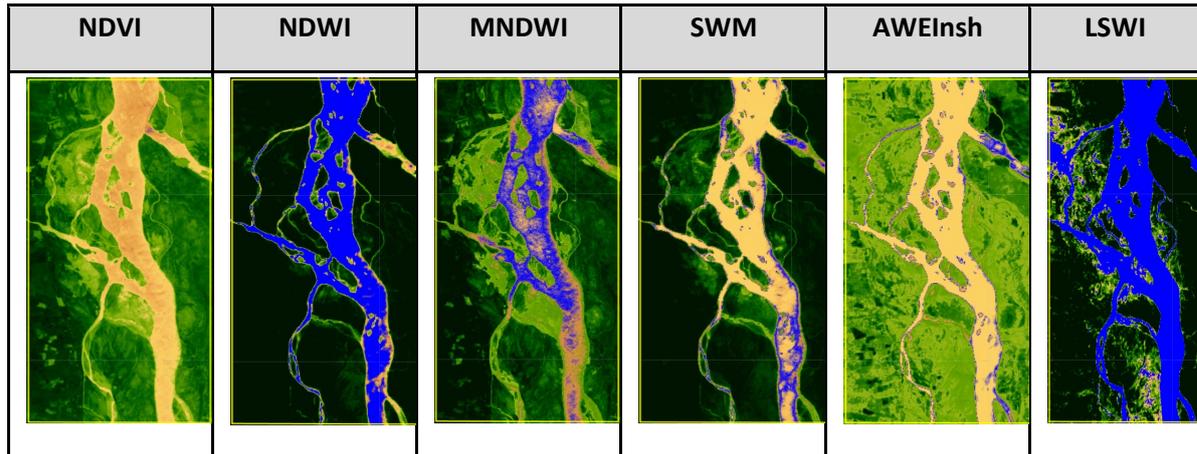


Figura 11. Índices espectrales del sector de interés en Marzo 2016.

En este caso se vuelve a repetir un patrón semejante. Las imágenes con mayor detalle son las cinco de la izquierda; la imagen de **LSWI** tiene un alcance limitado pues incorpora áreas aledañas como si fueran cauce del río, como puede observarse en el extremo superior izquierdo de dicha imagen.

Febrero 2017:

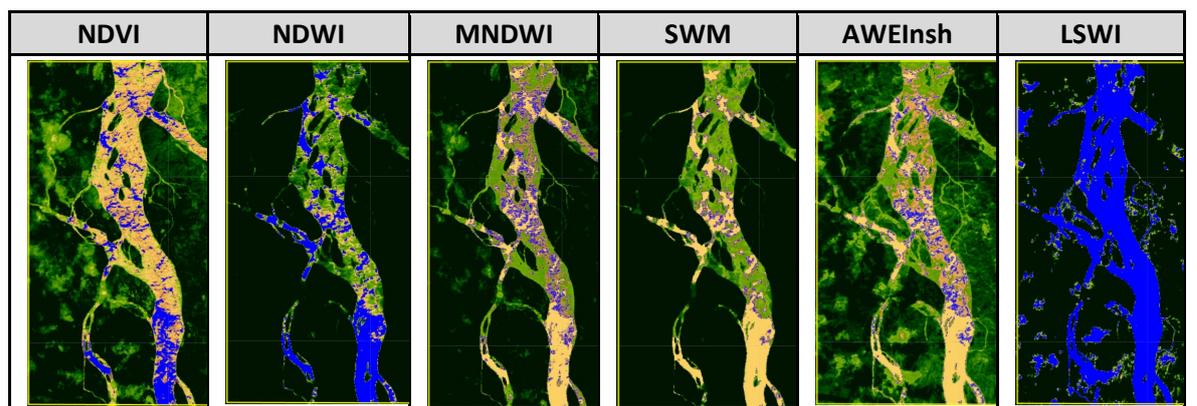


Figura 12. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2017.

Se aprecia una mayor nitidez en la interfase entre agua y tierra con las imágenes de los índices **NDVI** y **MNDWI**, como se puede ver en la parte superior derecha de ambas imágenes, donde se notan los dos brazuelos que forman el delta de la desembocadura del río

Sogamoso al Magdalena, lo cual no es evidente en el resto de las imágenes. Nuevamente se nota en la imagen de **LSWI** la aparición de agua donde probablemente hay vegetación húmeda pero no brazos del río, lo que puede llevar a interpretaciones erróneas en análisis de dinámica fluvial.

Enero 2018

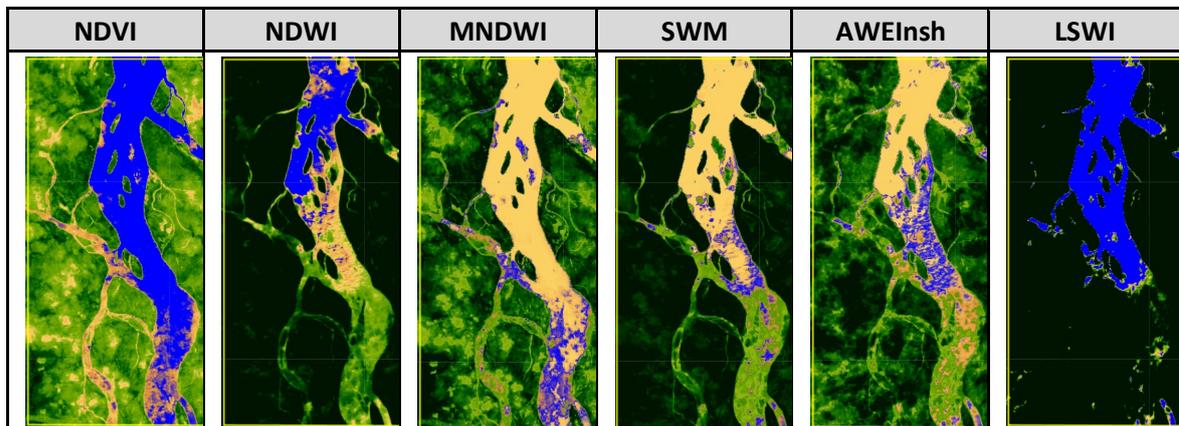


Figura 13. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2018.

Las imágenes que reflejan mayor detalle son las correspondientes a **NDVI**, **NDWI** y **SWM**. De nuevo la imagen de **LSWI** presenta alcance limitado pues sólo se cuenta con una mancha negra en la porción sur del mapa, donde otros índices como **SWM** muestran que podría haber nubes de baja densidad. El sector norte de todas las imágenes tiene mejor definición pues no hay presencia de nubes.

Marzo 2018

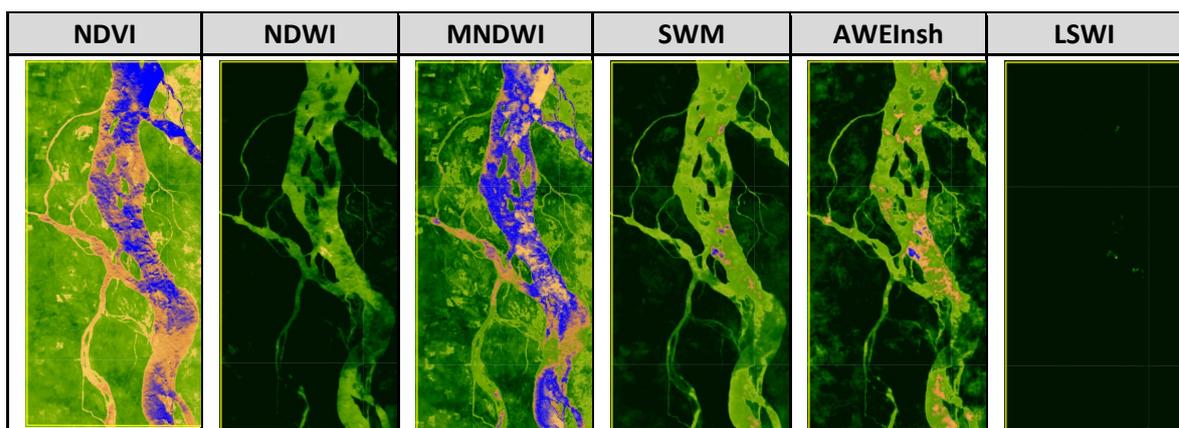


Figura 14. Índices espectrales del sector de interés en Marzo 2018.

Nuevamente **LSWI** aparece en negro, por lo que no es de utilidad en este caso. La interfase agua-tierra se aprecia de forma distinta en las imágenes **NDVI** y **NDWI**, en comparación con **NDWI**, **SWM** y **AWEInsh**. En **NDVI** se aprecian muy bien los brazos secundarios, en

NDWI un poco menor; en ambas imágenes la parte del cauce principal se nota con diversas formas de colores además de las islas (probablemente agua con gran concentración de sedimentos). En las imágenes **NDWI**, **SWM** y **AWEInsh** la vegetación se detecta muy oscura y las islas vegetadas se destacan en medio del cauce.

Febrero 2019

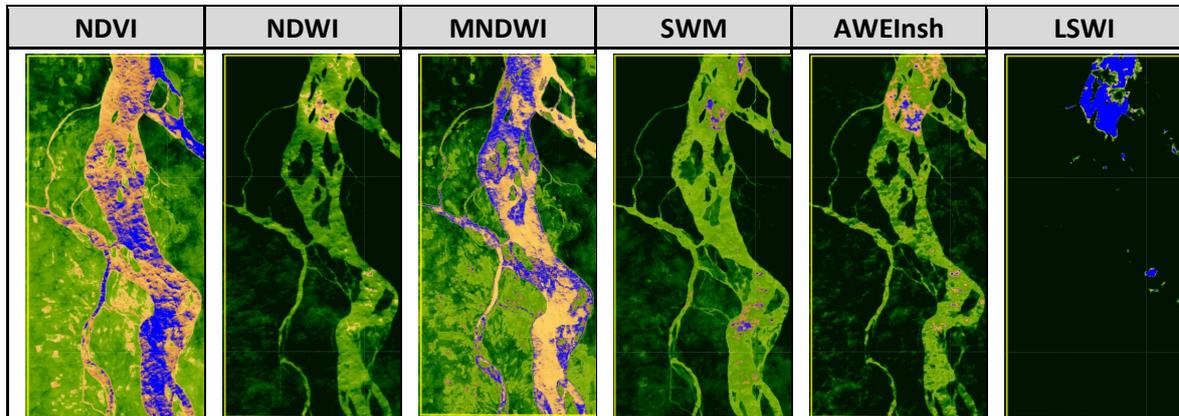


Figura 15. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2019.

Nuevamente **LSWI** aparece en negro, por lo que no se puede usar. Las mejores características de formas dentro del cauce del río, tales como islas y playones, se aprecian en las imágenes **NDWI**, **SWM**, y **AWEInsh**. Las imágenes de **NDVI** y **MNDWI** presentan muchos colores en la parte de agua que demandarían un esfuerzo adicional para su interpretación.

Febrero 2020

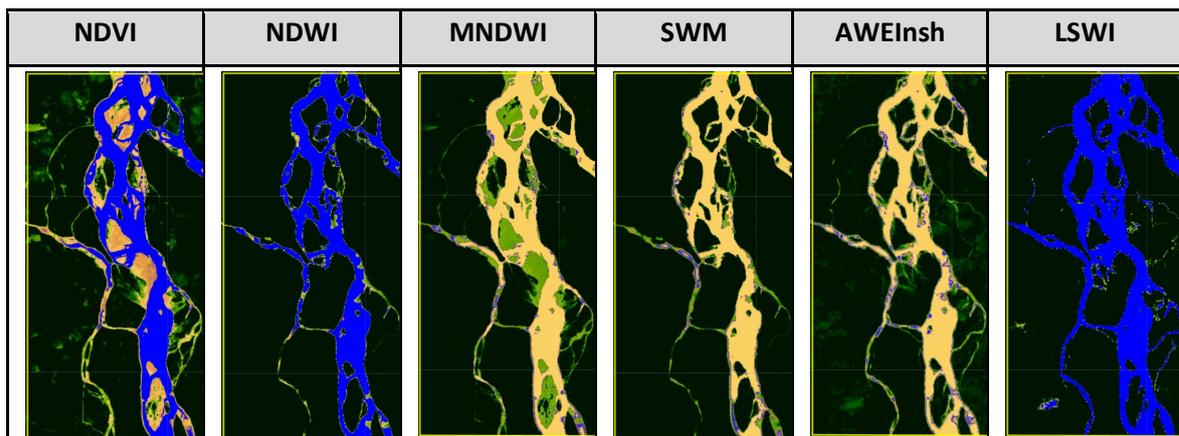


Figura 16. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2020.

En este caso todas las imágenes muestran buena definición en la interfase agua- tierra, tanto en las orillas como en las islas y playones.

Sin embargo, hay que resaltar que las imágenes de **NDVI** y **MNDWI** muestran diferentes coloraciones en las formas dentro del cauce, por lo que se puede colegir que permiten hacer diferenciaciones entre islas con vegetación y playones de arena sin vegetación, información que es muy útil para análisis de dinámica fluvial.

Enero 2021

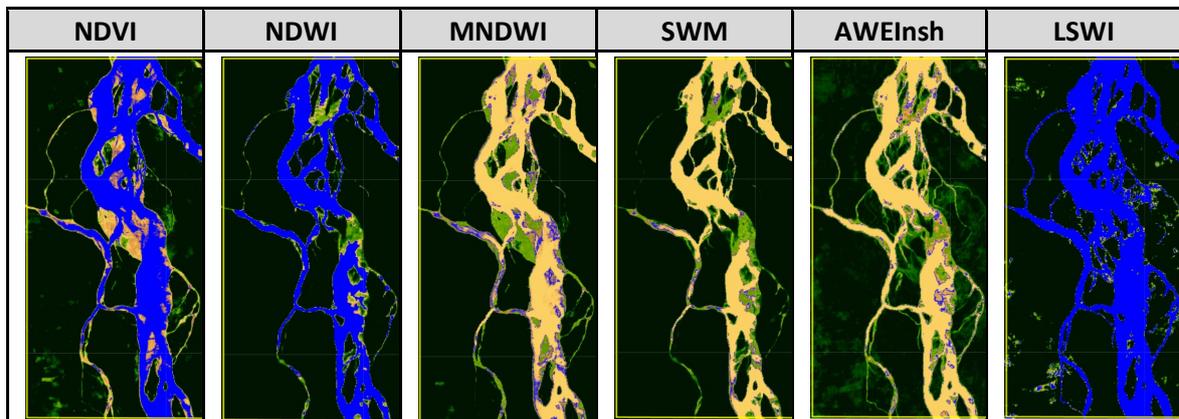


Figura 17. Índices espectrales del sector de interés en Enero 2021.

Nuevamente todas las imágenes muestran buena definición en la interfase agua- tierra, tanto en las orillas como en las islas y playones, aunque se nota alguna interpretación de agua en algunas zonas de la imagen de **LSWI** donde todas las demás imágenes muestran un brazo en proceso de cierre. De nuevo se notan los diferentes colores en las formas dentro del cauce en **NDVI** y **MNDWI**, para hacer diferenciaciones entre islas con vegetación y playones de arena sin vegetación. La mejor definición de brazos secundarios laterales se tiene con **AWEInsh**.

Febrero 2022

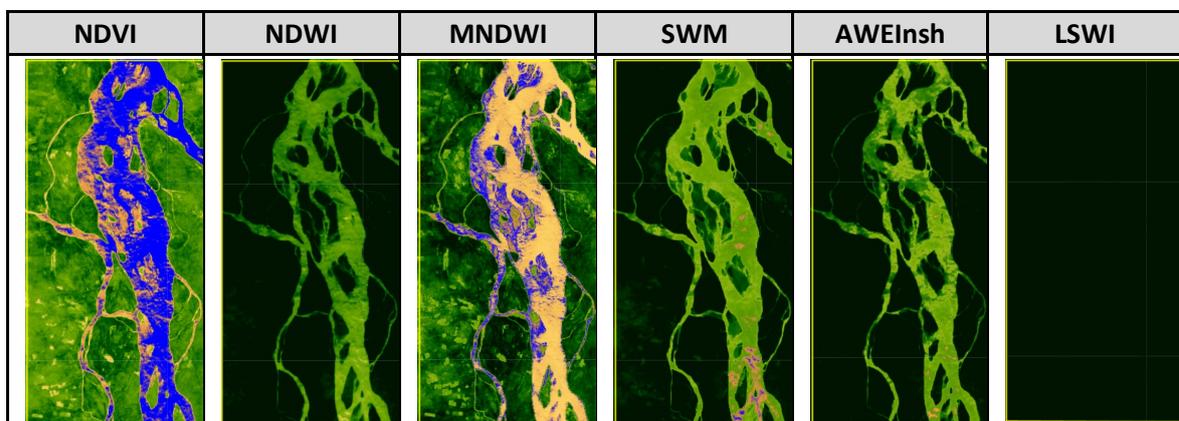


Figura 18. Índices espectrales del sector de interés en Febrero 2022.

Las mejores imágenes para análisis de la dinámica de islas y playones son las de **NDWI**, **SWM** y **AWEInsh**, aunque **NDVI** y **MNDWI** muestran también un cauce principal bien definido. Otra vez aparece la imagen del índice **LSWI** en negro.

Del análisis anterior de nueve fechas distintas comparando las imágenes satelitales procesadas con diferentes índices espectrales se pueden hacer la siguiente evaluación visual cualitativa:

- **NDVI**: se determinó como una buena imagen para análisis de dinámica en 7 casos.
- **NDWI**: buena imagen para análisis de dinámica en 4 casos.
- **MNDWI**: buena imagen para análisis de dinámica en 6 casos.
- **SWM**: buena imagen para análisis de dinámica en 5 casos.
- **AWEInsh**: buena imagen para análisis de dinámica en 5 casos.
- **LSWI**: imágenes no útiles en este caso para análisis de dinámica fluvial.

Para los análisis que siguen, se utilizarán por lo tanto las imágenes procesadas con **NDVI** y **MNDWI**, pues son los índices que mejor representan la interface agua-tierra y que mejor permiten diferenciar las formas en el cauce del río, como las áreas con vegetación y sin ella; la combinación **NDVI + MNDWI** es muy potente. Al revisar los índices utilizados por los autores relacionados en las Tabla 2 y Tabla 3 se puede evidenciar que el índice **NDVI** ha sido el más utilizado en estudios de morfología de ríos (Boothroyd et al., 2020), aunque en algunos casos el objeto del análisis no coincida con el de este TFM, como es el caso de los ríos Tagliamento y San Diego (ver Tabla 3), en cuyo caso se utilizaron para análisis de cubrimiento y evolución de áreas con vegetación en rondas de ríos.

3.5.2 Análisis de dinámica fluvial con índices NDVI y MNDWI

Para una mejor comprensión de la dinámica fluvial es indispensable realizar una comparación de la evolución espacial de algunas características del río empleando una comparación temporal de los índices generados. Con este fin, se van a comparar las imágenes satelitales de todos los meses de enero y todos los meses de marzo de los últimos 7 años procesadas con los índices **NDVI** y **MNDWI**.

Análisis comparativo del estado hidrológico

Para complementar el análisis espacial comparativo de las imágenes, hay que relacionarlas con el estado hidrológico del río en los mismos meses, es decir si el río estaba en aguas altas

que cubrían algunos elementos del cauce como islas y playones, o si estaba en aguas bajas con los mismos elementos despejados, lo cual se ilustra en las Figura 19 y Figura 20.

Las barras azules indican el nivel registrado el día 15 de enero y 15 de marzo de cada año según datos del Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM de Colombia¹; la línea roja indica el nivel medio multianual; y la línea verde indica el nivel que es excedido el 90% del tiempo, es decir que es representativo de una situación de aguas bajas típicas del primer trimestre del año.

La Figura 19 y Figura 20 muestran que en enero de 2016 y 2019 se registraron niveles extremadamente bajos; en marzo de 2016 se mantenían los niveles bajos, pero en marzo del 2019 los niveles del río ya eran cercanos al nivel medio.

En los años 2017 y 2021 los niveles de enero son iguales al promedio, pero en marzo son niveles representativos de aguas muy altas para esa época, es decir superiores a los que se presentan típicamente en el primer trimestre.

El año 2018 es muy húmedo en enero pero muy seco en marzo. Por último, los años 2020 y 2022 están en el rango de las aguas bajas típicas de la época de principios de año en enero, pero en marzo corresponden a aguas altas.

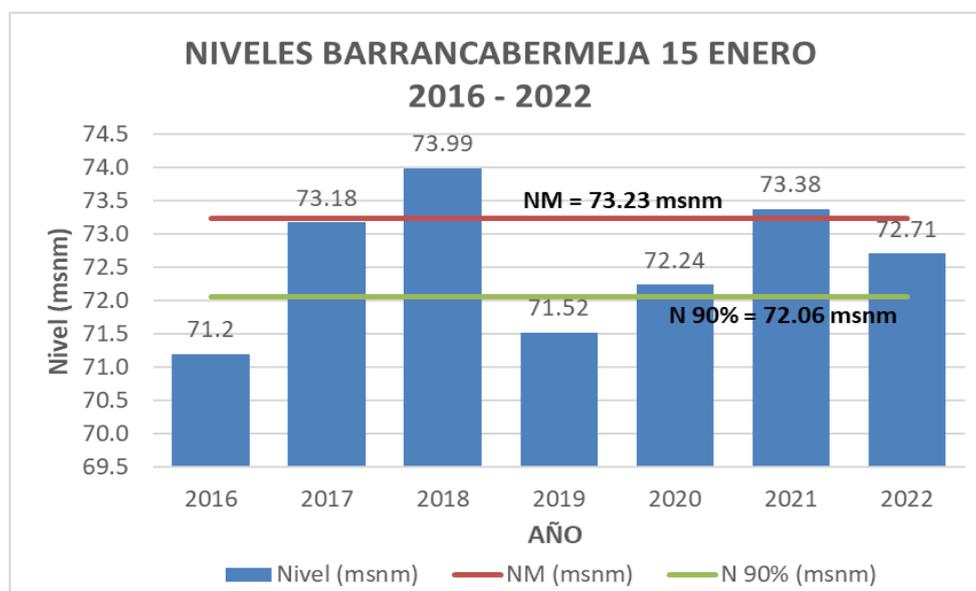


Figura 19. Niveles del río Magdalena en Barrancabermeja los 15 de enero entre 2016 y 2022 (base: registros hidrológicos del Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM de Colombia).

¹ Se ha considerado que los niveles del río el 15 de enero y 15 de marzo, son representativos de los respectivos meses.

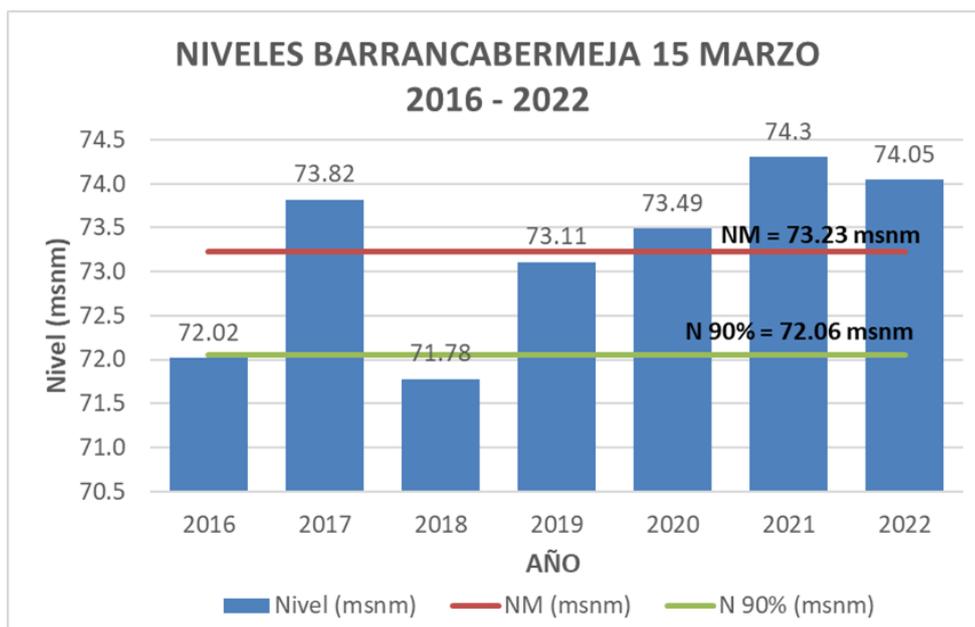


Figura 20. Niveles del río Magdalena en Barrancabermeja los 15 de marzo entre 2016 y 2022 (base: registros hidrológicos del Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM de Colombia).

Estas diferencias en niveles son importantes al momento de analizar las imágenes, pues por ejemplo, una situación como la del año 2018, mostraría unas islas casi completamente inundadas en enero pero despejadas y con playones adyacentes en marzo.

Este tipo de análisis no siempre fue evidente en los trabajos realizados por otros autores.

Análisis de la evolución espacial

Se procede ahora a comparar las imágenes satelitales de todos los meses de enero y todos los meses de marzo de los últimos 7 años, procesadas con los índices **NDVI** y **MNDWI**.

Período Enero 2016 - Enero 2022

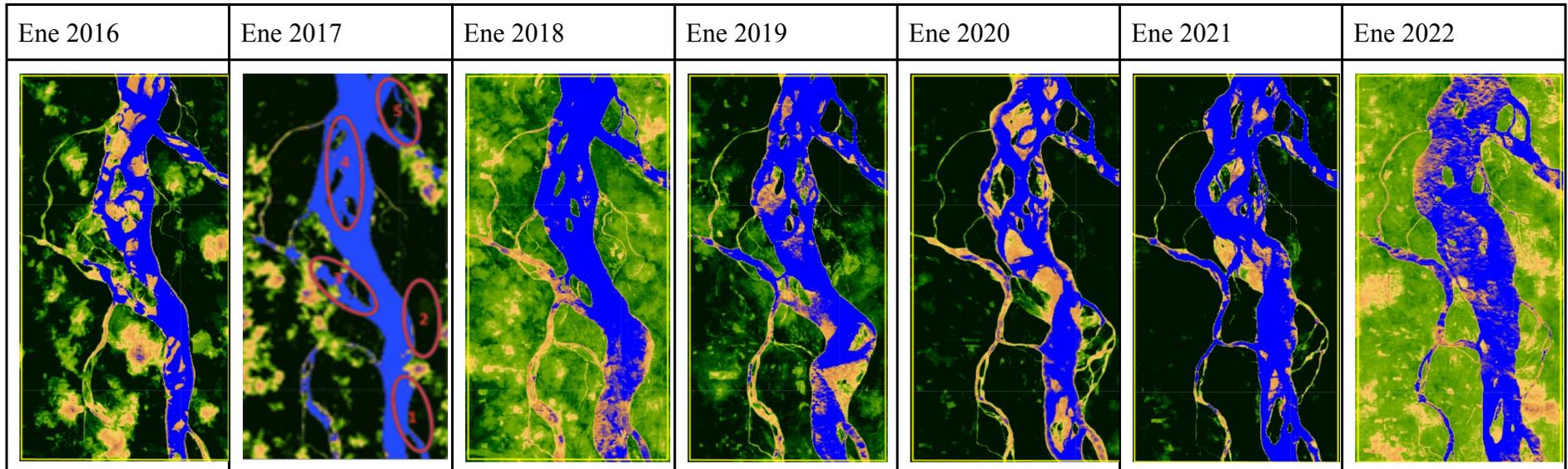


Figura 21. Río Magdalena en el sector de interés, enero 2016 a enero 2022 con Índice NDVI

Nota: En todas las imágenes, el Norte está en la parte superior de la figura

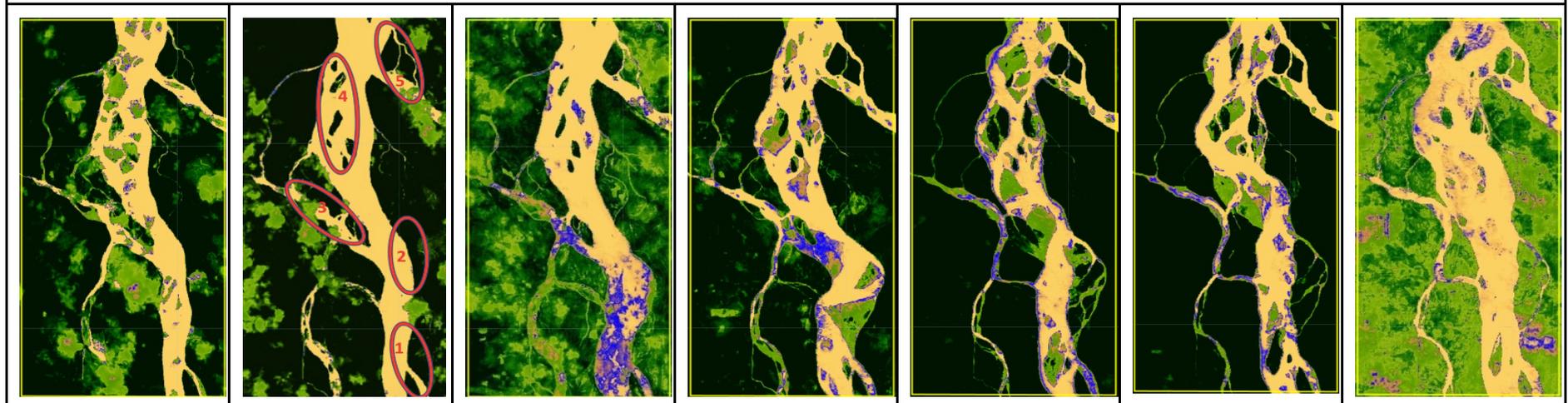


Figura 22. Río Magdalena en el sector de interés, enero 2016 a enero 2022 con Índice MNDWI

Período Marzo 2016 - Marzo 2022

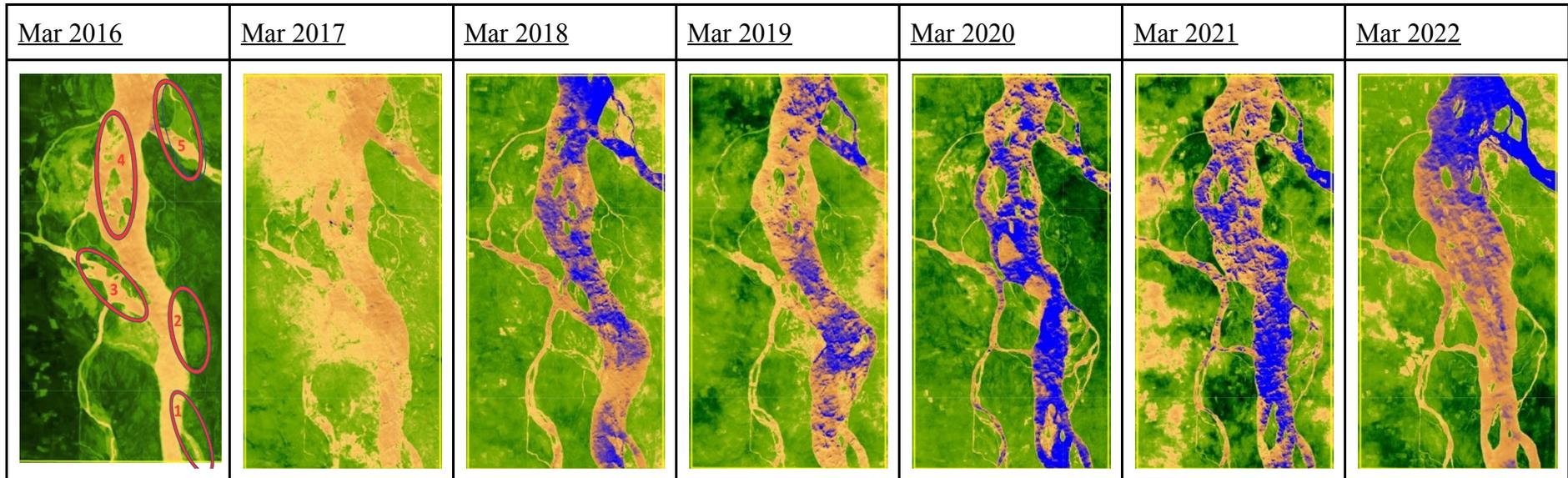


Figura 23. Río Magdalena en el sector de interés, marzo 2016 a marzo 2022 con Índice NDVI

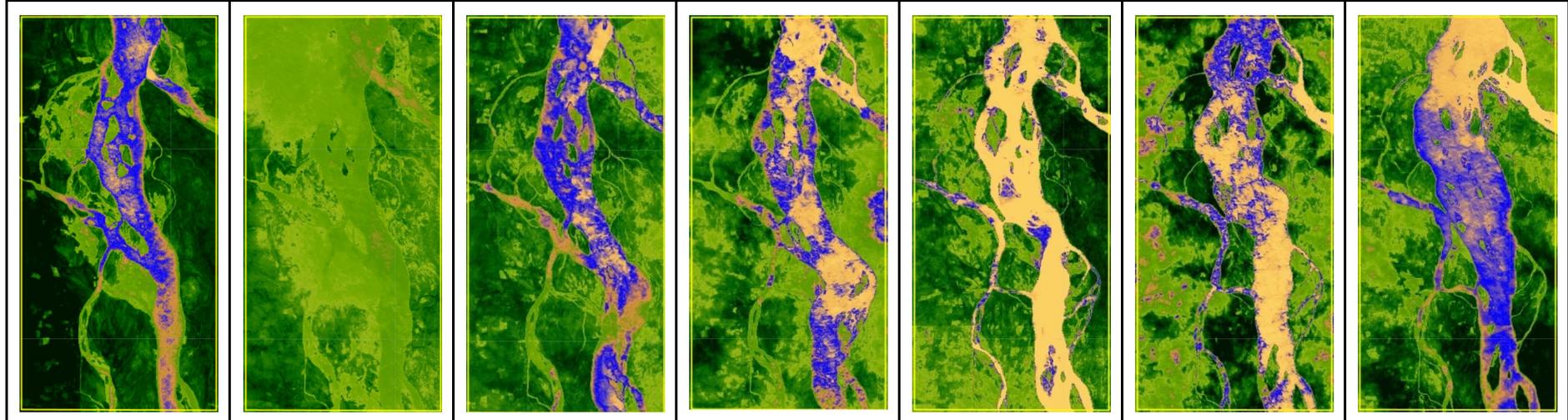


Figura 24. Río Magdalena sen el sector de interés, marzo 2016 a marzo 2022 con Índice MNDWI

Período Enero 2016 - Enero 2022

El análisis se efectúa de sur a norte (de abajo a arriba en las figuras), haciendo referencia a las zonas indicadas por los óvalos de color rojo que se muestran en las imágenes de enero de 2017 para ambos índices, NDVI y MNDWI.

En las Figura 21 y Figura 22, el canal principal del río trae una dirección S-N en el óvalo 1. Entre el 2020 y 2022 se nota la aparición de una isla en medio del cauce, éste se aprecia más ancho con el tiempo, y el brazo secundario que fluye al occidente (a la izquierda) se hace más pequeño después de 7 años. En la Figura 22 se aprecia mejor la presencia de nubes.

En este punto del análisis hay que mencionar que los niveles altos del río en enero del 2017, 2018 y 2021 favorecen que los playones e islas están parcialmente bajo agua, mientras que la situación de aguas bajas en enero de 2016, 2019 y 2020 permiten apreciar con claridad los playones y zonas de sedimentación, además de las propias islas mejor consolidadas desde tiempo atrás.

En la zona del óvalo 2 se muestra una erosión sobre la orilla de la margen derecha en los años 2018 y 2019, pero esa zona se vuelve a sedimentar entre los años 2020 y 2022; en 2022 casi no se nota que en esa zona hubo erosión, pues la sedimentación cubrió totalmente la zona erosionada en los años anteriores.

En el año 2017, en la zona del óvalo 3 se puede apreciar un brazo secundario que se desprende del cauce principal hacia el occidente (o sea un brazo difluente). Ese brazo se empieza a cerrar en 2018 y a partir del 2019 su entrada está casi completamente obstruida por playones que se comienzan a vegetar, lo cual es muy evidente en 2020 y 2021.

En la zona comprendida entre los óvalos 1 y 2, se nota la apertura de un brazuelo difluente que alimenta el brazo lateral occidental, lo que es particularmente notorio en 2021 y 2022.

La zona donde se ha tenido que recurrir a dragados periódicos para mantener profundidades adecuadas para navegación es la ilustrada por el óvalo 4. La situación se muestra particularmente difícil en los años 2019 a 2021, con muchos playones que se van desplazando hacia aguas abajo y que van obstruyendo el canal navegable. En el extremo nororiental de las imágenes, óvalo 5, se encuentran las bocas del río Sogamoso. Por su caudal, este río que es el segundo afluente en importancia del río Magdalena, forma un delta; en el período de 7 años del 2017 al 2022, se nota como el brazo situado más al norte ha venido aumentando de anchura y se está convirtiendo en el brazo principal, pues la boca que era en 2017 la más importante se está bloqueando con playones de sedimentos, al punto que en 2021 y 2022 está casi cerrada.

Se puede deducir que un análisis detallado a escalas más pequeñas podría determinar, en todo el sector, cuál es la zona por donde se establecería más probablemente el thalweg del río el año siguiente, para concentrar los dragados en ese alineamiento previendo cuáles playones son los que eventualmente van a invadir el espacio del canal navegable, teniendo en cuenta la evolución de islas, playones y orillas desde aguas arriba.

Período Marzo 2016 - Marzo 2022

Con las Figura 23 y Figura 24 correspondientes al mes de marzo de los siete (7) años analizados, se sigue el mismo proceso que se realizó con las figuras 21 para los meses de enero. Para las referencias espaciales dentro del sector de análisis también se hará referencia a las mismas áreas con óvalos rojos que se indicaron en enero de 2017 en las figuras 21.

Sin embargo, además de hacer un análisis de siete años, el cual se elaboró en forma adecuada comparando las situaciones representativas del mes de enero de 2016 a 2022 a lo largo de siete años, por lo cual no hay mucho que añadir, en este caso se hace también un análisis de enero a marzo, para determinar qué tantas variaciones se presentan en los tres meses que típicamente corresponden al período de mayor estiaje en la cuenca del río Magdalena (ver Figura 2) y de niveles más bajos en el sector de estudio de este TFM.

Nuevamente hay que recordar que en marzo del 2016 y 2018 se presentaron niveles del río muy bajos, mientras que en el resto de años los niveles en marzo fueron altos, siendo atípicamente aguas muy altas en los años 2017, 2021 y 2022 (ver Figura 20).

El primer aspecto por resaltar es que en la Figura 24 correspondiente al mes de marzo de 2016 con índice MNDWI, se aprecia en forma muy nítida en color verde claro el cauce mayor del río Magdalena, gracias a que el río estaba en condición de aguas muy bajas. Esto no es evidente en enero del mismo año y tampoco es evidente en ninguna de las demás imágenes. La anchura que presenta el cauce mayor en el sector del óvalo 4 es del orden de 3km, lo cual explica la gran variabilidad que exhibe el canal navegable en ese sitio.

Las imágenes de marzo del 2017 no se pueden utilizar por estar con mucha nubosidad.

De enero a marzo del 2018 es evidente cómo aparecen playones de sedimentos e islas someras, que estaban sumergidas en enero con aguas altas.

En el 2019, a pesar de la subida de nivel del río, se aprecia la consolidación de las islas en el sector del óvalo 4. Otro cambio morfológico evidente entre enero y marzo es la desaparición de un gran

playón de forma triangular y color verde claro localizado en la zona comprendida entre los óvalos 1 y 2, probablemente por el incremento de los niveles

Entre enero de 2020 y marzo del mismo año, con subida importante de los niveles del río, se alcanza a apreciar la disminución del área de playones, pero no hay cambios significativos en islas ni en orillas. En 2021 y 2022 se repite este mismo patrón de dinámica fluvial.

Una investigación más detallada y a una escala más pequeña, podría servir para determinar cuantitativamente cuánta área ganaron o perdieron los playones entre dos fechas predeterminadas, o cuántos metros de erosión se presentó en un sector específico de la orilla.

4. DISCUSIÓN SOBRE EL MÉTODO Y LOS RESULTADOS

El método tradicional de análisis de la dinámica fluvial del río Magdalena en los sectores que requieren adecuar el canal navegable para el mejoramiento de las condiciones de navegación, consistía en la comparación de imágenes de sensores remotos de diferentes épocas, a veces distanciadas por varios años. Estos intervalos de tiempo no permitían hacer un análisis cuantitativo, sino solamente establecer los límites hasta donde había llegado el cauce del río en diferentes fechas. Este nivel de análisis tampoco permitía hacer un planeamiento de las labores de dragado para el aseguramiento de un canal de navegación seguro de verano.

La posibilidad de tener imágenes de satélite (Landsat 7 y 8; Sentinel 1 y 2) que pasan muy frecuentemente por el mismo sitio (en el caso de Sentinel 2 cada 5 días, es decir 73 veces en un año), permite contar con un banco inmenso de imágenes con las cuales se puede mejorar en forma dramática la posibilidad de hacer análisis de dinámica fluvial muy detallados y con resultados tanto cualitativos (evaluaciones visuales) como cuantitativos.

Ante el problema planteado arriba, la investigación llevada a cabo en este TFM tuvo por objeto presentar la posibilidad de realizar los análisis de dinámica fluvial mediante la herramienta que ofrecen las imágenes de satélite y los resultados que se pueden esperar.

Para centrar el análisis en el espacio y tiempo, se seleccionó un área de 10 km en el sentido norte-sur (NS) y 5 km en el sentido oriente-occidente (EW), correspondiente al sector del río Magdalena conocido como Bufalera – Bocas del río Sogamoso, por una parte, y por otra parte, se estableció que el análisis se iba a realizar durante 7 años, del 2016 al 2022, para el primer trimestre que es representativo de estiaje, es decir una muestra de 21 meses en época tradicional y estadísticamente de aguas bajas, ideal para este tipo de análisis. Estudios realizados con imágenes de los satélites Sentinel 1 y 2 por otros autores en el río Vístula, Polonia (Kryniewska y Magnuszewski, 2021; Kryniewska, et al., 2022) y en ríos de Albania (Spada et al., 2018), menores en caudal, se refieren a la conveniencia de hacer los análisis en períodos de estiaje.

Para la utilización de las imágenes satelitales, se llevó a cabo inicialmente una preselección de índices espectrales según con lo realizado por otros autores en investigaciones similares (ver Tabla 3) y de acuerdo con las características más importantes que define cada índice en cuanto a la extensión y variabilidad de la superficie del agua clara, agua con sedimentos, la vegetación sobre playones e islas, la vegetación seca, la húmeda, etc. Se seleccionaron los seis (6) que mejor representan los fenómenos de dinámica y cambios morfológicos de un gran río aluvial para el propósito de la investigación: **NDVI, NDWI, MNDWI, SWM, AWEInsh y LSWI.**

Con estos 6 índices aplicados a las imágenes de 21 meses, se obtuvo una muestra de 126 mapas del espacio público hidráulico escogido en el sector Bufalera - Bocas del Sogamoso (Anexo 2). Se efectuó luego una comparación entre los mapas de un mismo mes para cada índice, es decir una evaluación visual cualitativa de qué tan representativo para cada caso es cada índice. De ese análisis se determinó, por una parte, que los mejores índices para esta investigación son **NDVI** y **MNDWI**, y por otra parte, que la evolución de un mes a otro no era significativa, por lo cual se decidió no incluir el mes de febrero, dejando sólo enero y marzo de cada año, reduciéndose así la muestra por analizar a 28 mapas. Así, el análisis de la dinámica fluvial del sector seleccionado se efectuó con las imágenes de los meses de enero y marzo de los años 2016 a 2022 procesadas con los índices **NDVI** y **MNDWI**, tanto a lo largo del trimestre de cada año como a lo largo de los siete años de análisis.

El análisis anterior no podía hacerse sin tener en cuenta la variación hidrológica del río durante los períodos de principios de año analizados. En consecuencia, se efectuó un análisis de las estadísticas de los niveles del río Magdalena en la estación fluviométrica más cercana al sector de análisis, para los meses de enero y marzo del período 2016-2022, con lo cual se complementó la evaluación de la dinámica fluvial, teniendo en cuenta lo planteado en los siguientes dos puntos.

La variación de los niveles entre enero y marzo de un mismo año mostró en varios casos que en sólo 60 días se puede pasar de una situación de aguas altas a aguas bajas o viceversa, por lo que debe tenerse muy en cuenta la situación hidrológica del río al momento de iniciar un estudio particular de evolución de la dinámica fluvial. Por ejemplo, una situación como la del año 2018, mostraría unas islas casi completamente inundadas en enero pero despejadas y con playones adyacentes en marzo, con una variación de niveles de 2,20 m. Esto llevaría a que en un análisis de caso particular se lleve a cabo el análisis de dinámica fluvial con imágenes más cercanas entre sí (por ejemplo cada 15 ó 20 días) lo cual es perfectamente viable dada la frecuencia de paso de los satélites sobre el mismo sitio.

A pesar de que el primer trimestre del año corresponde tradicional y estadísticamente a un período de estiaje con niveles del río Magdalena por debajo del promedio, la situación durante el período seleccionado de 7 años mostró una gran variabilidad en los niveles del río, hasta de 3,10 m de diferencia, como lo muestran el nivel de enero de 2016 en 71,20 msnm y el nivel de marzo del 2021 en 74,30 msnm. No obstante, esa variabilidad no fue un obstáculo para poder hacer el análisis de dinámica fluvial. En un análisis de caso para, por ejemplo, planear un dragado, no habría necesidad de hacer el análisis sobre un período tan largo, sino tal vez por los cuatro o seis meses anteriores y sobre una escala de mapas más pequeña; de esta manera las modificaciones hidrológicas pueden ser tenidas en cuenta a corto plazo, lo que hace que las variaciones entre máximos y mínimos sean menores.

El análisis efectuado en este TFM ha sido mayormente cualitativo. Sin embargo, en futuras investigaciones se podría seguir profundizando con la parte cuantitativa, para determinar qué área se perdió por erosión o se ganó por sedimentación en un período determinado, haciendo posible la estimación de tasas de erosión o sedimentación en ha/mes o por año. Con trabajos de campo complementarios se podría además estimar las profundidades promedio de esas áreas de erosión o sedimentación, para convertirlas en volúmenes, es decir m^3 /mes o por año.

Aunque el propósito inicial del TFM era hacer un análisis de dinámica fluvial orientado principalmente al planeamiento de obras de dragado y como soporte de estudios y diseños de obras de encauzamiento para fijar el canal navegable, como se hace en otros ríos navegables en Europa y en Norte América (TuDelft, 2021; ASCE, 2012) , el método se puede utilizar para otros propósitos, como la ingeniería conceptual para obras de control de erosión de orillas, el control de inundaciones y para el establecimiento de las mejores ubicaciones para bocatomas flotantes de sistemas de suministro de agua para acueductos y para riegos.

En la literatura consultada no hay casos de análisis de dinámica fluvial mediante índices espectrales de imágenes satelitales aplicados particularmente a dragados para el mejoramiento de las condiciones de navegación de un río aluvial grande como el Magdalena. Sin embargo, los análisis efectuados sobre río Vístula, Polonia (Kryniecka y Magnuszewski, 2021; Kryniecka, et al., 2022) sí mencionan que en ese río se han realizado desde hace muchos años estudios para la mejora de las condiciones de navegación mediante la implantación de obras de encauzamiento, y los análisis efectuados mediante imágenes de los satélites Sentinel 1 y 2 recientemente contribuyen mucho al entendimiento de la dinámica del río y al movimiento de los bancos de arena, lo cual permite una muy buena aproximación al tema del dragado.

5. CONCLUSIONES

De los análisis realizados se concluye que:

El análisis de dinámica fluvial realizado mediante índices espectrales de imágenes satelitales es una herramienta práctica que se ha utilizado cada vez más por parte de investigadores de este tema, como geomorfólogos, biólogos, ingenieros civiles, ambientalistas y profesiones afines.

Para las condiciones particulares del río Magdalena en el sector de análisis seleccionado, los índices espectrales que mejor describen los cambios en la dinámica fluvial son **NDVI** y **MNDWI**; el análisis conjunto con estos dos índices es muy robusto.

Aún con las variaciones hidrológicas anotadas anteriormente, el método permitió obtener resultados satisfactorios del análisis de la dinámica fluvial de un río aluvial grande como el Magdalena en época de aguas bajas, y podría aplicarse a otros sectores de mayor longitud donde este tipo de análisis se requiera o sea útil para algún propósito.

El cauce del río Magdalena en el sector seleccionado exhibe una dinámica muy activa que se aprecia en el cambio morfológico de islas y bancos de arena o playones, así como también en la apertura o cierre de brazos secundarios. Sin embargo, en algunos sectores se nota una estabilidad relativa en cuanto se refiere a las orillas principales del brazo principal, seguramente en sitios donde la orilla coincide con límites de los terrenos aluviales recientes con los de terrazas, los cuales geomorfológicamente son más estables a la erosión. En los sectores aledaños a los óvalos 1 y 2 (Figura 21 y Figura 23) se nota una mayor anchura del cauce después de siete (7) años.

Los principales cambios espaciales en la dinámica fluvial se presentan en playones, islas, brazos difluentes y barras de sedimentos aledañas a las islas. En general los playones se mueven hacia aguas abajo o desaparecen, mientras que las islas vegetadas permanecen, aunque la geometría de sus orillas sí se modifica.

La temporalidad de los cambios permite estimar la tendencia de los fenómenos de erosión y sedimentación y también la velocidad de desplazamiento de los playones hacia aguas abajo, información con la cual se puede realizar una planeación adecuada de los dragados del canal navegable principal.

Así mismo se puede estimar el transporte de sedimentos de fondo mediante el seguimiento temporal del desplazamiento de los bancos de arena hacia aguas abajo, en forma similar a lo efectuado en el río Vístula, Polonia (Kryniecka y Magnuszewski, 2021).

El método utilizado en el análisis de dinámica fluvial desarrollado en este TFM puede utilizarse de manera apropiada para el planeamiento de obras de dragado y para la determinación del mejor emplazamiento de obras de encauzamiento, en conjunto con los análisis hidrológicos de niveles del río y con la información geomorfológica de las márgenes y de las islas del río, en especial sobre la resistencia de las mismas a la erosión.

Para análisis particulares de caso donde se quiera hacer el planeamiento de obras de dragado, se recomienda utilizar imágenes más cercanas en el tiempo, del orden de cada 15 o 20 días, en un período anterior de unos cuatro a seis meses, para poder realizar el análisis de la dinámica fluvial con buen control de las variaciones hidrológicas.

El método planteado puede ser utilizado también para la ingeniería conceptual de otra serie de proyectos asociados con la ingeniería fluvial, como el control de erosión de orillas, el control de inundaciones, la localización de obras de captación sobre la orilla para los sistemas de suministro de agua a poblaciones y para sistemas de irrigación.

6. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ASCE – American Society of Civil Engineers, Manual of Engineering Practice N° 124 (2012). *Inland Navigation – Channel Training Works*.
- Boada Sáenz Ingenieros. (2007). *Estudios y Diseños de Obras de Encauzamiento en el río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Berrío – Barrancabermeja*. Fedenavi-Coirmagdalena.
- Boada Sáenz Ingenieros. (2009). *Diseños definitivos de las obras de encauzamiento para Navegación en los sectores 2 a 5 del tramo del río Magdalena comprendido entre Puerto Berrío y Barrancabermeja*. Fedenavi-Cormagdalena.
- Boothroyd R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B. & Prasojo, O.A. (2020). Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *WIREs Water*, 8(1), e21496.
- Carbonneau, P. & Piégay, H. (2012). *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Wiley-Blackwell.
- Emdepa Consultoría. (2011). *Diseños de las obras de encauzamiento para Navegación del río Magdalena en el sector comprendido entre Puerto Salgar y Puerto Berrío*. Fedenavi-Cormagdalena-Gobernación de Cundinamarca.
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. & Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, pp. 23–35.
- IEH Grucon S.A. (2013). *Diseños de las obras de encauzamiento del río Magdalena en el sector Barrancabermeja – Regidor*. Fedenavi-Cormagdalena.
- Jesyca S.A.S. Ingenieros Civiles e Hidráulicos. (2016). *Evaluación de la evolución fluvial del río Magdalena, revisión de modelaciones hidráulicas, y diseño de las estructuras de encauzamiento que son necesarias para mantener el canal navegable proyectado desde Puerto Salgar hasta Bocas de Ceniza*. Aecom Technical Services Inc.
- Jesyca S.A.S. Ingenieros Civiles e Hidráulicos. (2019). *Elaborar un análisis de ingeniería fluvial de los aspectos más relevantes a considerar, para la modificación de algunas condiciones técnicas del Nuevo Proyecto APP del río Magdalena*. Impala Terminals SAS.
- Kryniecka, K. & Magnuszewski, A. (2021). Application of Satellite Sentinel-2 Images to Study Alternate Sandbars Movement at Lower Vistula River (Poland). *Remote Sens*, 13, 1505.
- Kryniecka, K., Magnuszewski, A. & Radecki-Pawlik, A. (2022). Sentinel-1 Satellite Radar Images: A New Source of Information for Study of River Channel Dynamics on the Lower Vistula River, Poland. *Remote Sens*, 14, 1056.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425–1432.

- Milczarek, et al. (2017). Sentinel Water Mask (SWM) – New Index for Water Detection on Sentinel 2 Images.
- Noguera Mendoza, A. (1980). *Crónica Grande del Río de la Magdalena. Recopilación, datos y advertencias*. Ediciones Sol y Luna.
- Rouse J. W., Haas, R., Schell J. & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *NASA Special Publication, 351*, 309.
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. Wiley.
- Schumm, S. A. & Winkley, B. R. (1994). *The variability of large alluvial rivers*. American Society of Civil Engineers – ASCE Press.
- Spada, D., Molinari, P., Bertoldi, W., Vitti, A. & Zolezzi, G. (2018). Multi-Temporal Image Analysis for Fluvial Morphological Characterization with Application to Albanian Rivers. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 7*(8), 314.
- TuDelft (2021). *Ports and Waterways*.
- Xiao, X., Boles, S., Frohling, S., Salas, W., Moore, B., Li, C., et al. (2002). Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing, 23*, pp. 3009 – 3022.
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing, 27*(14), pp. 3025–3033.

OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Henshaw, A. J., et al. (2012). An assessment of the degree to which Landsat TM data can support the assessment of fluvial dynamics, as revealed by changes in vegetation extent and channel position, along a large river.
- Bertoldi, W., et al. (2011). Interactions between river flows and colonizing vegetation on a braided river: exploring spatial and temporal dynamics in riparian vegetation cover using satellite data.
- Karmaker, T. (2016). Study of channel instability in the braided Brahmaputra river using satellite imagery.
- Ali, A. (2022). Characterizing fluvial geomorphological change using Google Earth Engine (GEE) to support sustainable flood management in the rural municipality of El Faid.
- Sarp, G. (2016). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey.
- Ariza, et al. (2017). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano.
- Stančič, L. (2020). Fluvial gravel bar mapping with spectral signal mixture analysis.

ANEXOS

Anexo 1: Código Fuente (*Script*) de Google Earth Engine – GEE

```
ee.FeatureCollection(ee.Feature(JS));
var styling = { color: 'yellow', fillColor: '00000000'};

// Colección Sentinel 2 nivel 2
var Colección Sentinel =
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_HARMONIZED")
  .filterDate ('2018-03-01' , '2018-03-31')
var Vegetación = ee.Image(Colección Sentinel.mean());

// NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
var NDVI = Vegetacion.expression ('float ((NIR - RED) / (NIR +
RED))', {
  'NIR': Vegetacion.select ('B8'),
  'RED': Vegetacion.select ('B4')});

// NDWI (Normalized Difference Water Index)
var NDWI = Vegetación.expression ('float ((GREEN - SWIR) / (GREEN +
SWIR))', {
  'GREEN': Vegetacion.select ('B3'),
  'SWIR': Vegetacion.select ('B11')});

// MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)
var MNDWI = Vegetacion.expression ('float ((GREEN - NIR) / (GREEN +
NIR))', {
  'GREEN': Vegetacion.select ('B3'),
  'NIR': Vegetacion.select ('B8')});

// SWI (Sentinel Water Mask)
var SWM = Vegetacion.expression ('float ((BLUE + GREEN) / (NIR +
SWIR))', {
  'BLUE': Vegetacion.select ('B2'),
  'NIR': Vegetacion.select ('B8'),
  'SWIR': Vegetacion.select ('B11'),
  'GREEN': Vegetacion.select ('B3')});

// AWEInsh (Automated Water Extraction Index no shadow)
var AWEInsh = Vegetacion.expression ('float (4*(GREEN - SWIR1) -
(0.25*NIR + 2.75*SWIR2))', {
  'GREEN': Vegetacion.select ('B3'),
  'NIR': Vegetacion.select ('B8'),
  'SWIR1': Vegetacion.select ('B11'),
  'SWIR2': Vegetacion.select ('B12')});

// LSWI (Land Surface Water Index)
var LSWI = Vegetación.expression ('float ((NIR - SWIR*(2.13)) - (NIR
+ SWIR*(2.13)))', {
  'NIR': Vegetacion.select ('B8'),
  'SWIR': Vegetacion.select ('B11')});

// Simbología común para los índices
var Simbología NDVI = {max: 0.5, min: 0, // IMPORTANTE variar rangos
en función del índice
  palette: ['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',
```

```

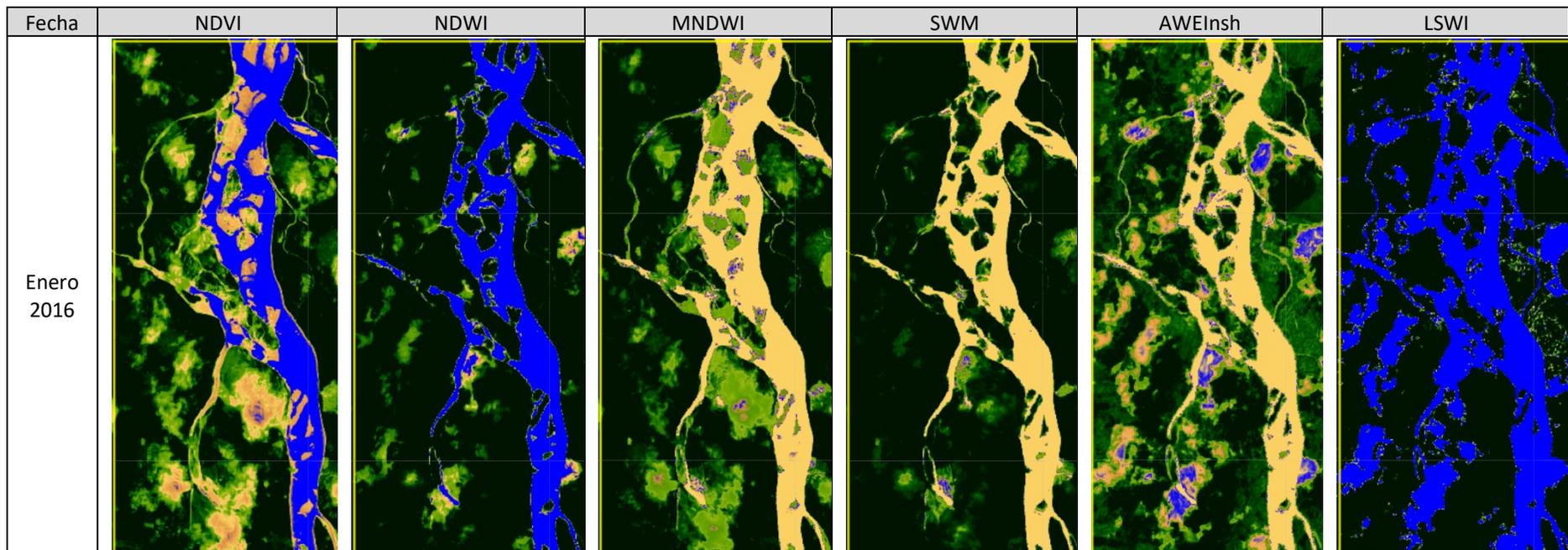
    'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601',
    '207401',
    '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']});
var Simbología NDWI = {max: 0.3, min: 0, // IMPORTANTE variar rangos
en función del índice
    palette: ['011301','011D01', '012E01', '023B01', '004C00',
'056201', '207401','3E8601', '529400',
    '66A000', '74A901', '99B718', 'FCD163','F1B555',
'DF923D','#0000ff']});
var Simbologia_MNDWI = {max: 0.03, min: -0.3, // IMPORTANTE variar
rangos en función del índice
    palette: ['011301', '011D01', '012E01',
'023B01','004C00','056201','207401','3E8601',
    '99B718', '74A901', '66A000',
'529400','DF923D','#0000ff','F1B555','FCD163']});
var Simbología SWM = {max: 1.4, min: 0.8, // IMPORTANTE variar rangos
en función del índice
    palette: ['011301', '011D01', '012E01',
'023B01','004C00','056201','207401','3E8601',
    '99B718', '74A901', '66A000',
'529400','DF923D','#0000ff','F1B555','FCD163']});
var Simbologia_AWEInsh = {max: 1000, min: -8000, // IMPORTANTE variar
rangos en función del índice
    palette: ['011301', '011D01', '012E01',
'023B01','004C00','056201','207401','3E8601',
    '99B718', '74A901', '66A000',
'529400','DF923D','F1B555','#0000ff','FCD163']});
var Simbología LSWI = {max:-6000, min: -6900, // IMPORTANTE variar
rangos en función del índice
    palette: ['011301','011D01', '012E01', '023B01', '004C00',
'056201', '207401','3E8601', '529400',
    '66A000', '74A901', '99B718', 'FCD163','F1B555',
'DF923D','#0000ff']});
Map.centerObject(JS);
Map.addLayer (NDVI, Simbología NDVI, 'NDVI',0);
Map.addLayer (NDWI, Simbologia NDVI, 'NDWI',0);
Map.addLayer (MNDWI, Simbologia_MNDWI, 'MNDWI',0);
Map.addLayer (SWM, Simbología SWM, 'SWM',0);
Map.addLayer (AWEInsh, Simbologia_AWEInsh, 'AWEInsh',0);
Map.addLayer (LSWI, Simbologia LSWI, 'LSWI',0);
Map.addLayer (Vegetación, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0, bands:
['B4','B3','B2']}, 'RGB color natural',0);
Map.addLayer(JS.style(styling));

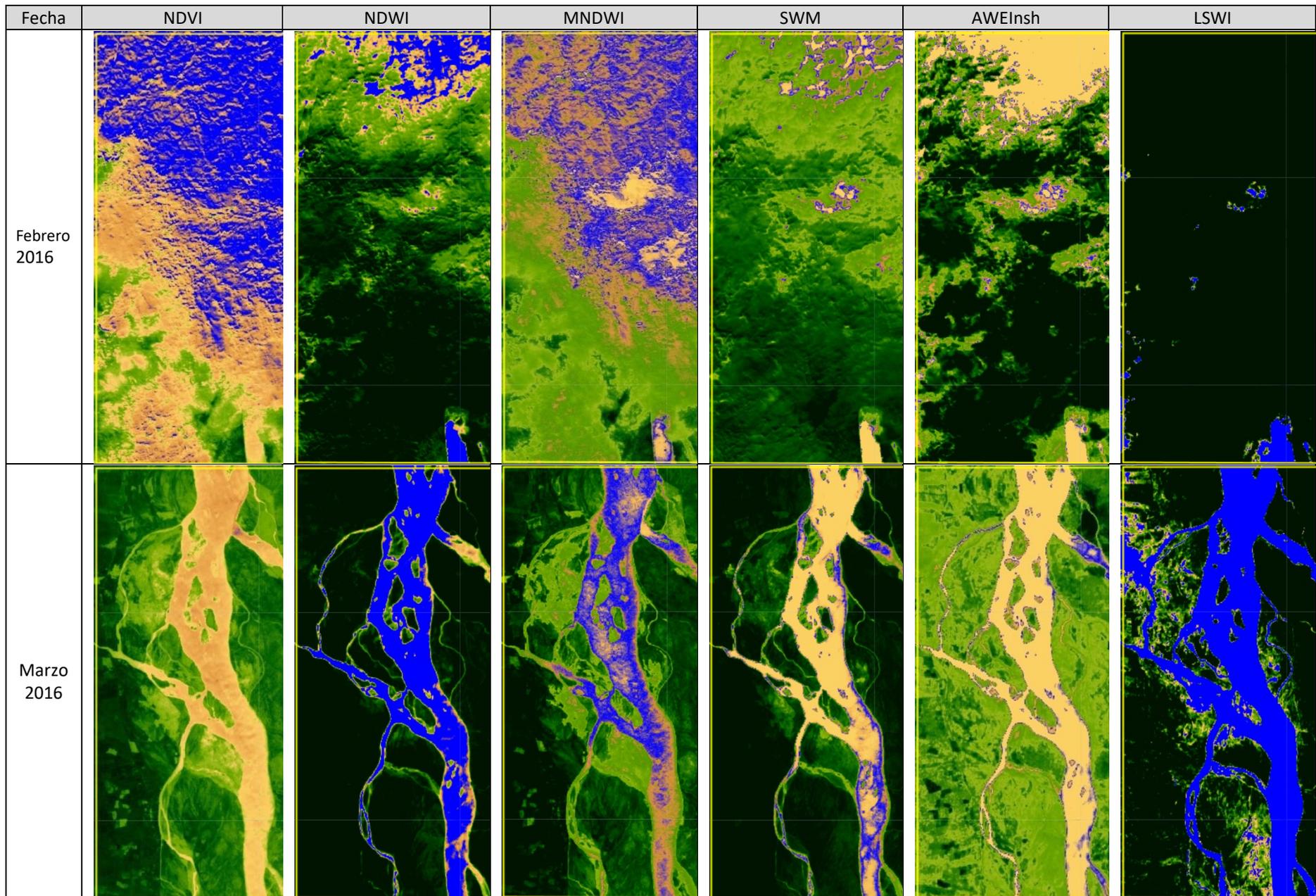
```

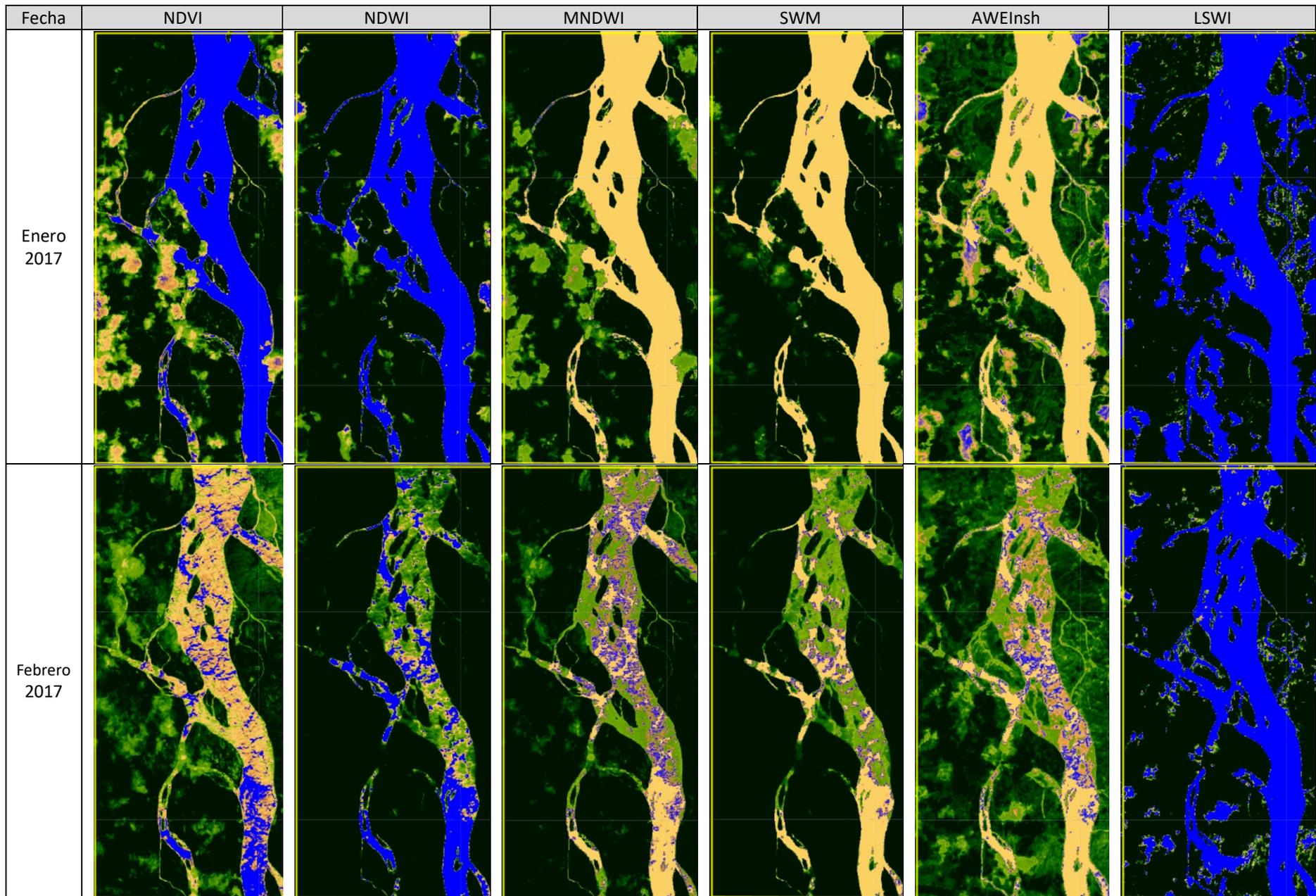
Anexo 2: Mapas resultantes con los seis Índices Espectrales para el sector Bufalera - Bocas del Sogamoso del río Magdalena

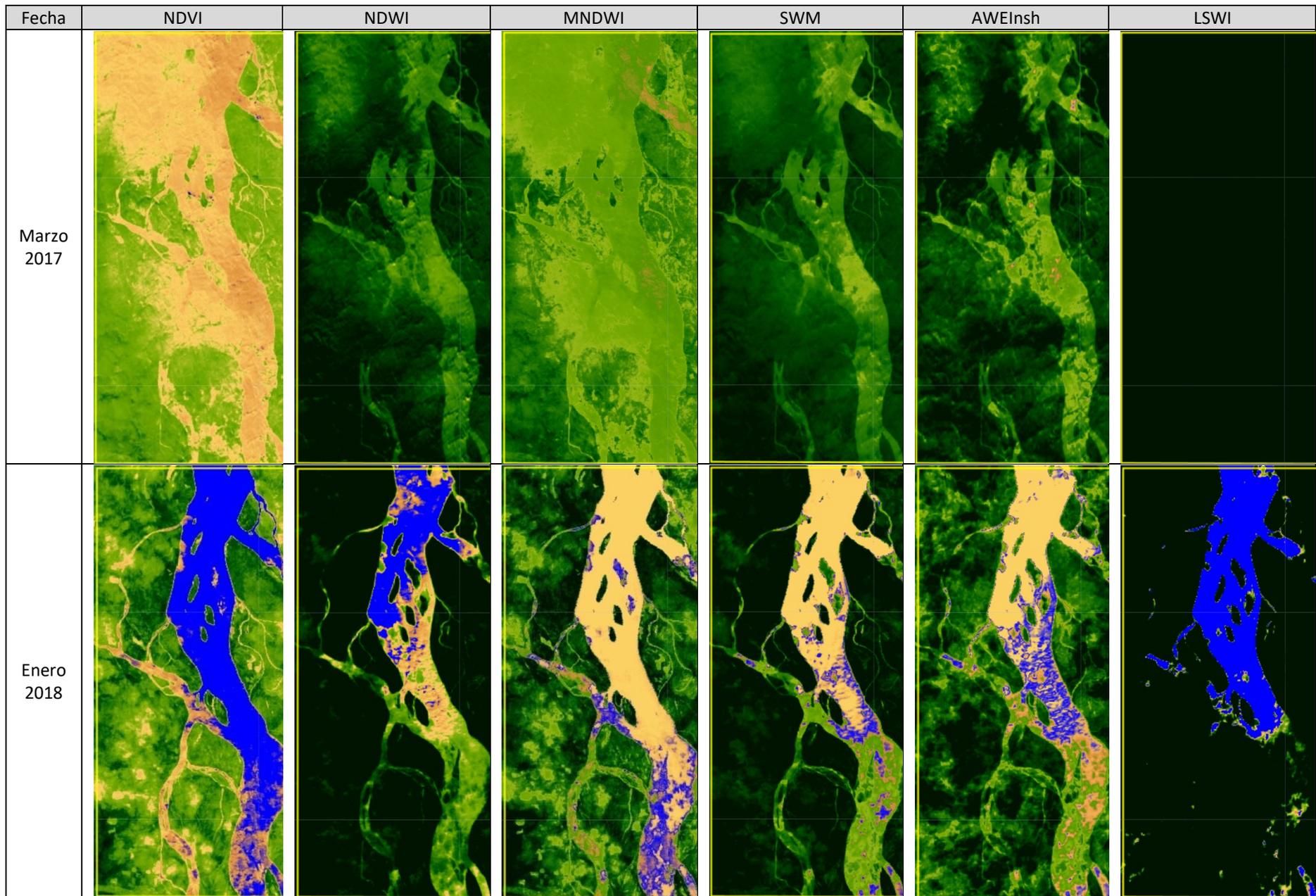
En este Anexo se presentan todas las imágenes satelitales del sector de interés, Bufalera – Bocas del Sogamoso, correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo de los siete años comprendidos entre 2016 y 2022, procesadas con los seis Índices Espectrales seleccionados.

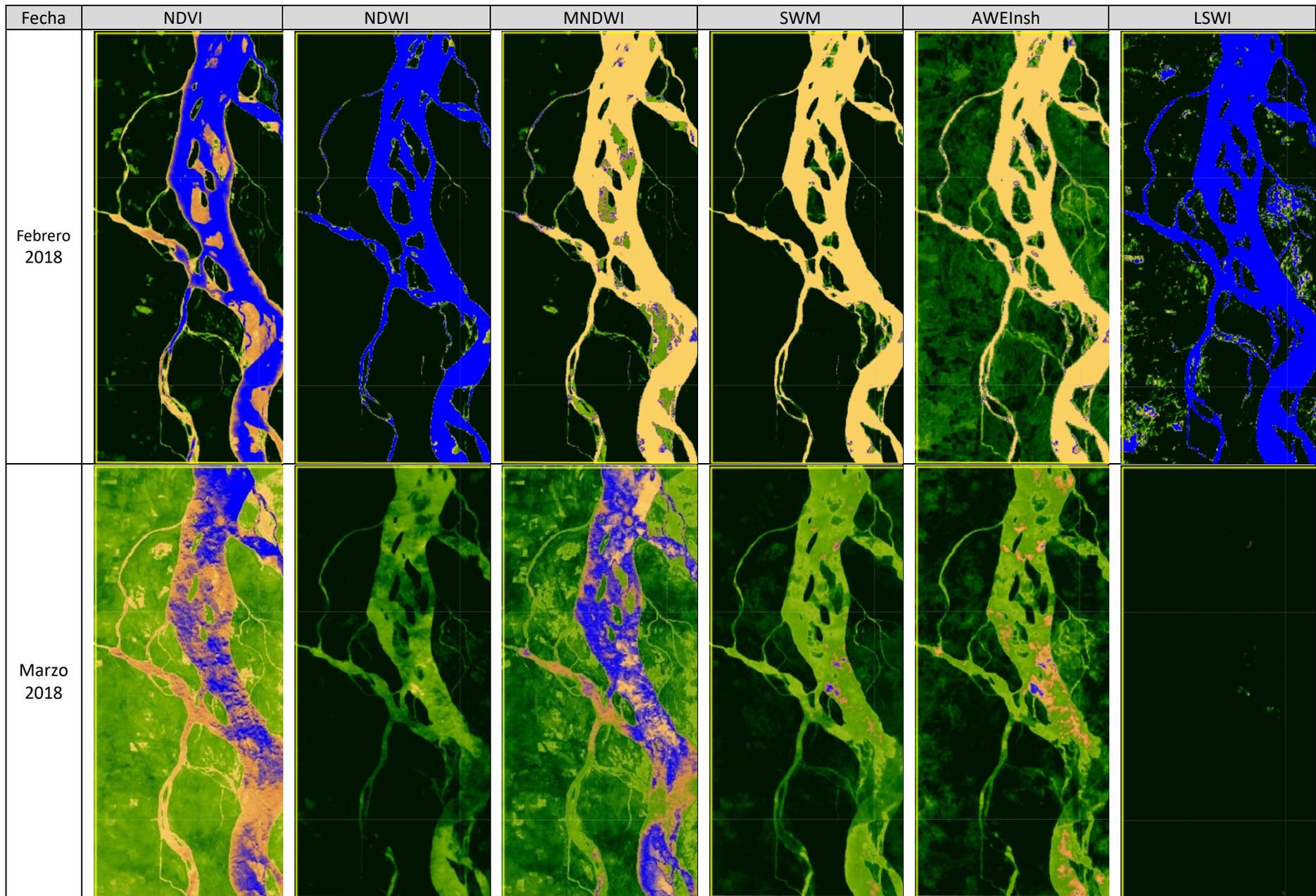
En total son 3 meses de cada año, para 7 años de análisis, es decir 21 meses de registro. Cada registro se procesó con 6 Índices Espectrales para un total de 126 imágenes que conformaron el universo de análisis de este trabajo.

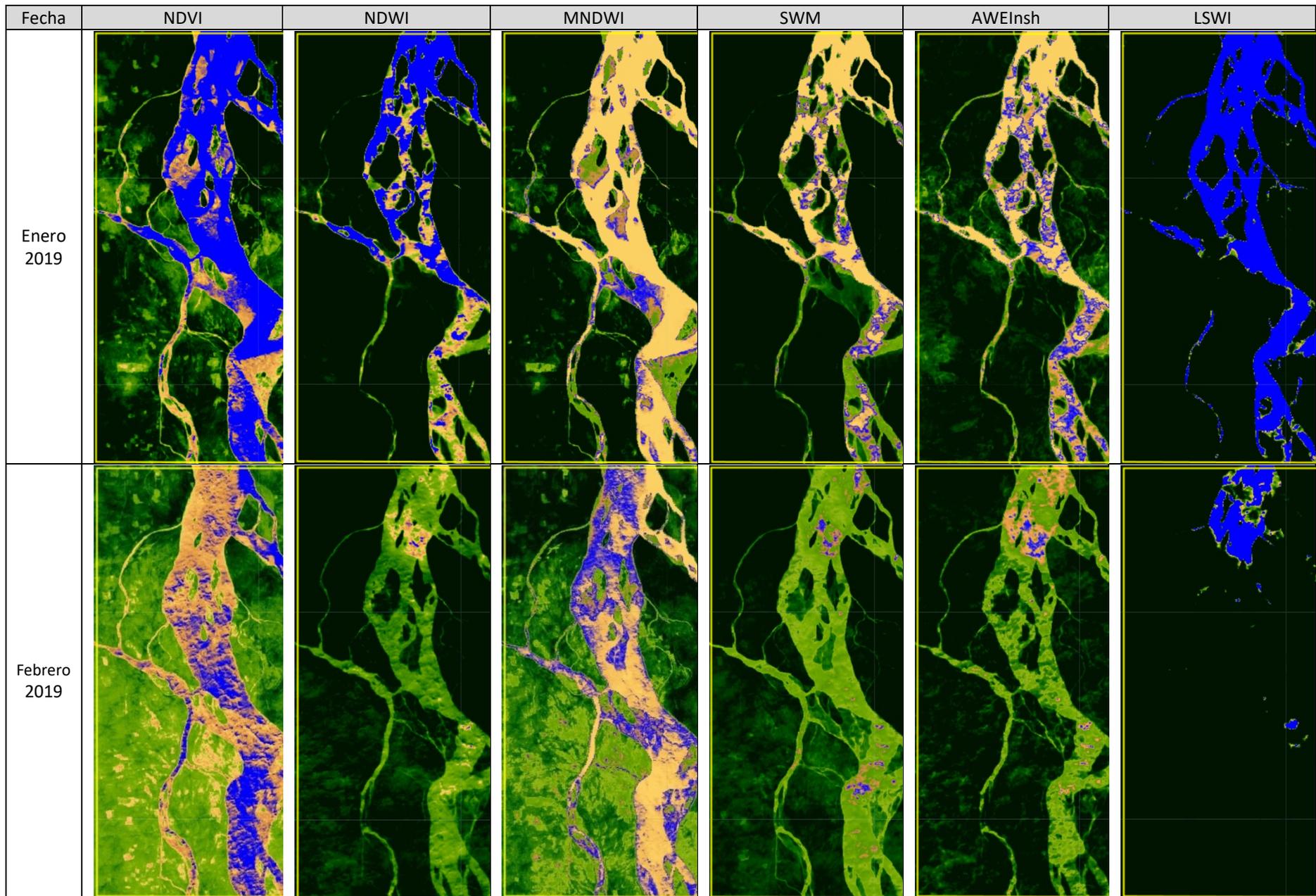


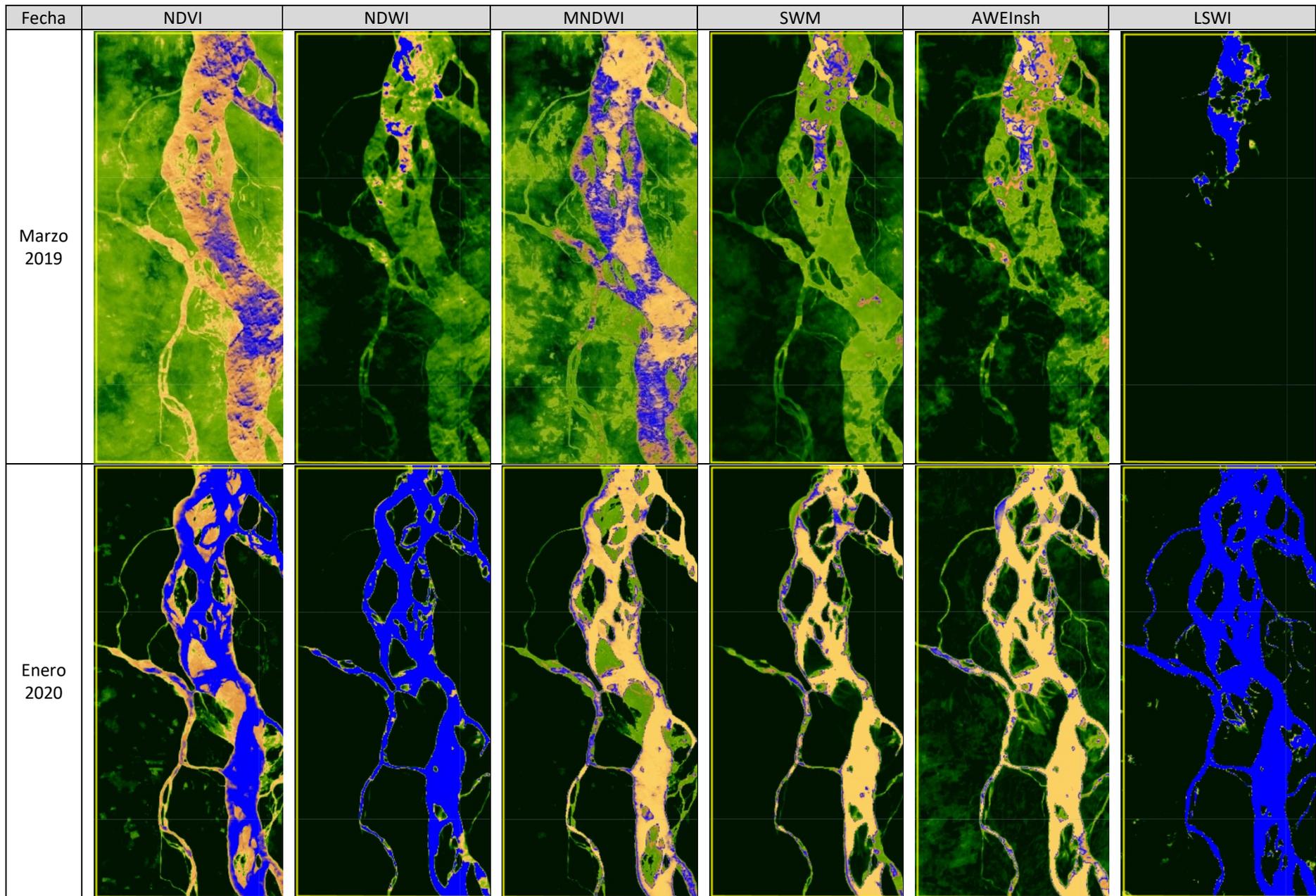


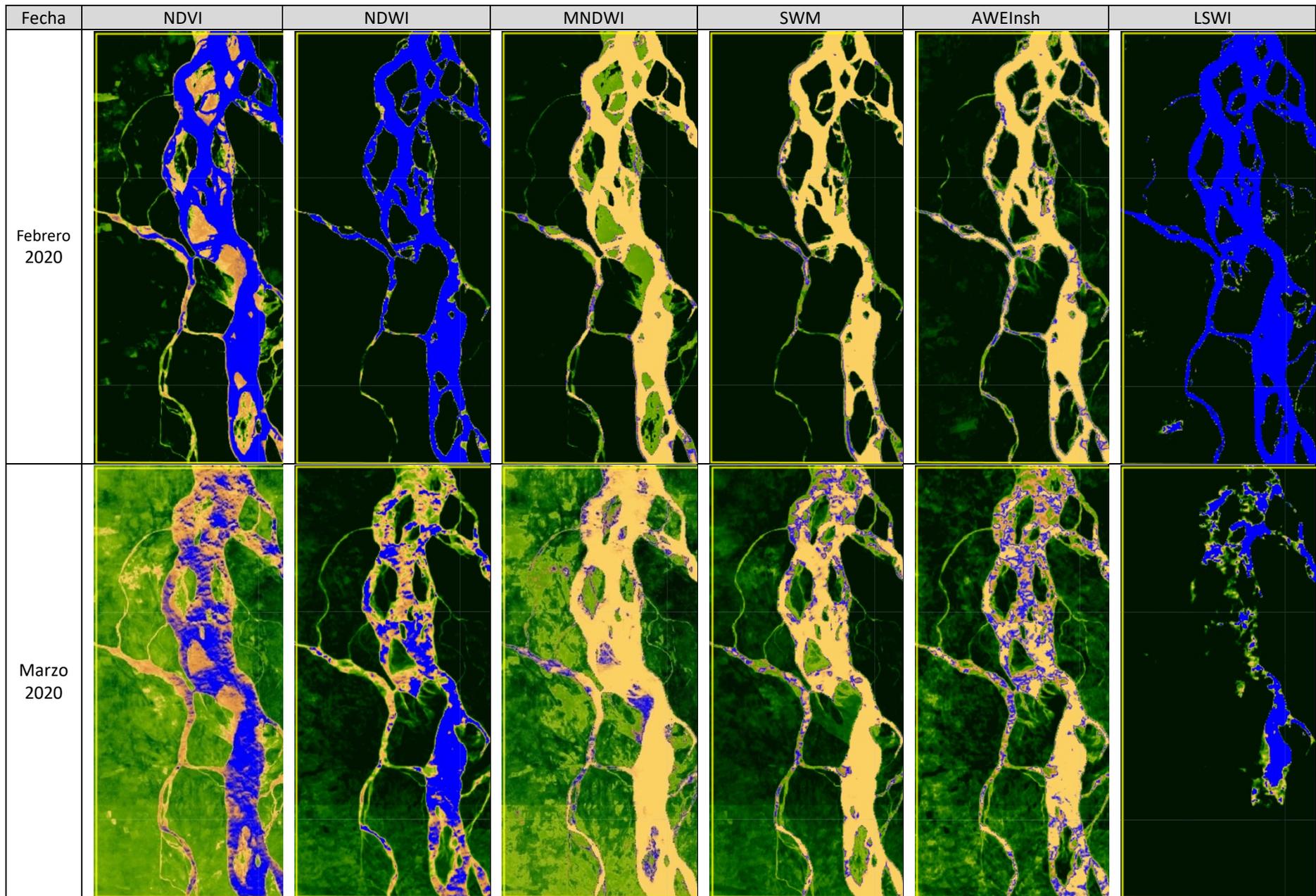


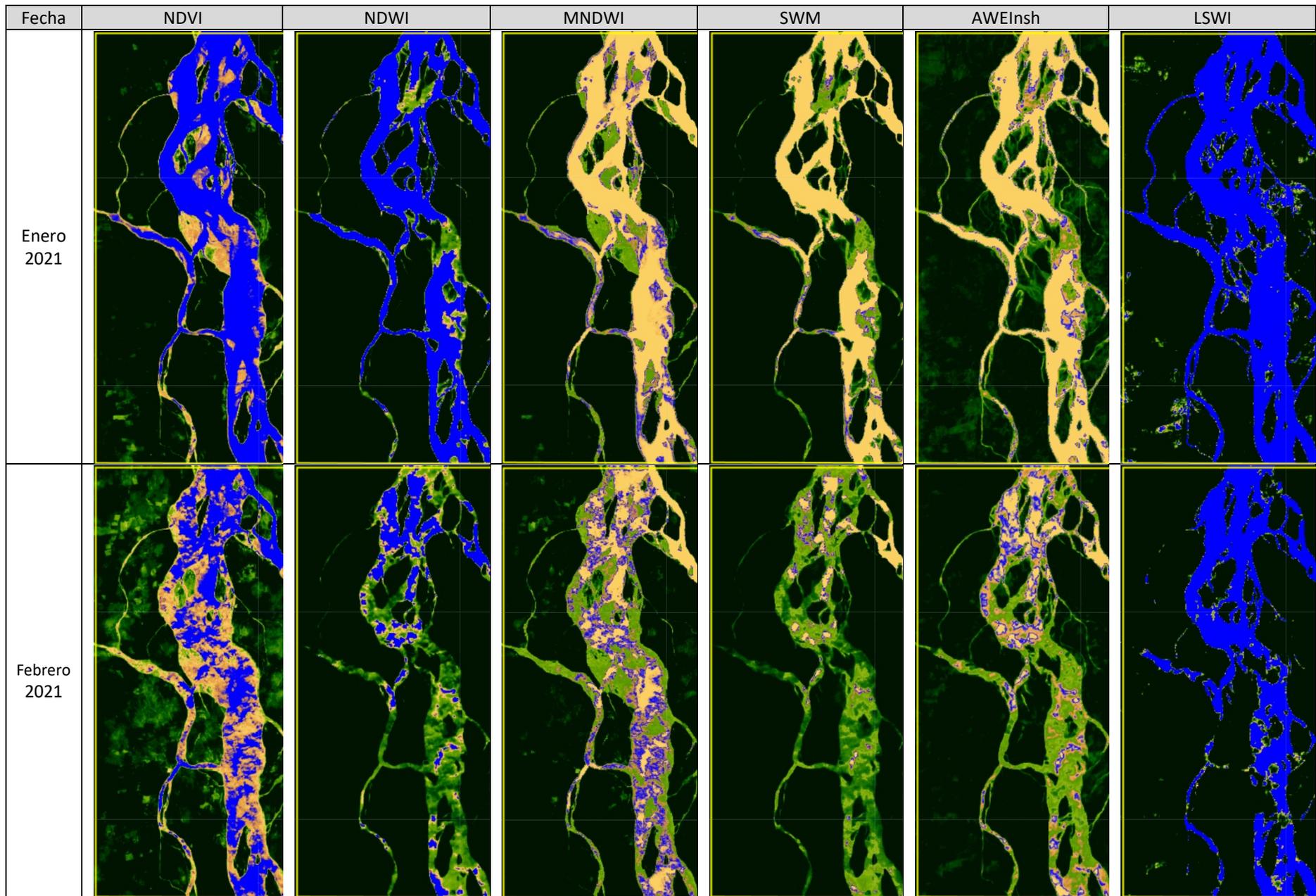


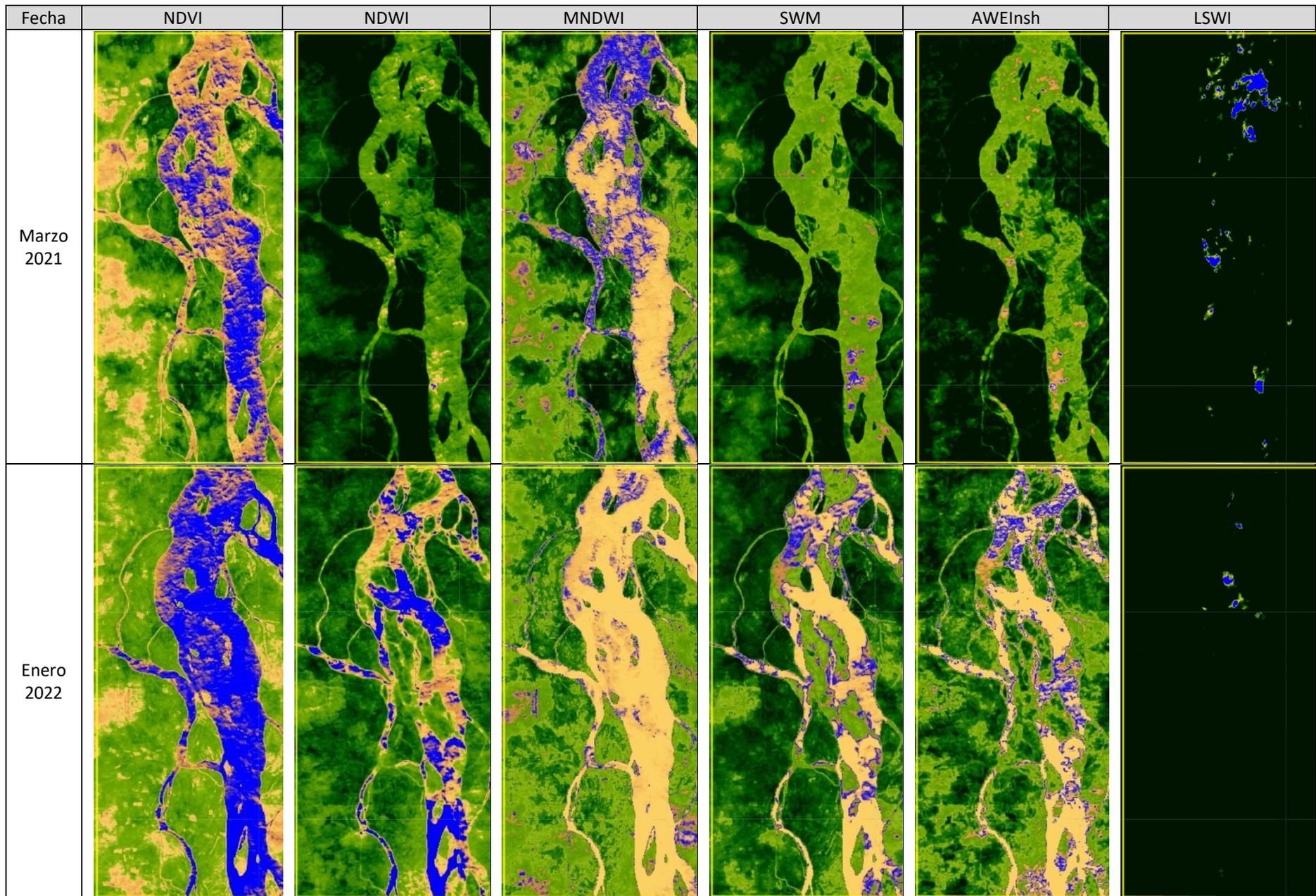


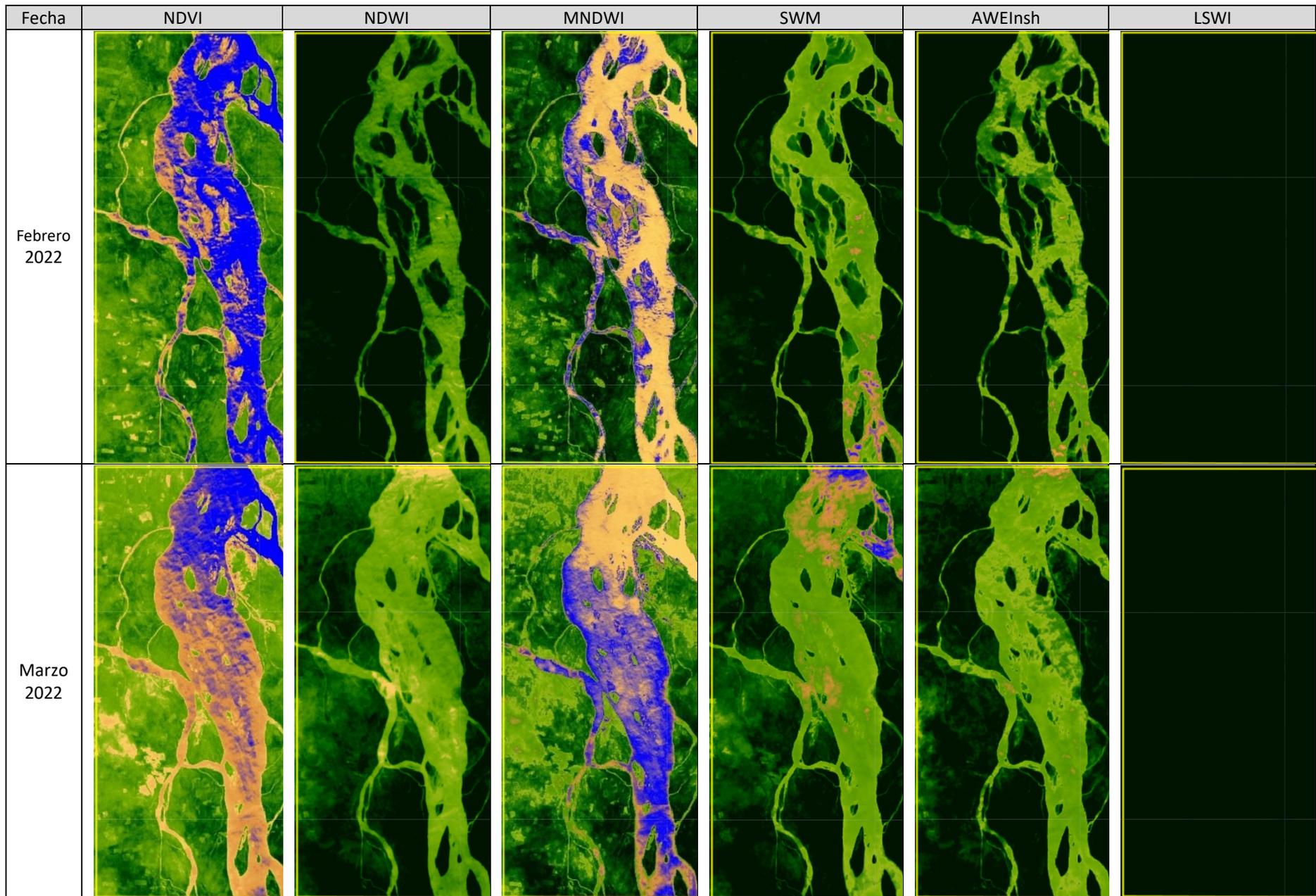












Terminado en Bogotá, Colombia, en enero de 2023.